**Université de Lille** **École doctorale MADIS – ED 631**

# Modélisation prédictive des accidents aux passages à niveau pour permettre l'optimisation des passages à niveau existants et le développement de nouveaux systèmes

**Olivier CAZIER**

Sous la direction de Mohamed Ghazel, Directeur de recherche au laboratoire COSYS-ESTAS de l'Université Gustave Eiffel, Campus de Lille

**19 décembre 2024**

Membres du jury

| | | |
|---|---|---|
| M. Mohamed Ghazel | Directeur de thèse | DR, Université Gustave Eiffel |
| M. Laurent Bouillaut | Rapporteur | CR, Université Gustave Eiffel |
| M. Walter Schön | Rapporteur | Pr, Université de Technologie de Compiègne |
| Mme. Ci Liang | Examinatrice | MCF, Harbin Institute of Technology |
| Mme. Insaf Sassi | Examinatrice | Dr, Direction de la Recherche, SNCF |
| M. El-Miloudi El-Koursi | Examinateur | DR, Université Gustave Eiffel |
| M. Ludovic Macaire | Président du jury | Pr, Université de Lille |
| M. Louis Delvig | Invité | IRT Railenium |
| M. Julien Boucault | Invité | Établissement Public de Sécurité Ferroviaire |

## Résumé

L'objectif de cette thèse est d'explorer la possibilité de modéliser les accidents aux passages à niveau, et d'utiliser ce modèle :

— Pour prédire le risque d'accident de modèles innovants de passage à niveau.
— Pour interpréter les retours d'expérience des accidents, et, plus généralement, d'enclencher un processus d'aller-retour théorie/expérience qui permettrait à la fois d'améliorer les modèles, de comprendre les causes d'accident et d'améliorer plus rapidement la sécurité.

La thèse comporte cinq thèmes principaux :

1. Une description « statistique » de la population de passages à niveau Français (état des lieux), ainsi qu'une bibliographie et un état de l'art portant, non pas tant sur les modèles (le seul modèle prédictif des accidents de passages à niveau (PN) est celui de Stott (1987), qu'essentiellement sur les données et les éléments connus qui pourraient être exploités dans les modèles.
2. Un premier modèle de comportement des conducteurs routiers aux PN.
3. Un deuxième modèle, dit « Modèle générique d'accidentologie aux PN », portant sur les prédictions de risques pour les différents types de passage à niveau (PN ou LC/LX pour Level Crossing en anglais), représentant ce qu'il est possible de faire, dans l'état actuel des données disponibles, essentiellement ferroviaires, comme modèle prédictif de risques aux PN. Ce « Modèle générique d'accidentologie aux PN », est issu d'un modèle complet préliminaire de type Monte -Carlo, qui s'est avéré trop lourd pour être exploitable. Le modèle générique ayant été calé sur les PN à deux demi-barrières (SAL 2, PN à Signalisation Automatique Lumineuse à 2 barrières, AHB en acronyme anglais), cette partie contient aussi une validation du modèle utilisant d'autres PN qui n'ont pas été utilisés pour le calage du modèle.
4. Plusieurs exemples de l'utilisation du « Modèle générique d'accidentologie aux PN » pour optimiser les types de PN existants, pour développer des PN plus performants, mais aussi pour évaluer l'impact d'opérations d'amélioration sur une population de PN hétérogène.
5. La démarche d'élaboration d'un troisième modèle, dit « modèle d'accidentologie individualisé au PN » montrant l'apport de l'enrichissement mutuel du retour d'expérience (représenté par un modèle statistique de Cox) et de la modélisation prédictive, puis la possibilité d'utiliser cet enrichissement pour développer un modèle bayésien adapté à la prévision de l'accidentologie d'un PN « individualisé », incluant notamment les caractéristiques routières propres au PN.

Les principales conclusions de la thèse sont les suivantes :
— Une unité du comportement des conducteurs face au stimuli provenant d'un PN à « 3 aspects » assimilable à leur comportement à un feu tricolore

1. ouvert = vert,
2. rouge clignotant ou jaune avant mouvement des barrières = orange,
3. en cours de fermeture/fermé = rouge.

— Une prédominance des incidents et des accidents dus à la cécité d'inattention, notamment quand le flux de véhicules est faible.
— La confirmation du retour d'expérience européen et mondial sur l'efficacité des détecteurs d'obstacles aux PN.
— L'intérêt d'un PN « normalement fermé » pour des PN à faible flux de véhicules.
— La possibilité de stratégies de sécurisation mêlant suppression de PN peu fréquentés et équipement en DOPN de PN fréquentés.

**N.B :** Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une Validation des Acquis de l'Expérience (VAE).

## Abstract

The objective of this thesis is to explore the possibility of modeling accidents at level crossings, and to use the models :

— To predict the accident risk of innovative level crossing models.
— To interpret the feedback from accidents, and, more generally, to initiate a back-and-forth process between theory and experience that would make it possible to improve models, understand the causes of accidents and improve safety more quickly.

The thesis includes five main themes :

1. A " statistical " description of the French level crossing population (state of art), as well as a bibliography concerning, not the models (the only predictive model of level crossing accidents (PN) is that of Stott (1987), but mainly identifying the data and known elements that could be used in the models.
2. A first model of the behavior of vehicle drivers at a level crossing.
3. A second model "Generic LC accidents model" (PN, Passage à Niveau), showing what can be done, with the available data for a predictive risk model of French LCs. The model is based on the two-half-barrier LCs (AHB =SAL 2, Automatic Half Barrier LC, AHBs) and this part also contains a validation of the model using other LCs that were not used for the calibration of the model.
4. Several examples of the use of the "Generic LC accidents model" to optimize existing types of LCs and develop more efficient LCs, but also to evaluate the impact of potential or implemented improvement operations on a heterogeneous LC population.
5. An approach towards a third model, "Individual LC accident model", of what could be the mutual enrichment of the LC accidents model, by using both feedback (represented by a Cox statistical model) and predictive modeling, to add individual LC

features such as road parameters to the model. Additional not yet available data would be required to pursue this approach in the future.

Our main conclusions are :

— Motorized accidents at LC can be explained by the car driver behavior : car driver behavior is identical at all LCs, as the ” 3 aspects ” of a traffic light : open=green, flashing red or yellow before the movement of the barriers= yellow, in the process of closing/closed=red.
— Most accidents are caused by Inattentional blindness, especially when the flow of cars is low.
— Confirmation of European and global feedback on the effectiveness of obstacle detectors at LCs with large car flows.
— The interest of a ” normally closed ” LC for LCs with a low flow of cars.
— The possibility of safety strategies combining the removal of low-traffic LCs and the provision of obstacle detectors for LC with large car flows.

**N.B :** This thesis was carried out under the ”Validation of Acquired Experience” (VAE) framework.

# Remerciements


___ MEDITATION XVII : Devotions upon Emergent Occasions – (Donne 2025)

*"No man is an Island, entire of itself.*

*Every man is a piece of the Continent, a part of the main.*

*If a Clod bee washed away by the Sea, Europe is the lesse, as well as if a Promontory were, as well as if a Manor of thy friends or of thine owne were;*

*Any man's death diminishes me, because I am involved in Mankinde;*

*And therefore, never send to know for whom the bell tolls; It tolls for thee."*

---

Une pensée pour les associations de victimes d'accidents de passage à niveau (Dupage Railroad Safety Council, Sourire des Anges, Nicolas4ever, etc.) et pour tous les cheminots, conducteurs de train, de bus ou agents de l'infrastructure qui doivent vivre avec le traumatisme d'un accident ou d'une catastrophe.

Si la motivation pour effectuer cette recherche est assez simple à formuler, essentiellement l'empathie, si bien décrite dans ce poème de John Donne, l'inspiration est cependant quelque chose de complexe, de peu contrôlable.

Elle peut être favorisée par la nature, l'environnement, la musique qui facilitent le vagabondage de l'esprit, mais elle est souvent inspirée par un mot, une idée d'un collègue, d'un ami ayant un rapport plus ou moins lointain avec vos préoccupations, mais qui vous ouvre brusquement un nouveau chemin.

Parmi tous ceux qui ont, fortuitement ou non, contribué à construire l'enchainement des idées de cette thèse, j'en citerai tout particulièrement trois :

- Mon complice et mentor Mohamed Ghazel, dont un article (Ghazel 2010) sur les réseaux de Petri stochastiques a été le déclencheur : « Intéressant cet article mais au fait, si on itère quelques centaines de milliers de fois, cela ressemble à un modèle de Monte-Carlo « réaliste » d'un PN ? »;
- Nakajima Yasunori, qui, outre son rôle direct dans l'adoption des détecteurs d'obstacles au Japon, a été un des piliers de la direction de la sécurité de JR East, et qui a attiré mon attention sur les mécanismes d'esquive;
- Laurent Cebulski de l'Epsf, dont une remarque m'a mis sur la piste de la pièce manquante du puzzle (Utiliser la dépendance du risque au moment pour évaluer le ratio entre incidents dus à la distraction et à l'imprudence) et dont les idées parfois provocatrices (notamment sur l'utilisation des signaux faibles) peuvent inspirer d'autres recherches.

Un grand merci aussi :

- Au jury de la thèse, pour leur travail de relecture, de critique et d'enrichissement (Mme. Liang, MM. Boucault, Bouillaut, El Koursi , Macaire, Schön)

— À Railenium (Bertrand Minary, Louis Delvig, Sébastien Lefebvre, Insaf Sassi) et à l'EPSF (Bruno Dember, Antoine Hespel, Damien Willett, etc.) pour leur contribution et nos échanges ;
— À mes amis de Trafikverket (Ole Mornell, Héléna Radbo, Hans Tellefors, Patrick Mueller), de Metrolink (Pauline Ulm) de la FDA, de JR EAST ;
— À la SNCF (A. Autruffe, F. Noack, M. Gueraud, Sarouthan, etc.) ; même si nous ne sommes pas toujours d'accord, et si nos approches sont très différentes… respect.

Un dernier mot pour mon entourage ; mon épouse Martine, mes enfants Elisabeth et Nicolas, mes amis. J'espère qu'ils me pardonneront de les avoir parfois un peu négligés pendant que je cherchais l'inspiration. Et merci en particulier à mon épouse et à ma fille pour leur aide avec l'administratif, la relecture et la correction de cette thèse.

# Table des matières


**1 Introduction** **25**

**2 État de l'art et bibliographie : Description des PN** **27**
2.1 Passages à niveau et accidents . . . . . 28
2.2 Passages à niveau vus comme interface routière et ferroviaire . . . . . 39

**3 État de l'art et bibliographie : les mécanismes d'accidents aux passages à niveau** **53**
3.1 Types d'accidents aux PN en France et dans le monde . . . . . 55
3.2 Modèle bayésien et apport à la compréhension des mécanismes d'accident 68
3.3 Erreurs de jugement au passage à niveau . . . . . 69
3.4 Cécité d'inattention . . . . . 71

**4 Modèle de comportement des conducteurs routiers aux PN** **75**
4.1 Réflexion préliminaire et données d'entrées d'un modèle prédictif . . . . 77
4.2 Comportement du conducteur routier . . . . . 77
4.3 Modèle préliminaire du comportement des conducteurs routiers aux PN à feux et barrières . . . . . 78

**5 Modèles d'accidentologie aux passages a niveau** **103**
5.1 Modèle préliminaire d'accidentologie aux passages à niveau . . . . . 105
5.2 Passer du modèle préliminaire au modèle générique d'accidentologie aux passages à niveau . . . . . 108
5.3 Principes du modèle générique d'accidentologie aux PN . . . . . 109
5.4 Description qualitative et quantitative du modèle générique d'accidentologie aux PN . . . . . 111
5.5 Validation du modèle sur un échantillon extrême de SAL 2 et sur les SAL 4 français . . . . . 123
5.6 Validation du modèle simplifie d'accidentologie aux PN sur les PN a détecteurs d'obstacles au Japon . . . . . 133
5.7 Limites probables de validité du modèle générique d'accidentologie aux PN 139

**6 Influence de la durée d'annonce et des performances du train sur le risque de collision** **141**
6.1 Influence des performances de freinage du train . . . . . 142

6.2 Influence de la vitesse du train . . . . . 142
6.3 Influence de la durée d'annonce et des 2/4 barrières . . . . . 144

**7 Optimisation du passage à niveau à deux ou quatre demi-barrières 147**
7.1 Importance d'un travail sur l'environnement routier . . . . . 149
7.2 Optimisation de la durée de descente des barrières . . . . . 150
7.3 Optimisation de la durée d'annonce avec maintien ou réduction du délai de clignotement avant baisse des barrières . . . . . 153
7.4 Pourquoi observe -t -on des « chicanes »? . . . . . 159
7.5 Optimisation « à la marge » des passages à niveau classiques . . . . . 163
7.6 D'autres pistes d'optimisation des PN : lutter contre la cécité d'inattention 165

**8 Utilisation du modèle simplifié : évaluer des innovations 173**
8.1 Passage à niveau « normalement fermé? » . . . . . 175
8.2 Retour du PN gardé par un robot . . . . . 180
8.3 Intégration « classique » d'un DOPN . . . . . 183
8.4 Estimation de l'efficacité des détecteurs d'obstacles . . . . . 189
8.5 Ergonomie de conduite en cas d'alarme : comment maximiser la réduction de risque sans obérer la régularité. . . . . 208

**9 Les extensions possibles du modèle générique d'accidentologie aux passages à niveau 215**
9.1 Extensions du modèle générique d'accidentologie aux PN . . . . . 216
9.2 Peut-on bâtir un modèle déductif d'accidentologie aux PN intégrant l'environnement routier? . . . . . 220

**10 Ébauche d'un modèle bayésien d'accidentologie individualisé au PN 227**
10.1 Introduction et explication de la démarche . . . . . 229
10.2 Modèle actuel du guide 021 de l'EPSF . . . . . 229
10.3 Enrichissement mutuel des modèles probabilistes individualisés . . . . . 231
10.4 Identification des facteurs de risques non inclus dans le modèle d'accidentologie individualisé . . . . . 236
10.5 Élaboration du modèle d'accidentologie individualisé . . . . . 238
10.6 Première esquisse de modèle individualisé d'accidentologie . . . . . 244

**11 Les synergies entre traitement de PN voisins 253**
11.1 Effet population . . . . . 253
11.2 Importance du traitement routier du PN . . . . . 259

**12 Conclusions et perspectives 263**
12.1 Des nouveaux outils pour comprendre, identifier et prédire l'accidentologie aux PN . . . . . 264
12.2 Questions résolues . . . . . 264
12.3 La nécessité d'une politique « globale » de sécurité routière . . . . . 266

12.4 Quels objectifs pour une politique réaliste de sécurisation des PN ? . . . . 268

**13 Annexes** **271**

13.1 Traduction d'extraits de l'ordonnance ministérielle japonaise sur les chemins de fer(version 2018) Articles sur les PN . . . . . 272

13.2 Traduction d'extraits des règlements ferroviaires japonais (version 2018) Articles sur les PN . . . . . 273

13.3 Extraits du retour d'expérience suédois sur les passages à niveau équipés de détection d'obstacles . . . . . 278

13.4 Extrait de «Kartläggning av plankorsningar» (Inventaire des passages a niveau) de TRV (2006) . . . . . 282

13.5 Analyse des rapports du BEA-TT à la lumière des enseignements de MORIPAN et du modèle . . . . . 284

13.6 Les PN comme carrefours . . . . . 317

**14 Bibliographie** **321**

**Bibliographie** **321**

# Table des figures


Fig. 1 Principaux constituants d'un passage à niveau français à quatre demi-barrières de type SAL 4 (Signalisation Automatique Lumineuse quatre barrières) . . . 28
Fig. 2 Principe d'un passage à niveau à deux demi-barrières à franchissement conditionnel (SAL 2 FC) (Source DB) : . . . . . 29
Fig. 3 Un exemple particulièrement sophistiqué de PN FC, avec un double signal (état de l'autotest du PN et absence d'obstacle). Habituellement, les PN FC ont plutôt un signal dont l'allumage indique l'autorisation de franchissement . 33
Fig. 4 Détails d'équipements d'un PN FC à quatre demi-barrières, wigwag et franchissement conditionnel (les deux conditions étant l'absence de détection par le détecteur d'obstacle et l'autotest réussi) (UK)(photo de O. Cazier) . . . . . 34
Fig. 5 Nombre d'accidents aux passages à niveau en 2022 en fonction de la vitesse maximale autorisée (VMA) en 2022 (graphe réalisé à partir des données de la base ONISR 2022) . . . . . 35
Fig. 6 Influence de la VMA routière sur la criticité (c.-à-d. produit de l'occurrence d'un accident par la gravité de ses conséquences) en 2022 (graphe réalisé à partir des données de la base de données ONISR 2022) . . . . . 35
Fig. 7 Gravité de l'accident à un passage à niveau en fonction du point de choc 36
Fig. 8 Influence des mois sur les accidents mortels . . . . . 37
Fig. 9 Nombre de victimes (gravité) des accidents aux passages à niveaux ONISR 2022 en fonction du mois . . . . . 38
Fig. 10 Accidents en fonction de l'ambiance d'éclairage (ecl : éclairage) source ONISR 2022 . . . . . 38
Fig. 11 Longueur et fréquence de franchissement des passages à niveau en France 39
Fig. 12 Fréquence du nombre de voies traversées par type de PN en France . . 40
Fig. 13 Distribution des largeurs de franchissement . . . . . 40
Fig. 14 Angle de franchissement par rapport à la perpendiculaire . . . . . 41
Fig. 15 Collisions en fonction du moment et du type de PN . . . . . 42
Fig. 16 Durée d'annonce sur les PN en France par type de PN et vitesse des trains 43
Fig. 17 Répartition et fréquences des trains selon le type de PN en France . . . 44
Fig. 18 Répartition et fréquences des véhicules selon les types de passages à niveau . . . . . 44
Fig. 19 Distribution des véhicules en échelle normale (en haut) et Log (en bas) . 45

Fig. 20 Distribution des moments (Normale en haut et échelle log en bas) . . . 46
Fig. 21 Espérance des variables « nombre de décès/accident » et nombre de blessés graves /accident en fonction de la vitesse maximale des trains . . . . . 47
Fig. 22 Espérance VS variance pour les décès et les blessés graves (BG) dans les accidents de passage à niveau avec ou sans véhicule en mode lourds en France 48
Fig. 23 Échantillonnage d'une centaine de PN SAL avec données d'insertion routière (seuls les PN à SAL ont été pris en compte) . . . . . 50

Fig. 24 Comportement du conducteur selon la vitesse au passage à niveau de type stop . . . . . 56
Fig. 25 Distribution des flux de passage après début du clignotement pour des PN à feux et barrières et pour des PN à feux seulement. Tony Radalj 2006 . . . 58
Fig. 26 Comportement des conducteurs allemands sur des PN à deux demi-barrières et des PN à feux sans barrières . . . . . 59
Fig. 27 Exemples de comportement mesurés sur MORIPAN par PN, en nombre de véhicules traversant le PN en fonction du temps écoulé depuis l'activation . 60
Fig. 28 De 1968 à 1980, la France a expérimenté, avec un certain succès, des détecteurs d'obstacles (RGCF 1975) . . . . . 64
Fig. 29 Taux d'accidents au Japon en fonction du flux de train avec et sans DOPN d'après le REX PN de 1997 . . . . . 67
Fig. 30 Extrait du REX de 1996 de JR EAST sur la sureté aux PN avec DOPN(Anandarao 1996) . . . . . 67
Fig. 31 Distribution du temps nécessaire pour redémarrer et s'échapper de la zone dangereuse. . . . . 70

Fig. 32 Comportement des conducteurs aux PN avec feux et barrières et à croix de Saint-André (O. Cazier) . . . . . 77
Fig. 33 Répartition de la vitesse des véhicules aux PN, pour PN avec vitesse maximale affichée 30 et 50 km/h (source MORIPAN) . . . . . 80
Fig. 34 Répartition de la vitesse des véhicules mesurée par l'ONISR sur les routes urbaines à vitesse maximale affichée 50 km/h . . . . . 80
Fig. 35 Adapté d'«étude des effets de l'environnement routier sur le choix de l'environnement» (TÖRÖK 2011) . . . . . 82
Fig. 36 Répartition des distances au PN au moment de l'activation du cycle pour les 1e, 2e, 3e, 4e, 5e et 6e véhicules . . . . . 83
Fig. 37 Temps de réaction d'un conducteur en cas d'activation de PN . . . . . 84
Fig. 38 Données de temps de réaction du conducteur (perception du signal + mouvement pied) . . . . . 84
Fig. 39 Décélérations moyennes et maximales de quelques véhicules courants 86
Fig. 40 Vitesse routière observée pour les PN à VMA 30 de MORIPAN . . . . . 87
Fig. 41 Vitesse routière observée, pour les PN à VMA 50 de MORIPAN et exemple de tirage issu d'une simulation de MC . . . . . 87

Fig. 42 Exemple de simulation du comportement des conducteurs routiers aux PN : contribution au franchissement des véhicules successifs à VMA 50km/h et visibilité 100m pour un flux de 200v/h. . . . . 90
Fig. 43 Modèle de comportement des conducteurs aux PN (simulation du respect du code de la route) . . . . . 91
Fig. 44 Réponse des conducteurs avec 5 s et 7 s de clignotement Simulation issue du modèle de conducteur avec une distribution gaussienne de T arrêt cible 92
Fig. 45 Distribution du « temps cible d'arrêt » pour les durées de clignotement de 5 s et 7 s compatible avec les observations de Radalj et de Liang . . . . . 93
Fig. 46 Influence du flux de véhicules sur les passages tardifs pour des flux entre 200 et 2000 v/h et une VMA de 30 km/h, avec une bonne visibilité - Modèle de comportement des conducteurs aux PN . . . . . 95
Fig. 47 Influence du temps de clignotement sur les passages très tardifs et pour des flux de véhicules de 20 à 2000 v/h, VMA 30 et bonne visibilité. Modèle de comportement des conducteurs aux PN . . . . . 95
Fig. 48 Influence de la visibilité sur les passages tardifs – modèle de comportement des conducteurs aux PN . . . . . 97
Fig. 49 Influence de la visibilité sur le taux d'infraction de +7 s et +14s, AHB français, retard de 25s, clignotement de 7s, 200 c/h, conducteur alerté . . . . . 99
Fig. 50 Influence de la visibilité sur le taux d'infraction de +7 s et +14s, AHB français, retard de 25s, clignotement de 7s, 200 c/h, conducteur distrait . . . . . 99

Fig. 51 Densité de probabilité de redémarrage d'un véhicule immobilisée dans la zone dangereuse . . . . . 106
Fig. 52 Variation quotidienne des flux de trains et de véhicules, prise dans le modèle préliminaire d'accidentologie aux PN en fonction des heures de la journée et de la fréquentation horaire . . . . . 107
Fig. 53 Une des premières simulations du comportement de la population des PN français, avec le modèle de MC préliminaire d'accidentologie aux PN, donnant le facteur de risque de collision en fonction du moment VT et du type de PN sur des populations « représentatives » de PN du réseau SNCF. . . . . 107
Fig. 54 La distribution de probabilité de franchissement utilisée par le modèle pour un clignotement de 7s . . . . . 112
Fig. 55 Densité de probabilité associée au mécanisme d'esquive . . . . . 113
Fig. 56 Répartition de $T(h)$ et $V(h)$ utilisée dans le modèle générique d'accidentologie aux PN issu des essais de MORIPAN (2015) . . . . . 114
Fig. 57 Évaluation directe du taux de conducteur distraits . . . . . 116
Fig. 58 Jeu d'essai de PN SAL 2 utilisé pour le recalage du modèle générique d'accidentologie aux PN . . . . . 117
Fig. 59 Accidentologie issue du REX SNCF pour le jeu d'essai des PN SAL 2 dans le modèle générique d'accidentologie aux PN . . . . . 118

Fig. 60 Évaluation du ratio Cd/Ci en fonction du nombre de trains obtenue par recalage du modèle générique d'accidentologie aux PN - (hypothèse $H_1$) . . . . 118
Fig. 61 Évaluation du rapport Cd/Ce en fonction du Moment obtenue par recalage du modèle générique d'accidentologie aux PN (hypothèse $H_2$ retenue) . . . 119
Fig. 62 Driver crash risk factors and prevalence evaluation using naturalistic driving data . . . . . 121
Fig. 63 Représentation des déciles extrêmes de $T$ et $V$ pour les SAL 2 . . . . . 123
Fig. 64 Répartition des durées d'annonces pour les deux échantillons extrêmes de SAL 2 . . . . . 124
Fig. 65 Effet Stott sur les deux échantillons extrêmes de SAL 2 – Data MORIPAN + simulation modèle générique d'accidentologie aux PN. . . . . 124
Fig. 66 Moyenne des collisions vs espérance évaluée par le modèle générique d'accidentologie aux PN pour des échantillons extrêmes de SAL 2 . . . . . 125
Fig. 67 Comparaison entre le REX accidentologie et le modèle générique d'accidentologie aux PN, en fonction du « moment » SAL 2 et SAL 4 . . . . . 126
Fig. 68 Qualité de la corrélation entre le REX d'accidentologie 1993/2013 et le modèle générique d'accidentologie pour les PN SAL 2 et SAL 4 . . . . . 127
Fig. 69 Le moment est-il le bon paramètre ? . . . . . 128
Fig. 70 Efficacité de réduction de l'accidentologie du SAL 4 par rapport au SAL 2 de référence en fonction du flux de véhicules . . . . . 128
Fig. 71 Effet d'un remplacement d'un SAL 2 25 s 7 s par un SAL 4 35 s 7s . . . . 130
Fig. 72 Efficacité du SAL 4 35s par rapport au SAL 2 25s en fonction du flux de véhicules . . . . . 131
Fig. 73 Efficacité de 100% SAL 4 35s en substitution de la population actuelle . 131
Fig. 74 Passage à niveau à deux barrières, sur une ligne secondaire (ligne de Gotemba, JRE) équipé de feux, deux barrières et d'un détecteur d'obstacles à faisceaux MW entrecroisés . . . . . 134
Fig. 75 Détecteur d'obstacles à faisceaux MW entrecroisés, installé sur PN à deux barrières et conducteur inconscient manœuvrant sur le PN. . . . . 135
Fig. 76 Détecteur d'obstacle de dernière génération (Lidar 3D IHI, sur la ligne du Tokkaido «classique», entre Tokyo et Yokohama) . . . . . 136
Fig. 77 PN de type SAL 4 équipé de détecteurs d'obstacles de dernière génération, ligne Tokkaido classique, entre Tokyo et Yokohama, 2015 . . . . . 137
Fig. 78 Séquence d'un passage à niveau japonais en 1995 (Andranao et Maitland, 1998) . . . . . 137
Fig. 79 Installation typique de faisceaux détecteurs sur une ligne à double voie, Andranao et Maitland, 1998 . . . . . 138
Fig. 80 Évaluation de l'efficacité des détecteurs d'obstacles au Japon et comparaison avec le REX de 1997 . . . . . 138
Fig. 81 Taux de collision annuel en fonction du moment Pour 50 t/j, ligne V140, Aut 140 et MA 100 . . . . . 143

Fig. 82 Taux de collision annuel (log log) pour Aut 140 et MA 100 sur SAL 2 classique, Ligne V140 . . . . . 143
Fig. 83 Les performances du train interviennent peu dans le risque de collision (pas du tout dans le modèle générique) sauf si la vitesse inférieure du train modifie la durée nominale d'annonce . . . . . 144
Fig. 84 Risque de collision annuel pour les différents types de train qu'on peut rencontrer sur une ligne V 160 et comparaison L 140 . . . . . 144
Fig. 85 Influence de la durée d'annonce sur le taux de collision . . . . . 145
Fig. 86 Écart entre SAL 2 25s 7s et SAL 4 35s 7s . . . . . 145

Fig. 87 Comportement des conducteurs au feu jaune . . . . . 150
Fig. 88 Effet d'un raccourcissement de la durée de clignotement à 5s au lieu de 7s à annonce constante de 25s . . . . . 152
Fig. 89 Impact d'une réduction à 5s du clignotement . . . . . 152
Fig. 90 Comparaison SAL 2 «classique» français et AHB «européen» . . . . . 153
Fig. 91 Évolution du risque de collision sur ligne V140 parcourue par AUT 140 1300 et MA 100 en fonction du flux de véhicules pour des durées d'annonces de 21,30, 35 et 45s par rapport au SAL 2 de référence 25 7s. Modèle générique d'accidentologie aux PN . . . . . 154
Fig. 92 Influence d'une optimisation de la durée d'annonce et du clignotement sur l'accidentologie des PN du RFN . . . . . 155
Fig. 93 Impact global sur l'accidentologie du RFN d'une modification de l'annonce 156
Fig. 94 Impact de l'interdiction des délais d'annonce inférieurs à 25s sur les PN actuels du réseau SNCF . . . . . 157
Fig. 95 La tolérance à 21s est à utiliser avec prudence quand le flux de véhicules dépasse quelques centaines. Modèle générique d'accidentologie aux PN . . 158
Fig. 96 Si l'on réduit à la fois le pré clignotement de 7 à 5s et l'annonce de 25 à 21s 158
Fig. 97 Ratio $A_d/A_i$ entre accidents dus à la cécité d'inattention et à l'imprudence, sur une ligne VL 140, des trains AUT 140 ou MA 100 . . . . . 162
Fig. 98 Probabilité conditionnelle du début d'initialisation d'un accident à un PN 164
Fig. 99 Driver behaviour at rail level crossings : responses to flashing lights, traffic signals and stop signs in simulated rural driving . . . . . 167
Fig. 100 Arbre de Noël » de feux clignotants sur passage à niveau, ligne (LFDT) CHUO central, réseau de JR-CENTRAL Tokai . . . . . 169
Fig. 101 Barrières PN. Réseau ferroviaire suédois . . . . . 170
Fig. 102 Réseau ferroviaire japonais. Mieux que le PN à quatre demi-barrières...le PN à 6 demi-barrières . . . . . 171

Fig. 103 Expérimentation d'un passage à niveau « normalement fermé » à Hammerby, Suède (Source TRV Ole Mornell) . . . . . 175
Fig. 104 Réseau ferroviaire suédois - PN Normalement fermé vu de la voie, avec sa configuration « définitive » . . . . . 176

Fig. 105 Passage à niveau «normalement fermé» développé dans le cadre du projet ALEX par Trafikverket . . . 177
Fig. 106 Évaluation de la réduction du risque entre un ON normalement fermé et un SAL2 de référence, AUT 140 300 sur ligne 140 pour 1 et 100trains/j . . . 179
Fig. 107 Évaluation du risque absolu de collision entre un PN «normalement fermé» et un SAL 2 classique, en fonction du moment et moins de 100 v/j, Aut 140 300 et MA 100 sur ligne 140 . . . 179
Fig. 108 Efficacité du PN normalement fermé sur la sous-population de PN « éligibles » (moins de 100 v/jour) . . . 180
Fig. 109 En pratique, sur une ligne «réelle», l'efficacité d'un NFOD sur un PN à croix de Saint-André est très proche de celle de la suppression . . . 181
Fig. 110 Répartition des types de protection sur les passages à niveau du réseau de la DB . . . 182
Fig. 111 Répartition des collisions sur les passages à niveau de la DB . . . 183
Fig. 112 Un passage à niveau suédois sur ligne à V > 160, équipé d'un détecteur d'obstacles . . . 184
Fig. 113 Exemple de PN à demi-barrières à franchissement conditionnel (source EBA) . . . 185
Fig. 114 Signal à double aspect : Croix jaune et « agrès spécial » pentagonal sur une LFDT privée (3e réseau) . . . 186
Fig. 115 D'autres réseaux, surtout sur des LFDT, utilisent la torche « pentagonale » pour indiquer le dysfonctionnement du PN . . . 187
Fig. 116 Agrès spécial de type torche – Japon : ligne Tokaïdo classique . . . 187
Fig. 117 Réseau ferroviaire italien : signaux de block à overlay utilisés pour protéger les PN équipés de détecteurs . . . 190
Fig. 118 Effet d'une marche prudente à 30km/h sur le risque de collision sur ligne 140km/h à 30 trains/j pour des autorails 140 1300 et des MA 100 . . . 191
Fig. 119 Estimation de l'efficacité des DOPN classiques sur une ligne L 140 . . . 192
Fig. 120 Estimation de l'efficacité d'un DOPN sur ligne V 160 . . . 193
Fig. 121 Estimation de l'efficacité d'un DOPN sur une ligne V100 pour AUT 140 1300 et MA 100 . . . 193
Fig. 122 Sensibilité de l'efficacité du DOPN (par rapport au SAL 2 25 7 «standard») en fonction de l'accélération du Matériel pour un temps d'établissement du freinage de 3s et des accélérations entre 0,5 et 2,5m/s . . . 194
Fig. 123 Sensibilité de l'efficacité du DOPN à la durée de réaction du mécanicien et d'établissement du freinage sur ligne à 140, train à V140, R entre 1 et 10s, A 0,7 m/s2 . . . 195
Fig. 124 Comparaison efficacité DOPN et SAL 4 pour un train de voyageurs type AUT 140 1300 . . . 196
Fig. 125 Comparaison efficacité DOPN SAL 4 pour MA100 . . . 196

Fig. 126 Efficacité des DOPN sur les centiles de moment avec V supérieur à 100 sur ligne à 140km/h avec un échantillon représentatif de PN et des trains AUT 140 1300 et MA100 . . . . . 197
Fig. 127 Impact des détecteurs sur le taux de collision sur ligne V140 sur échantillon représentatif de PN français . . . . . 198
Fig. 128 Efficacité des PN NFOD pour les centiles de flux de véhicules inférieurs à 100 v/j . . . . . 200
Fig. 129 PN EGDM sur corridor Chicago Saint-Louis en cours de fermeture (photo prise lors des essais du train » à grande vitesse » (125 mph) d'Amtrak, d'où la présence de spectateurs). . . . . 202
Fig. 130 Efficacité des SAL 4 et des DOPN EGDM sur ligne V140 parcourue par des trains type MA 100 en référence par rapport aux SAL 2 25 7 . . . . . 204
Fig. 131 Efficacité des SAL 4 et des DOPN EGDM sur ligne V140 pour des autorails référence SAL 2 25 7 . . . . . 204
Fig. 132 Efficacité des PN EGDM sur ligne 140km/h avec un échantillon représentatif de PN français pourdes trains AUT140 1300 et MA100 . . . . . 206
Fig. 133 Simulation de taux de collision aux PN EGDM comparé à un PN classique sur réseau ferroviaire français . . . . . 207
Fig. 134 Simulation de taux de collision comparé entre PN à SAL classiques existants et PN «innovants» . . . . . 207
Fig. 135 Influence condition de vitesse sur Aut 140 1300 et, ligne V140 . . . . . 210
Fig. 136 Influence de la condition de vitesse sur MA100 et ligne V140, en fonction du flux de véhicule journalier pour des trains de fret . . . . . 210
Fig. 137 Répartition sur le RFN du ratio Accidents de distraction/ accidents imprudence pour des PN EGDM . . . . . 211

Fig. 138 Proportion de véhicules franchissant le PN en fonction de la distance train/PN 217
Fig. 139 Comparaison imprudence distraction entre PN à SAL et PN à croix de Saint-André . . . . . 218
Fig. 140 Comparaison mécanismes d'accidents en fonction du type de PN . . . . 219
Fig. 141 Influence de la vitesse du train sur l'accidentologie aux PN en fonction du flux de véhicules et de la vitesse de la ligne . . . . . 220
Fig. 142 Figure et paramètres utilisés dans la thèse de Eric Shöne « Une méthode d'évaluation de la sécurité des passages à niveau basée sur les risques » . . 224

Fig. 143 Profil des flux de véhicules moyens et des flux de trains moyens des classes « homogènes » de moment utilisées pour la simulation et l'analyse du REX d'accidentologie aux PN . . . . . 232
Fig. 144 Représentation de l'espérance évaluée sur les classes de moment de la figure 143 (données MORIPAN) – analyse du REX d'accidentologie aux PN . . 233
Fig. 145 Comparaison de l'estimateur issu du modèle générique d'accidentologie aux PN avec celui issu du retour d'expérience MORIPAN . . . . . 233

Fig. 146 vérification du respect des critères d'une loi binomiale négative pour l'estimateur du modèle générique d'accidentologie aux PN par rapport à la variance du REX MORIPAN . . . . . 234
Fig. 147 Distribution du risque moyen sur l'ensemble des PN à SAL, issue du modèle générique et de l'interprétation du REX 1993 -2012 de MORIPAN . . . . 235
Fig. 148 PN « en S » . . . . . 238
Fig. 149 Configuration complexe de type 2 et type 3 . . . . . 240
Fig. 150 PN 11 de Saint-Medard-sur-Ille . . . . . 241
Fig. 151 Configurations complexes de types 2 à 5 . . . . . 242
Fig. 152 Comparaison de la note de risque modélisée a priori vs la distribution du risque réel évalué, portant sur un échantillon d'une centaine de PN représentatifs du réseau SNCF . . . . . 245

Fig. 153 Répartition des PN à faible flux de véhicules sur le RFN . . . . . 254
Fig. 154 Répartition des accidents en fonction du flux de véhicules sur le réseau ferroviaire français . . . . . 255
Fig. 155 Solutions possibles de sécurisation d'un PN pris «isolément» . . . . . 256
Fig. 156 Déviation d'un PN 1 V sur un autre PN à faible flux de véhicules ou un ouvrage...et comparaison avec les alternatives . . . . . 257
Fig. 157 Traitement d'un PN 750v/j : comparaison entre suppression, détournement sur PN voisin, et alternatives . . . . . 258
Fig. 158 PN à 3000 v/j dans son environnement : comparaison, efficacité de la suppression du PN, déviation sur ouvrage, déviation sur PN avec ou sans DOPN, - ligne V140 30 trains/j – trains AUT 140 1300 . . . . . 258
Fig. 159 Impact de l'environnement routier et de l'hétérogénéité des trains . . . 260
Fig. 160 Efficacité croisée d'un PN « Normalement fermé » et de l'environnement Urbain/ référence SAL 2 Moyen 25 7 . . . . . 261
Fig. 161 Influence de la configuration routière sur le risque d'accident relatif par rapport au risque moyen (ref SAL 2 25s BD 7s) pour un PN à détection d'obstacle et différentes configurations de risques environnementaux . . . . . 261

Fig. 162 Arbre des causes accident de Bizanos (source BEA-TT) . . . . . 286
Fig. 163 Passages alternatifs (source BEA-TT et mairie d'Hericy) . . . . . 287
Fig. 164 Environnement du PN de Rumigny (source BEA-TT) . . . . . 289
Fig. 165 Arbre des causes accident de Rumigny (source BEA-TT) . . . . . 290
Fig. 166 Arbre des causes de l'accident de Boutricourt (source BEA-TT) . . . . . 292
Fig. 167 Carte de l'accident (source BEA-TT) . . . . . 293
Fig. 168 Arbre des causes accident d'Avenay . . . . . 294
Fig. 169 Accident de Roissy-en-Brie (source BEA-TT) . . . . . 295
Fig. 170 Arbre des causes accident Roissy-en-Brie 2019 (source BEA-TT) . . . . . 296
Fig. 171 Configuration des lieux de l'accident de Saint-Étienne . . . . . 297
Fig. 172 Arbres des causes de la « chicane » de l'accident de PN de Saint-Étienne 298
Fig. 173 Accident de Pavilly (avril 2019) . . . . . 299

Fig. 174 Accident de Coulogne (avril 2018) . . . . . 299
Fig. 175 Accident de Coulogne (photos PN) . . . . . 300
Fig. 176 Accident de Coulogne (photo travaux) . . . . . 301
Fig. 177 PN Auxerre . . . . . 302
Fig. 178 PN Auxerre – équipements . . . . . 302
Fig. 179 PN Auxerre (Bateau) . . . . . 304
Fig. 180 PN Nangis (Gare) . . . . . 306
Fig. 181 PN Nangis (Carrefour) . . . . . 307
Fig. 182 PN de Montauban . . . . . 309
Fig. 183 PN au Japon sur la Chuo Central avec bordures de trottoir . . . . . 312
Fig. 184 PN de Marseille l'Estaque- photo . . . . . 313
Fig. 185 PN Marseille l'Estaque (panneaux) . . . . . 314
Fig. 186 Schéma PN Nevers . . . . . 316
Fig. 187 PN La Rocher en Brenil (schéma) . . . . . 317

# Liste des tableaux


Tab. 1 Passages à niveaux utilisés dans cette thèse avec descriptions . . . . . 29
Tab. 2 Classement et nombre des passages à niveau en France (SNCF Réseau 2024) 32
Tab. 3 Comparaison des décès sur la route et des pourcentage de décès au niveau des passages à niveau dans quatre pays . . . . . 33
Tab. 4 Facteurs de risques associés à la géométrie du PN . . . . . 50
Tab. 5 Facteurs de risques causés *uniquement* par la géométrie . . . . . 50
Tab. 6 Carrefours à proximité des PN (Calcul O.Cazier d'après échantillon) . . 51
Tab. 7 Performances de perception d'un train à l'approche . . . . . 56
Tab. 8 Causes (distraction extérieure ou autre) d'accident routier d'après Dingus . . . . . 122
Tab. 9 Critère d'équipement des passages à niveau sur le réseau DB . . . . . 182
Tab. 10 Distances de visibilité exigées dans l'instruction ministérielle sur les PN 217
Tab. 11 Distances de visibilité retenues pour le modèle pour les PN à croix de Saint-André . . . . . 218
Tab. 12 Extrait de Dr Ing Hantschel Sebastian et al (2016) Sicherheit an Bahnübergänge, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. Forschungsbericht Nr. 44 . . . . . 222
Tab. 13 Méthode d'évaluation de la sécurité des passages à niveau basée sur les risques . . . . . 225
Tab. 14 Inventaire des configurations accidentogènes d'environnement routier du PN . . . . . 240
Tab. 15 The role of various categories of changes in the inducement of change blindness. . . . . 248

## Table des abréviations

| ABRÉVIATIONS | DÉFINITIONS ET EXPLICATIONS |
|---|---|
| ARMEN | Base de données SNCF incluant notamment les accidents de PN |
| **Banverket** | Gestionnaire du réseau ferroviaire suédois (Après le 1er avril 2010 fusionné avec Trafikverket) |
| **BEA-TT** | Bureau Enquête Investigation Transports Terrestres |
| **BG** | Blessés graves |
| **Catégories de circulation** | En France, classification des types de train en fonction de leurs performances, notamment de freinage. On peut donner comme exemple :<br>MA100 (train de marchandises classique à Vmax 100 km/h),<br>AUT 140 1300 (autorail à vitesse maximale 140 km/h, distance de freinage de service à vmax 1300m..) |
| **Cécité d'inattention, distraction et imprudence** | L'hypothèse de base de cette thèse est qu'il y a deux mécanismes d'accident, un mécanisme dont la fréquence n'est pas fonction du temps écoulé depuis l'activation (mais qui peut dépendre du nombre de trains, du nombre de véhicules, de la configuration routière du PN) et un second mécanisme, qui lui va simplement dépendre du flux instantané de véhicules (donc du temps écoulé depuis l'activation)<br>Cela étant dit, il reste à interpréter les deux mécanismes :<br>Comme le 1er ne dépend pas du temps écoulé depuis l'activation, il correspond à une « non » réponse aux stimuli des feux, barrières du PN. Et comme il décroit au contraire très fortement du « moment », cad de la probabilité que des trains et des véhicules se rencontrent au PN, on a un mécanisme d'accident où le conducteur n'a pas de réaction au stimuli PN, ou une réaction très tardive, qui est de plus en plus fréquent si le conducteur ne rencontre pas ou rarement de trains aux PN : D'où mon interprétation « distraction » (ou plus exactement « cécité d'inattention / inattentional blindness ») au sens large.<br><br>L'autre mécanisme est lié au temps écoulé depuis l'activation, donc à un conducteur conscient du risque PN. De plus, les PN sont des carrefours conçus par des cheminots : ils ont une marge de sécurité importante, et pour qu'il y ait accident, il faut qu'il se produise d'autres « problèmes », une chaînechaine d'événements qui mène à l'accident : comme le montre la 1e simulation de Monte-Carlo du PN, en l'absence de chaînechaine d'événements, le conducteur, même tirant un peu sur la ficelle n'a aucun risque. |

| | |
|---|---|
| (suite) | D'où l'interprétation « erreur de Jugement/imprudence » : c'est le cas du conducteur qui s'engage sur le PN, parfois un peu tard, qui dérape sur le platelage, qui cale, tombe en panne, s'engage lorsqu'il y a une remontée de file… et ne réussissent pas à esquiver à temps.<br>La cécité d'inattention (traduction la plus fréquente de l'expression anglaise inattentional blindness) est le fait d'échouer à remarquer un stimulus pourtant parfaitement visible. Ce stimulus est généralement inattendu, mais il devrait cependant être perçu. Le phénomène se produit typiquement parce que trop d'éléments mobilisent déjà l'attention de l'observateur. De nombreuses expériences ont permis de mettre en évidence ce phénomène1, qui a d'importantes conséquences pratiques, en particulier dans le domaine de la sécurité routière. (Rensink 2009). |
| Cerema | Centre d'études et d'expertise sur les risques, la mobilité et l'aménagement |
| Dopn | Détecteur d'obstacles au passage à niveau |
| EGDM | Exit gate dynamic mode : PN à 4 demi-barrières dont<br>La durée d'annonce est voisine ou identique à celle d'un PN à 2 demi-barrières<br>Les barrières de sortie sont commandées par un détecteur d'obstacle<br>Les 4 barrières se ferment simultanément en l'absence d'obstacle détecté<br>En cas d'obstacle détecté, la fermeture des barrières de sortie est «suspendue» tant que l'obstacle n'a pas évacué<br>- En cas d'avarie du détecteur, le mode de repli est celui du PN à 2 demi-Barrières |
| **Effet Stott** | Lorsque la durée d'annonce et le flux de véhicule augmentent, la probabilité q'une queue de véhicules, à un instant donné, augmente et cette queue empêche la pénétration accidentelle d'un véhicule dans le passage à niveau (Stott 1987) |
| EGDM | Type de passage à niveau à 4 demi-barrières utilisé aux USA sur le corridor Chicago/St Louis, utilisant un Dopn pour commander les barrières de sorties |
| Epsf | Établissement public de sécurité ferroviaire |
| **Esquiveou mécanisme d'esquive »** | Lorsqu'un véhicule ou un mode doux pénètre dans la zone dangereuse du passage à niveau, et qu'il se rend compte du danger, il va essayer de se mettre en sécurité (sur la voie adjacente au train arrivant, en cassant la barrière, etc ». Cette esquive peut prendre quelques secondes, notamment si l'incidenté s'affole. Ce mécanisme est le moins bien connu des éléments conduisant, ou non, à l'accident… ce qui est dommage, car il est essentiel. |
| **FU, FS** | Freinage d'urgence, freinage de service |

| | |
|---|---|
| **JNR** | Japanese National Railways (Avant 1987), après 1987 JRE (JR East), JR Central, etc |
| **LC ou LX** | Level Crossing /passage à Niveau |
| **LCOD/DOPN** | Level Crossing with Obstacle Detector / Détecteur d'Obstacle pour Passage à Niveau |
| **Lois de probabilité (Poisson, NB)** | Une « loi de probabilité » est une fonction de $\mathbb{R}$ou $\mathbb{N}$dans $]0,1[$ qui respecte les 3 axiomes de Kolmogorov.<br>Les lois utilisées dans la thèse sont<br>— Poisson : Pour $k \in (0,1,2,3\dots)$ et $\lambda > 0$, $(X=k) = \frac{\lambda^k \times e^{-\lambda}}{k!}$<br>— Gamma : $P(X=x) = \frac{x^{k-1}e^{\frac{-x}{\theta}}}{\Gamma(k)\theta^k}$<br>et $\Gamma(x) = \int_0^\infty u^{x-1}e^{-u}du$ qui est une généralisation de la factorielle $(\Gamma(k+1) = k!)$<br>— Polya (aka loi Négative binomiale ou NB) : $P(X=k) = \frac{p^r q^k}{k!\Gamma(r)} \times \Gamma(k+r)$<br>et $k\in(0,1,2,3\dots)$, $r>0$ et $p \in [0,1]$, $r$ et $p$ étant les paramètres de la loi de Polya.<br>— Exponentielle : $P(X=x) = \lambda e^{-x}$<br>Ces lois peuvent aussi être définies par leur « moments » (Espérance, Variance, Asymétrie, Kurtosis...) |
| **Modèles** | Dans cette thèse, le mot « modèle » peut désigner :<br>- soit des modèles de régression statistiques, dont l'objectif est, à partir d'un jeu de données issues du retour d'expérience et de variables « explicatives », de définir une hypothèse de loi de probabilité et un estimateur de l'espérance de la variable aléatoire en fonction du jeu de variables explicatives.<br>- dans cette thèse, on utilise essentiellement des modèles de Cox, soit un modèle prédictif qui va évaluer, en fonction de lois physiques, la valeur de la variable recherchée. Ce type de modèle peut aussi prévoir un phénomène statistique s'il est adapté : modèle classique dans les cas simples, ou modèle de Monte-Carlo. Les deux sont utilisés dans la présente thèse. |
| **Modèle individualisé** | Les modèles de Cox (ou modèles à risques proportionnels) sont une classe particulière de modèles de régression statistiques, dans lesquels l'estimateur de risque peut se mettre sous la forme $\lambda(t) = F(t)G(Z)$ avec t le temps et Z un « vecteur de composantes zi » représentant les différents paramètres intervenant dans l'estimateur de risque |

| | |
|---|---|
| **Modèles de Monte-Carlo** | La simulation de Monte-Carlo, également connue sous le nom de méthode de Monte-Carlo ou de simulation de probabilités multiples, est une technique mathématique utilisée pour estimer les résultats possibles d'un événement incertain. La méthode de Monte-Carlo a été inventée par John von Neumann et Stanislaw Ulam pendant la Seconde Guerre mondiale, afin d'améliorer la prise de décision dans des conditions incertaines. Son nom fait référence au casino bien connu de la ville de Monaco, car l'élément de hasard est au cœur de l'approche de modélisation, comme dans un jeu de roulette. (Définition IBM) |
| **Moment du passage à niveau** | C'est le produit du nombre de trains/jour et du nombre de véhicules/-jour. La probabilité d'une rencontre véhicule/PN activé est directement proportionnelle au moment et à la durée d'annonce. |
| **MORIPAN** | Le projet de recherche « MORIPAN » (MOdèle de RIsque au PAssage à Niveau) a permis de confirmer quelques-unes des idées habituellement admises en matière d'accidents aux passages à niveau (PN), mais aussi d'infirmer un certain nombre d'idées reçues. Il s'agit d'un projet collaboratif associant l'Institut de Recherche Technologique (IRT) RAILENIUM, SNCF Réseau et l'IFSTTAR (maintenant Université Gustave Eiffel), dont l'objectif principal est de comprendre et de modéliser le risque de collision aux passages à niveau.. Les recherches ont porté sur trois aspects principaux : l'élaboration d'un modèle statistique global d'accidents aux PN, l'instrumentation d'une dizaine de passages à niveau et la mesure du comportement des conducteurs routiers (vitesses de franchissement, taux de passage pendant le cycle de fermeture, passages en chicane...), le développement d'un modèle bayésien d'accidents au PN |
| ONISR | Office National Interministériel de la Sécurité Routière (France) |
| **PN** | Passage à niveau |
| **PN SAL 2** | PN à signalisation lumineuse et 2 demi-barrières |
| **PN SAL 4** | PN à signalisation lumineuse et 4 demi-barrières |
| **PN à X** | PN à croix de Saint-André |
| **PN à franchissement conditionnel** | PN où le trafic ferroviaire est prioritaire, mais qui ne peut être franchi par le train que si une condition technique préalable est remplie. Par exemple, un PN franchissable en « marche à vue » et à franchissement conditionnel (la condition est que le conducteur du train ait vu qu'il n'y a pas d'obstacle). Un PN à rétention d'annonce, protégé par un carré, est aussi à franchissement conditionnel (la condition est l'autorisation, en général par un signal carré, de repartir après avoir desservi la gare proche) et les PN à détecteurs d'obstacles sont, en général, à franchissement conditionnel (absence d'obstacle signalée au conducteur par un signal ou un signal spécial de type « torche ») |
| **REX** | Retour d'expérience |

| | |
|---|---|
| **TER** | Transport express régional |
| **TMD** | Transport de matières dangereuses |
| **Trafikverket (TRV)** | Gestionnaire des infrastructures de transport suédois (après 2010) |
| VMA | Vitesse maximale autorisée (routière) : celle des panneaux de limitation du bord des routes |
| **VUTR** | Voie unique à trafic restreint : ligne secondaire à trafic faible, à vitesse limitée (souvent 30 km/h ou marche à vue) |

# Chapitre 1

# Introduction

Vis-à-vis des accidents de passage à niveau, plusieurs questions restent sans réponse :

- Pourquoi la dépendance du risque d'accident aux passages à niveau (PN) en fonction de la « probabilité de rencontre » (le moment) n'est pas linéaire ?
- Pourquoi croit-on que les accidents aux PN sont essentiellement dus à l'imprudence, alors que les accidents de PN les plus spectaculaires (Millas, Port Sainte Foy, etc.) [1] sont plutôt de type « looked but not seen », liés à la distraction, à la cécité d'inattention ?
- Pourquoi la dangerosité des SAL 4 semble identique à celle des SAL 2 à petit moment, et significativement plus faible à fort moment ?
- Pourquoi le comportement « mesuré » des conducteurs routiers à un PN a l'air très homogène alors que l'accidentologie est très différente entre deux PN de moments « identiques » ?

À l'heure actuelle, aucune de ces questions ne fait consensus : depuis que le chemin de fer existe, les PN posent un problème : celui de l'interface entre un monde ultra sécurisé et organisé du ferroviaire (moins de un décès par an selon les statistiques de la SNCF) et le monde individualiste, anarchique et dangereux (3 000 morts par an selon l'ONISR) de la route. Vis-à-vis des accidents de PN, dont on verra qu'ils sont essentiellement de type routier, le monde ferroviaire est désarmé et le monde routier n'est guère motivé : 30 morts par an, chaque mort évité coûtant en de l'ordre de 200 000  000 à 1 000 000 000 € [2], alors que beaucoup de morts routiers pourraient être évités gratuitement.

L'objectif de cette thèse est essentiellement de :

1. L'accident de Millas est une collision survenue le 14 décembre 2017, sur un passage à niveau de la commune de Millas entre un autocar transportant des collégiens et une rame automotrice TER, qui assure la liaison entre les gares de Villefranche – Vernet-les-Bains et de Perpignan.
L'accident de Port-Sainte-Foy est un accident survenu au passage à niveau n°395 dans la commune de Port-Sainte-Foy-et-Ponchapt en Dordogne le 8 septembre 1997 qui fit 13 morts et 43 blessés, dont 10 gravement brûlés. Plus grave accident de ce type en France, il est dû à la collision entre un autorail de type X 2100 et un camion-citerne chargé d' hydrocarbures.

2. Du moins si l'on vise la suppression de PN « préoccupants », situés en zone urbaine dense et que l'on supprime par des ouvrages coutants entre 10 et 20 M€ pour une espérance de décès entre 0,01 et 0,06 par an

— Comprendre ce qui se passe à un passage à niveau.
— Identifier quels sont les mécanismes d'accident, s'ils sont identiques pour tous les PN ou s'ils sont significativement différents en fonction de la fréquentation, de la configuration routière.
— Développer un modèle « prédictif » des accidents aux PN.

Jusqu'à présent, l'approche de modélisation des accidents de PN, à l'exception de (Stott 1987), était essentiellement « bottom up » et basée sur le retour d'expérience, sur l'établissement de modèles de régression, sans interprétation de ces régressions en termes de mécanismes d'accidents ou de causalité, à de rares exceptions près (Ghazel 2010).

Dans cette thèse, une démarche plus complexe a été adoptée, basée sur des allers/ retours entre une démarche théorique (inspiré par (Stott 1987) ), et le retour d'expérience (REX), et montrer que ces deux approches s'enrichissent mutuellement, l'approche par un modèle prédictif donnant des outils pour analyser le REX ; et cette nouvelle analyse du REX permettant, en retour, d'améliorer les modèles prédictifs.

Mais disposer d'un modèle prédictif a aussi un autre intérêt majeur : il peut permettre, dans certaines limites, de créer des jumeaux numériques des PN et d'expérimenter ceux-ci, de voir l'intérêt (ou non) de technologies ou de types de PN non utilisées en France, comme les détecteurs d'obstacles, ou d'imaginer l'effet de nouveaux concepts encore à inventer.

Car l'une des raisons du manque de progrès en sécurité des PN (outre le coût excessif du mort évité comparé au mort routier moyen) est que l'approche empirique de la sécurité aux PN est quasiment impossible : avec un mort par siècle en moyenne par PN, plusieurs milliers d'années d'observations seraient nécessaires pour valider l'efficacité d'un système, et toutes les approches basées sur l'expérience de l'efficacité d'un système ou d'une méthode relèvent davantage de l'acte de Foi que de la Science : un modèle numérique, même imparfait, sera toujours plus performant qu'un doigt mouillé.

Au-delà de cette thèse, les simulations numériques pourraient permettre de dégager des pistes qui ramèneraient le coût du mort routier évité à un niveau plus raisonnable (même s'il est impossible de concurrencer le radar ou le simple panneau de limitation de vitesse) : à l'heure actuelle, avec le coût des sécurisations de PN, supprimer les PN pourrait dégrader la sécurité routière au lieu de l'améliorer. Au Royaume-Uni, Evans (Evans et Addison 2009) a démontré que cela pouvait être le cas lorsqu'un investissement de sécurité ferroviaire était trop coûteux. Il pourrait être utile, pour éclairer les politiques publiques, que des économistes des transports fassent en France la même démarche.

# Chapitre 2

# État de l'art et bibliographie : Description des PN

## Table des matières


2.1 Passages à niveau et accidents . . . . . 28

2.1.1 Description des passages à niveau . . . . . 28

2.1.2 Population des passages à niveau en France . . . . . 31

2.1.3 Passages à niveau en Europe et dans le monde . . . . . 31

2.1.4 Passages à niveau vus du côté routier . . . . . 34

2.1.5 Conclusions . . . . . 37

2.2 Passages à niveau vus comme interface routière et ferroviaire . . . . . 39

2.2.1 Description statistique de la géométrie des PN français . . . . . 39

2.2.2 Accidentologie, technologies, durées d'annonces . . . . . 41

2.2.3 Répartition et fréquence des types de PN en fonction de la fréquentation des lignes sur le réseau français . . . . . 43

2.2.4 Gravité des accidents au passages à niveaux . . . . . 46

2.2.5 Corrélation entre les accidents aux PN et la sécurité routière en général . . . . . 48

2.2.6 Environnement du PN : le PN comme carrefour souvent mal conçu 49

2.2.7 Conclusions . . . . . 51

## 2.1 Passages à niveau et accidents

### 2.1.1 Description des passages à niveau

Un passage à niveau (PN, LC ou LX : Level crossing) est l'emplacement où deux infrastructures de transport différentes se croisent à niveau.

Un passage à niveau est composé de trois parties principales :

- **La signalisation routière, souvent une signalisation à distance** fixe ou dynamique, et une signalisation immédiate : croix de Saint-André, feux rouges clignotants, feux bicolores fixes (Allemagne), feu blanc puis rouge clignotant (Hollande), Wigwag (UK), portique d'avertissement caténaire éventuel.
- **La signalisation ferroviaire :** détecteur éventuel qui va permettre de déclencher le cycle de fermeture éventuel du PN, Signal ou agrès de protection éventuel, détecteur d'obstacle ou détecteur de fin de course ou autotest éventuel. La figure 2 représente un exemple (en Allemagne) de la signalisation ferroviaire d'un PN
- **Le passage à niveau « physique » :** barrières de protection éventuelles, « platelage » permettant la circulation des véhicules routiers en même temps que le passage des trains que l'on peut voir sur la figure 1.

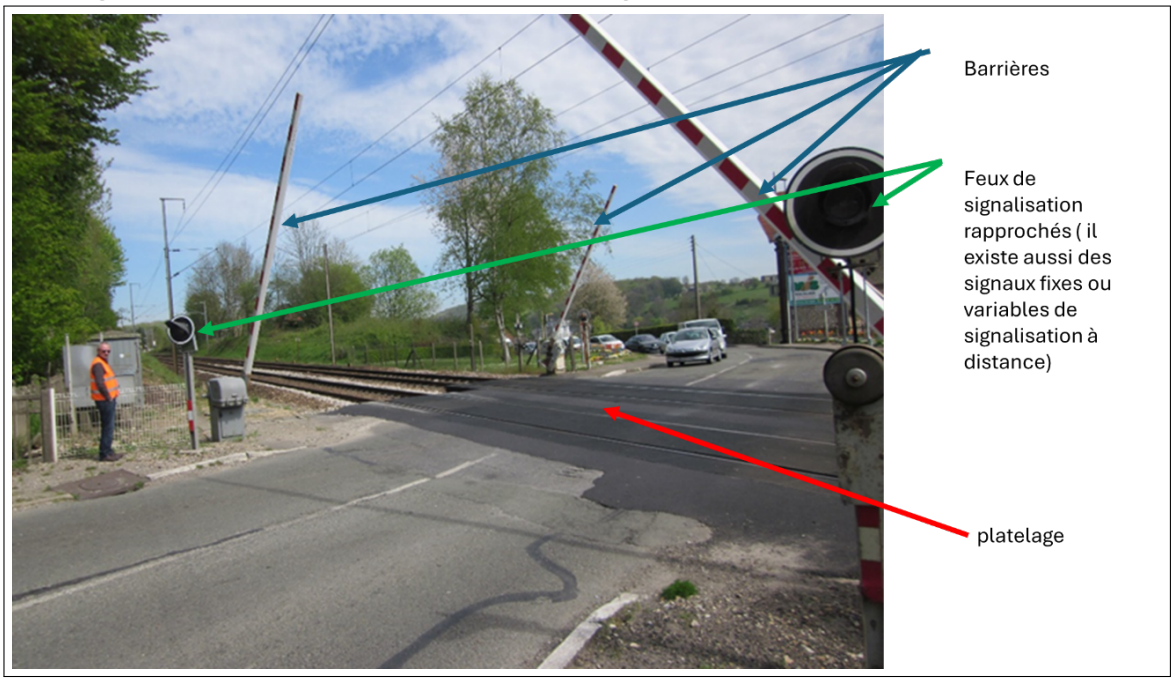



FIGURE 1 – Principaux constituants d'un passage à niveau français à quatre demi-barrières de type SAL 4 (Signalisation Automatique Lumineuse quatre barrières)

*E*inschaltung(détecteur d'arrivée du train), Ausschaltung (détecteur de sortie du train), Überwachungssignal(signal de protection du passage à niveau), Einschatstrecke (distance d'annonce), Bremsweg schienenfahrzeug (distance de freinage), Gefahrenraum (zone de danger), Lichtzeichen (signaux lumineux routiers).

De nombreux sous types de passage à niveau existent. Les PN étudiés dans cette thèse sont décrits dans le tableau 1.

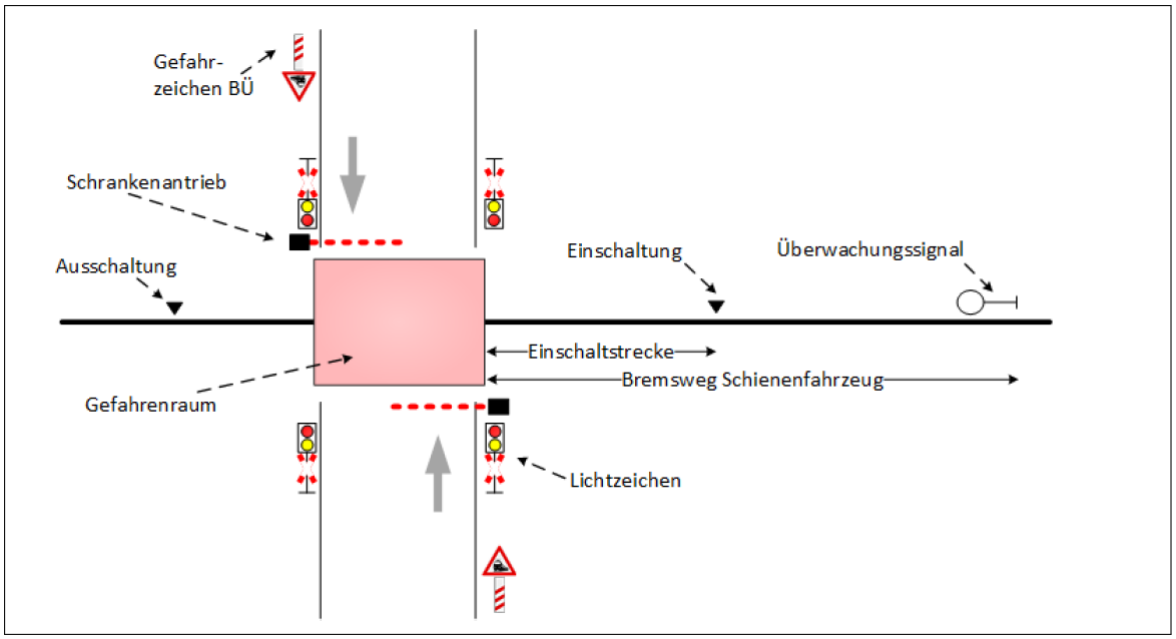



FIGURE 2 – Principe d'un passage à niveau à deux demi-barrières à franchissement conditionnel (SAL 2 FC) (Source DB) :

Table 1 : Passages à niveaux utilisés dans cette thèse avec descriptions

| Types | Descriptions | Photos |
|---|---|---|
| PN à croix de Saint-André, PN à Stop | Le plus simple des PN, protégé par un signal fixe.limité à 140 km (vitesse ferroviaire) et réservé à des routes peu fréquentées | |
| SAL 2 ou AHB | Passage à niveau à feux et 2 demi-barrières le plus courant en France | |

Suite sur la page suivante

Table 1 : Passages à niveaux utilisés dans cette thèse avec descriptions (Suite)

| | | |
|---|---|---|
| SAL 4 | Passage à niveau à feux et 4 demi-barrières. les barrières d'entrée se ferment, puis les barrières de sortie Utilisé à proximité de gares ou sur des routes très fréquentées. | |
| EGDM (variante existant aux USA de SAL avec 2 barrières d'entrée et 2 barrières de sortie commandées par détecteur d'obstacle) | Exit gate dynamic mode, où les 4 barrières se ferment simultanément en l'absence d'obstacle, sauf si un obstacle est détecté (dans ce cas, la fermeture de la barrière de sortie est décalée pour permettre l'esquive par l'obstacle). | |
| PN FC ou PN à franchissement conditionnel, LC ou LX with rail side protection : | PN qui ne peut être franchi à vitesse normale que si une ou plusieurs conditions préalables sont remplies. Ces PN peuvent être de type SAL 2 ou SAL 4 , équipés d'autotests, de DOPN, etc. | PN à 4 demi-barrières, wigwag et franchissement conditionnel (les deux conditions étant l'absence de détection par le détecteur d'obstacle et l'autotest réussi) (UK) |

Dans certains pays (notamment Scandinavie, le monde germanique, Suisse), la plupart des passages à niveau équipés de feux sont à franchissement conditionnel, tandis que dans le monde latin et anglo-saxon, ils sont en général « non protégés » du côté ferroviaire, sauf à proximité de gare. Contrairement à une croyance répandue, même à la SNCF, les PN à franchissement conditionnel ne sont pas des PN avec priorité routière : une fois la condition remplie et le signal ouvert, le train est prioritaire sur la route.

Les passages à niveau conditionnels peuvent avoir plusieurs types de signaux pour valider la condition de franchissement par exemple :

- La bonne fermeture des barrières d'entrée.
- La fin de service à quai et la réouverture du signal de réception.
- L'absence d'obstacles dans le cas d'un PN équipé d'un détecteur d'obstacles (DOPN).
- Autotest de bon fonctionnement du PN réussi (cas des SAL 2 allemands de la figure 2 par exemple).
- La fin de la desserte du quai (PN à rétention d'annonce, protégé par un signal, à proximité des gares).

Les passages à niveau conditionnels sont protégés par :

- Un signal non permissif (notamment en cas de PN en sortie de gare ou avec une torche pyrométrique en France).
- Un signal permissif (pouvant être franchi en marche à vue)
- Un signal spécial comme deux feux verts qui s'allument en cas de bonne fermeture du PN (France).

### 2.1.2 Population des passages à niveau en France

D'après les données officielles de la SNCF (SNCF Réseau [2024]), il y aurait en France 17 387 PN, se répartissant comme suit :

Deux types de passage à niveau représentent l'essentiel des effectifs : les PN à SAL 2 (2 ½ barrières, avec plusieurs variantes), les PN à quatre demi-barrières SAL 4 et les PN sans SAL (à croix de Saint-André). Toutefois, le nombre total paraît élevé et il est possible que ces données « officielles » ne soient pas à jour ou qu'ils intègrent des PN sur des lignes non ouvertes à la circulation.

### 2.1.3 Passages à niveau en Europe et dans le monde

Les PN dans le monde ont des ergonomies voisines à ceux vu en France. Cependant, un type de passage à niveau, courant en Europe et dans le Monde est relativement peu répandu en France : **le passage à niveau à franchissement conditionnel,**

Dans ce type de passage à niveau, il existe un signal de protection (coté ferroviaire) du PN, qui interdit le passage du train sur le PN tant qu'une « condition » (ou plusieurs) n'est pas remplie : par exemple bonne fermeture des barrières, absence d'obstacle routier, etc.

Dans certains pays comme le Royaume-Uni ou le Japon, ces PN peuvent être très sophistiqués (en comparaison des nôtres) comme on peut le voir sur les figure 3 et figure 4.

Le niveau de sécurité ferroviaire en France est très correct par rapport aux réseaux de pays comparables, exploit d'autant plus remarquable que les moyens accordés au réseau ferroviaire français sont très inférieurs à ceux du reste de l'Europe si l'on en croit Allianz für Schiene.

TABLE 2 – Classement et nombre des passages à niveau en France (SNCF Réseau 2024)

| Classe | Définition | Type de PN | Nombre |
|---|---|---|---|
| **10** | PN public pour véhicules sans barrières protection assurée par un agent | | 84 |
| **11** | PN public pour véhicules avec barrières gardé sans passage piétons accolé manœuvré à pied d'œuvre | | 779 |
| **12** | PN public pour véhicules avec barrières gardé sans passage piétons accolé manœuvré à distance | | 382 |
| **13** | PN public pour véhicules avec barrières gardé sans passage piétons accolé manœuvré à pied d'œuvre et distance | | 26 |
| **14** | PN public pour véhicules avec barrières gardé avec passage piétons accolé manœuvré à pied d'œuvre | | 3 |
| **15** | PN public pour véhicules avec barrières gardé avec passage piétons accolé manœuvré à distance | | 377 |
| **16** | PN public pour véhicules avec barrières gardé avec passage piétons accolé manœuvré à pied d'œuvre distance | | 38 |
| **17** | PN public pour véhicules avec barrières ou demi-barrières non gardé à SAL 2 et SAL 2B | SAL 2 | 9916 |
| **18** | PN public pour véhicules avec barrières ou demi-barrières non gardé à SAL 2 + îlot séparateur | SAL 2 | 274 |
| **19** | PN public pour véhicules avec barrières ou demi-barrières non gardé à SAL 4 | SAL 4 | 577 |
| **20** | PN public pour véhicules sans barrières sans SAL | Croix de Saint-André | 3274 |
| **21** | PN public pour véhicules sans barrières avec SAL 0 | | 55 |
| **31** | PN public isolé pour piétons sans portillons | | 98 |
| **32** | PN public isolé pour piétons avec portillons | | 632 |
| **41** | PN privé pour véhicules sans barrières | | 333 |
| **42** | PN privé pour véhicules avec barrières sans passage piétons accolé | | 272 |
| **43** | PN privé pour véhicules avec barrières avec passage piétons accolé public | | 72 |
| **44** | PN privé pour véhicules avec barrières avec passage piétons accolé privé | | 83 |
| **45** | PN privé isolé pour piétons sans portillons | | 45 |
| **46** | PN privé isolé pour piétons avec portillons | | 67 |
| **0** | PN secondaire : Un PN peut être localisé sur plusieurs lignes et possède une identification différente sur chacune des lignes où il est localisé. Une des identifications, appelée PN père, porte la classe du PN (classe 10 à classe 46). Les autres identifications, appelées PN secondaires, portent la classe 00. La référence au PN père est indiquée dans le libellé d'obstacle des PN secondaires sous la forme suivante :<br><libellé du PN père><code ligne du PN père><PK du PN père>. | | 84 |

Sur cet exemple de PN FC japonais à détecteur d'obstacle, on voit à gauche une combinaison « signal d'autotest PN réussi» (croix Jaune) et « absence d'obstacle au DOPN » ( signal pentagonal éteint) ) a une distance de visibilité permettant l'arrêt au PN en rappel du signal pentagonal ( à droite) implanté au droit du PN et non visible a distance de freinage, la voie étant en courbe.
Si l'obstacle est détecté, le signal pentagonal s'allume, le conducteur passe en marche à vue.
Avec les détecteurs d'obstacles récents ( comme le 3DLX testé par SNCF) , après 2 s de non-détection d'obstacle, le signal pentagonal s'éteint. Comme la croix jaune allumée montrait que le PN s'était bien fermé, le train reprend alors sa vitesse, ce qui minimise la perte de temps .

FIGURE 3 – Un exemple particulièrement sophistiqué de PN FC, avec un double signal (état de l'autotest du PN et absence d'obstacle). Habituellement, les PN FC ont plutôt un signal dont l'allumage indique l'autorisation de franchissement

TABLE 3 – Comparaison des décès sur la route et des pourcentage de décès au niveau des passages à niveau dans quatre pays (MCCULLOUGH 2008)

| Country | General Road Safety Fatalities per 100000 of population | Crossing fatalities as % of General Road Safety Fatalities |
|---|---|---|
| France | 12.9 | 0.7% to 1.1% |
| Japan | 7.5 | 1.3% |
| USA | 14.9 | 1% |
| Germany | 6.5 | 0.7% to 1.08% |

Cependant, la sécurité aux passages à niveau est plus mauvaise en France que dans d'autres pays d'Europe (tableau 3) En effet, la France a entre 0,09 et 0,14 décès pour 100 000 habitants, ce qui est supérieur à l'Allemagne avec 0,045 et 0,07 pour 100 000 habitants et à beaucoup de pays comparables. Mais est-ce bien le problème ? En effet, le pourcentage de décès au PN par rapport aux décès routiers est dans le même ordre de grandeur, que ce soit en France, en Allemagne, mais la sécurité routière est aussi plus médiocre en France. C'est l'un des points qu'avait soulevé Ci Liang dans sa thèse : au moins jusqu'au niveau régional, le risque de collision aux PN est proportionnel au risque d'accident routier mortel.

Que nos passages à niveau soient nettement moins sophistiqués que ceux d'Allemagne, Scandinavie, Suisse, avec très peu d'auto-tests, de détecteurs d'obstacles, etc., semble moins important que l'impact de la politique de sécurité routière : campagnes d'information, politiques de répression des infractions dont l'impact est aussi indirect, en focalisant davantage l'attention sur le danger routier.

FIGURE 4 – Détails d'équipements d'un PN FC à quatre demi-barrières, wigwag et franchissement conditionnel (les deux conditions étant l'absence de détection par le détecteur d'obstacle et l'autotest réussi) (UK)(photo de O. Cazier)

### 2.1.4 Passages à niveau vus du côté routier

L'analyse des bases de données routières de l'ONISR (Office National Interministériel de la Sécurité Routière) est complexe et seuls les résultats de l'année 2022 sont utilisés ici (figure 5, figure 6, figure 7), compte tenu de la difficulté à analyser la base.

Seules les VMA (Vitesse Maximale Autorisée) 30 et 50 ont un nombre d'accident suffisamment significatif pour permettre l'évaluation.

La figure 6 démontre donc que la vitesse routière ou du moins la VMA, contrairement à la vitesse ferroviaire, a un impact négligeable sur la criticité de l'accident, ce qui n'est pas

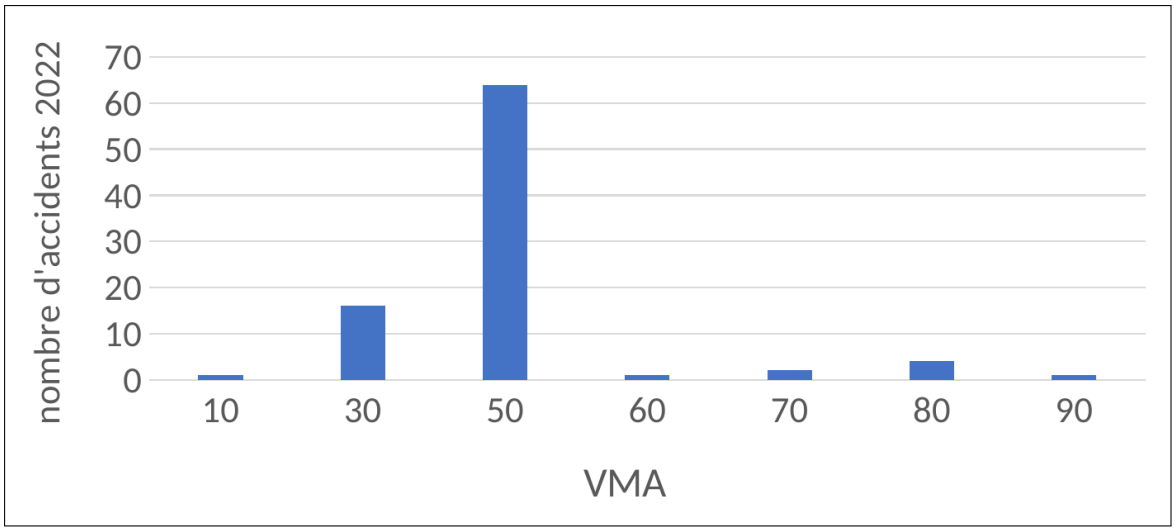



FIGURE 5 – Nombre d'accidents aux passages à niveau en 2022 en fonction de la vitesse maximale autorisée (VMA) en 2022 (graphe réalisé à partir des données de la base ONISR 2022)

surprenant en soi, l'essentiel de l'énergie mise en jeu dans l'accident provenant du train. Cependant, ce point pourrait changer en cas de multiplication, sur le réseau, de trains « très légers », car dans ce cas, la contribution routière à l'énergie du choc deviendrait non négligeable.

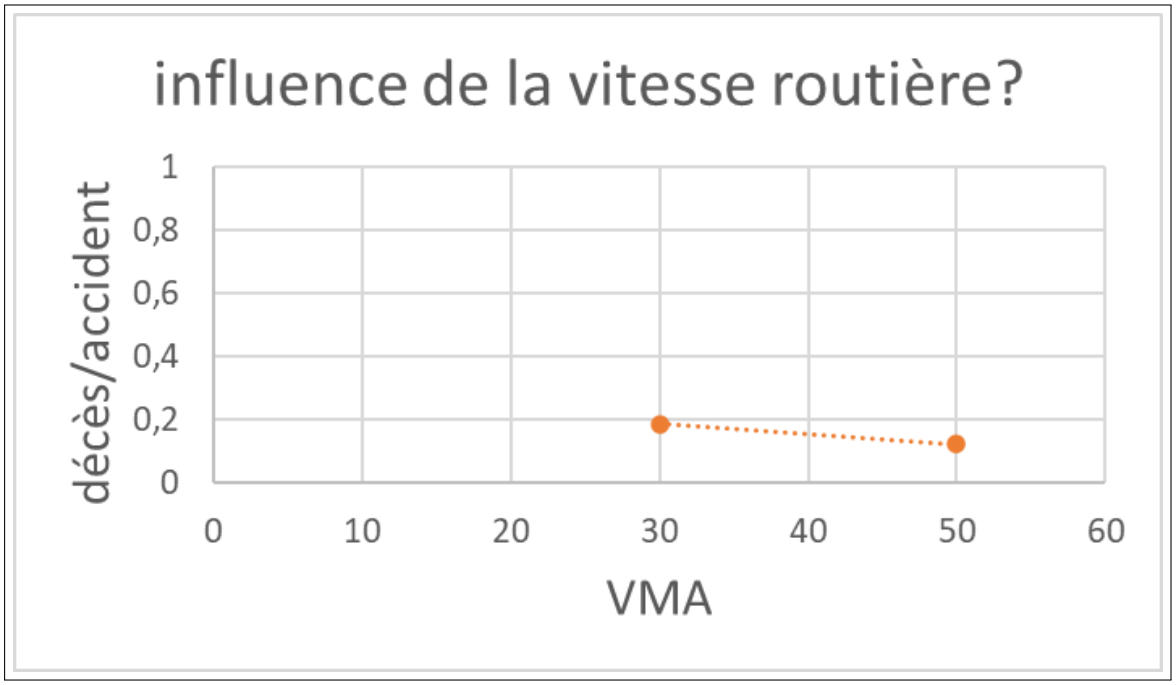



FIGURE 6 – Influence de la VMA routière sur la criticité (i.e. produit de l'occurrence d'un accident par la gravité) de ses conséquences en 2022 (graphe réalisé à partir des données de la base de données ONISR 2022)

La figure 7 présente la gravité de l'accident à un passage à niveau en fonction du point de choc et montre un nombre important de blessés graves pour des accidents en ton-

neaux. Mais le tonneau est aussi un indicateur corrélé à la violence du choc et ne renseigne pas sur le point d'impact.

De plus, un nombre important de décès concerne les modes doux (i.e. piétons, vélo, trottinettes, etc.), ce qui peut paraître surprenant, compte tenu de l'effectif assez faible des accidents mais reflète probablement la vulnérabilité de ces types d'usagers.

L'autre résultat surprenant correspond à la gravité plus faible des accidents et les absences de décès pour les chocs côté gauche mais environ 20% des décès sont non renseignés dans le fichier de l'ONISR ce qui est regrettable et peut fausser l'interprétation.

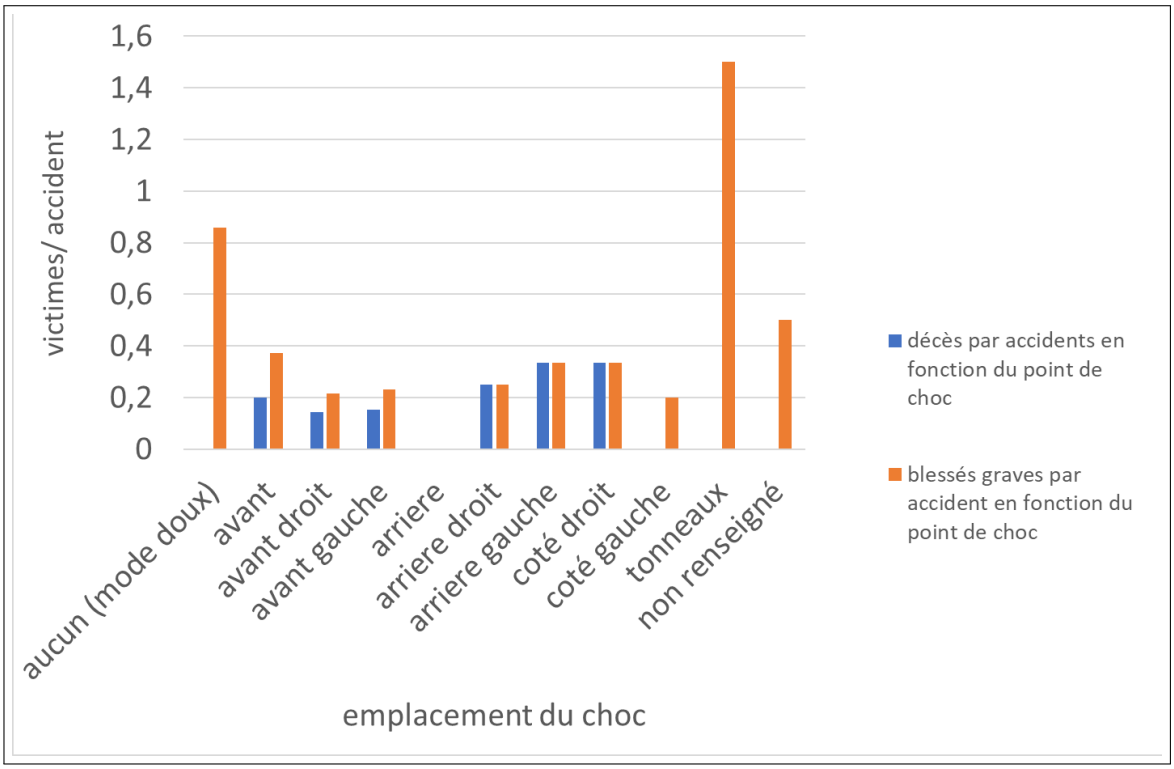



FIGURE 7 – Gravité de l'accident à un passage à niveau en fonction du point de choc (Base de données ONISR 2022)

Concernant la gravité des accidents, un élément important, mais qui n'a pas été constaté en 2022 est le « sur-accident » déclenché par le choc initial au PN. Là aussi, la technologie peut entraîner une augmentation du risque avec par exemple l'incendie de batteries en cas de choc, déjà constatée sur les véhicules routiers électriques lors des deux accidents recensés, et pouvant aussi se produire sur les batteries d'un train ou d'un poids lourd, avec des énergies mises en jeu bien plus grandes. Avec l'augmentation du nombre de véhicules électriques dans les futures années dans le parc automobile français, ce type de sur-accidents risque de devenir courant.

Les autres types de sur-accidents non rencontrés en 2022 sont le déraillement avec engagement du gabarit de la voie opposée et le heurt avec un transport de matière dangereuses routier ou ferroviaire.

Les mois à faible éclairement (mois d'hiver) semblent plus accidentogènes (10 accidents/mois en 2022) mais l'écart est à peine significatif avec les mois à fort éclairement (7 accidents/mois) (figure 8).

Cette information est confirmée par la figure 9, avec la gravité et le nombre de victimes aux passages à niveau ne dépendant pas de la période de l'année en 2022, avec par exemple une gravité de 0,4 pour les décès par accident au mois d'août et 0,45 pour le mois d'octobre. De plus, la probabilité que l'hypothèse HO « le taux d'accident des mois d'été est le même que celui des mois d'hiver « est légèrement inférieure à 5%, et est donc non significative pour l'année 2022 mais cela pourrait dépendre des années.

De plus, la majorité des accidents a lieu en journée (figure 10), indépendamment de l'éclairement mais cela est biaisé par le fait que la majorité des circulations routières et ferroviaires ont lieu en journée. Il n'y a pas assez d'éléments pour valider l'idée qu'au crépuscule, le taux d'accident pourrait être significativement plus élevé qu'en journée, compte tenu du trafic au crépuscule élevé en hiver, mais de la durée restreinte du crépuscule.

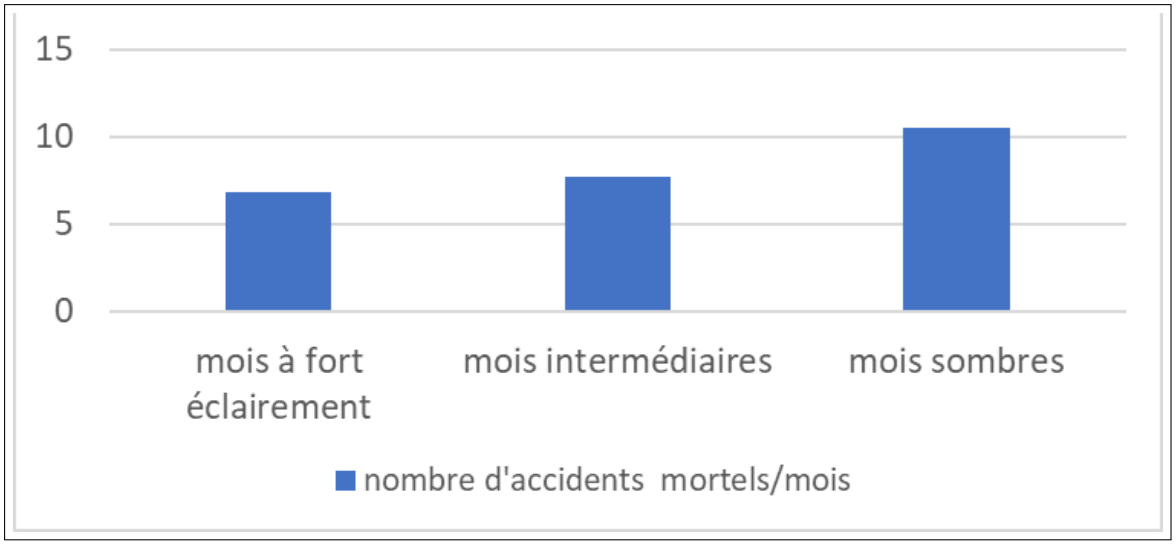



FIGURE 8 – Influence des mois sur les accidents mortels (fort éclairement : juin à septembre, faible éclairement : novembre à mars et intermédiaires correspondant aux autres mois) (ONISR 2022)

### 2.1.5 Conclusions

En conclusion, vu du côté routier, les passages à niveau ne représentent que quelques dizaines de décès par an, de l'ordre de 1% des décès routiers. La gravité des accidents aux passages à niveau ne semble pas être influencée par la vitesse routière, l'éclairement ou la période de l'année, même si cette dernière est à la limite du significatif.

Les accidents de modes doux représentent une proportion importante des victimes et évoluent défavorablement (SNCF Réseau).

Les évolutions technologiques envisagées : réduction de la masse des trains, véhicules et trains électriques à batteries, pourraient augmenter le risque de sur-accident.

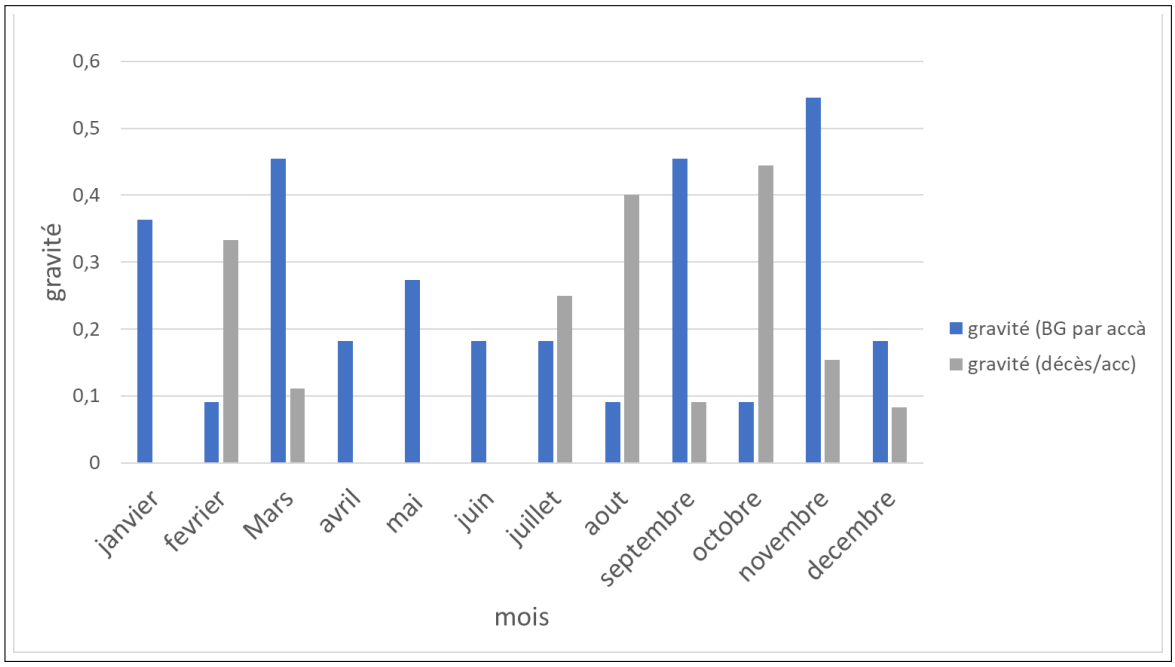



FIGURE 9 – Nombre de victimes (gravité) des accidents aux passages à niveaux ONISR 2022 en fonction du mois (BG : blessés graves, Acc : accident)

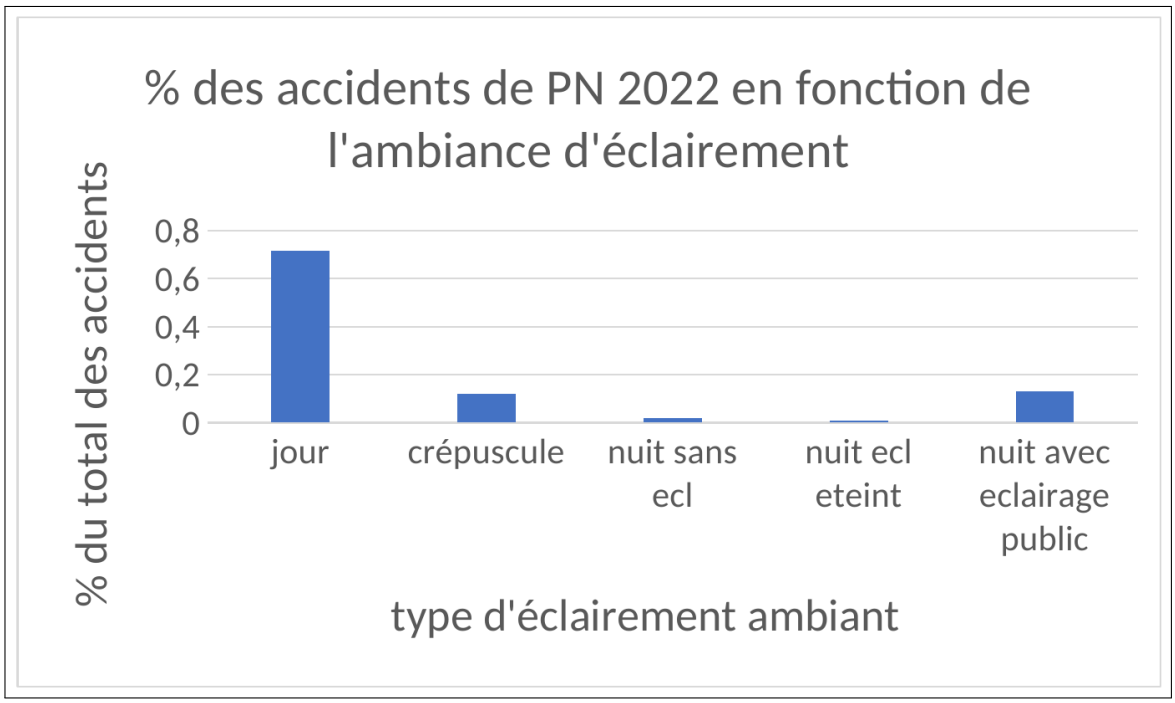



FIGURE 10 – Accidents en fonction de l'ambiance d'éclairage (ecl : éclairage) source ONISR 2022

## 2.2 Passages à niveau vus comme interface routière et ferroviaire

### 2.2.1 Description statistique de la géométrie des PN français

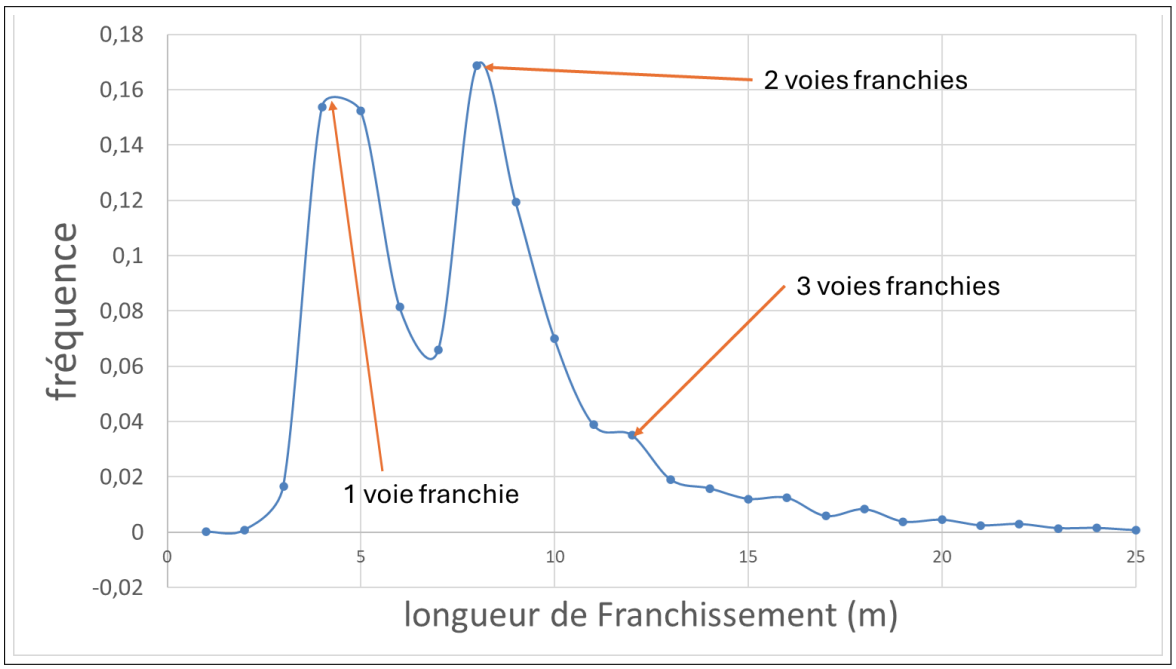



FIGURE 11 – Longueur et fréquence de franchissement des passages à niveau en France

La population française des PN est malheureusement très hétérogène, ce qui ne facilite pas l'analyse (voir section 2.1.2 Population des passages à niveau en France). La longueur de franchissement des voies ferrées par des PN est très hétérogène (figure 11), avec plusieurs pics successifs qui dépendent essentiellement du nombre de voies traversées : 5m pour une voie et 8m pour deux voies. Dans une moindre mesure, cette distribution dépend aussi de l'angle de traversée et de l'aménagement de la route et /ou de l'environnement.

Cette longueur de franchissement dépend aussi du type de PN. Ainsi, les PN les moins bien équipés (Croix de Saint-André) sont souvent dans des zones peu denses avec des voies ferrées à voies uniques (figure 12). Ainsi la répartition des longueurs de franchissement reflète la répartition de la population proche de la voie ferrée avec une majorité de voies uniques et des PN à croix de Saint-André, dans les zones peu denses et une majorité de PN à quatre demi-barrières et de voies ferrées à deux voies ou plus dans les zones denses (figure 12).

La fréquence des largeurs de franchissement des passages à niveau (figure 13), aussi appelé largeur de platelage, indique une médiane des largeurs de franchissement des passages à 5m, correspondant à la largeur de deux petites véhicules.

Les passages à niveau peuvent aussi traverser sous divers angles les voies ferrées, comme décrit dans la figure 14. Environ 1/3 des passages à niveau français franchissent perpendiculairement la voie ferrée et moins de 10% des passages à niveau franchissent la voie ferrée pour un angle de plus de 45°.

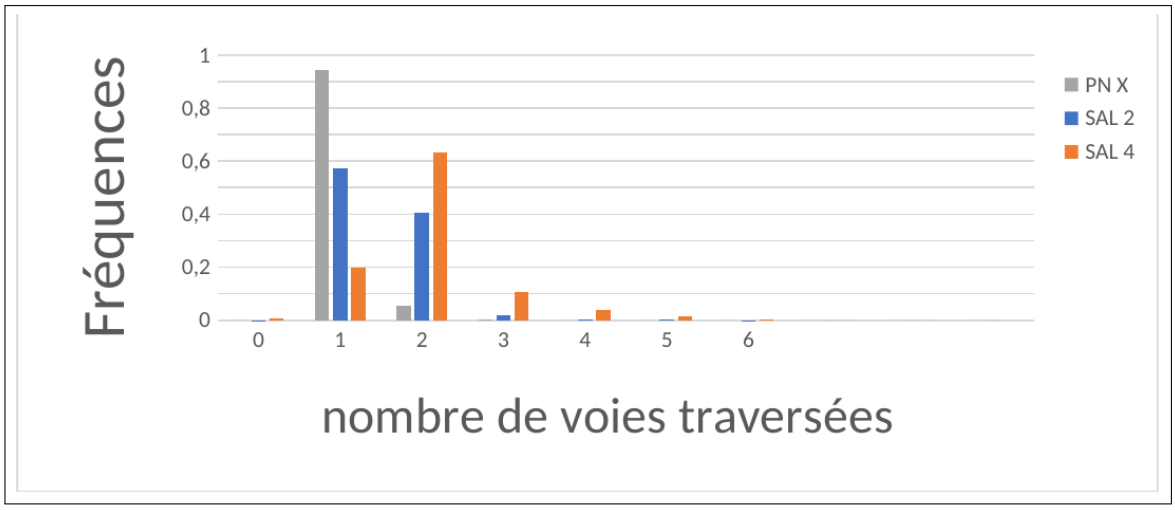



FIGURE 12 – Fréquence du nombre de voies traversées par type de PN en France d'après les données MORIPAN

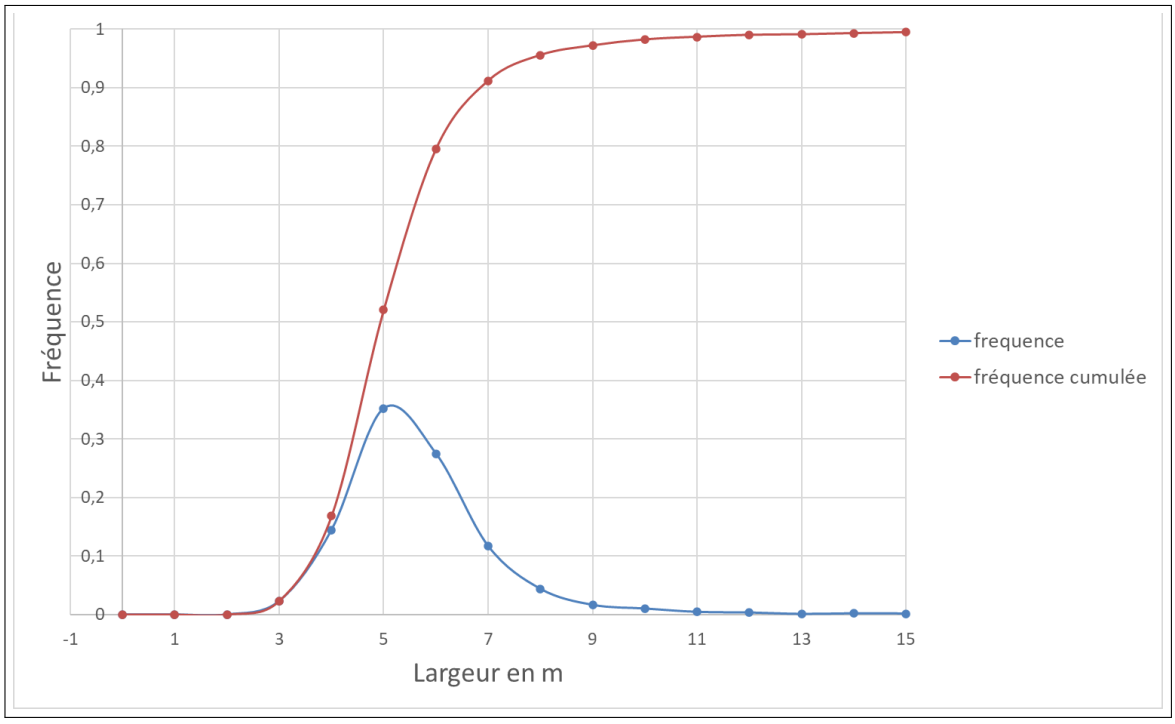



FIGURE 13 – Distribution des largeurs de franchissement d'après les données MORIPAN

Dans la suite de la thèse, il sera montré que la cécité d'inattention est une cause majeure d'accident : la largeur de platelage insuffisante (c.-à-d. largeur du passage) ou une géométrie difficile pour le croisement, induisent un report d'attention des conducteurs sur le risque croisement aux dépens du risque PN. : Ce phénomène a probablement contribué à des accidents de PN connus comme Allinges ou Saint-Médard [1].

1. Les deux accidents de **Saint-Médard-sur-Ille (Ille-et-Vilaine)** en novembre 2007 et octobre 2011 ont impliqué un TER Bretagne assurant la liaison entre Saint-Malo et Rennes et un poids lourd au passage à niveau de Saint-Médard-sur-Ille, faisant quarante blessés en 2007 et trois morts et une quarantaine de blessés en 2011. L'**accident d'Allinges** est une collision survenue le 2 juin 2008 au passage à niveau de Mésinges, sur le territoire de la commune d'Allinges, dans le département français de la Haute-Savoie entre un autocar

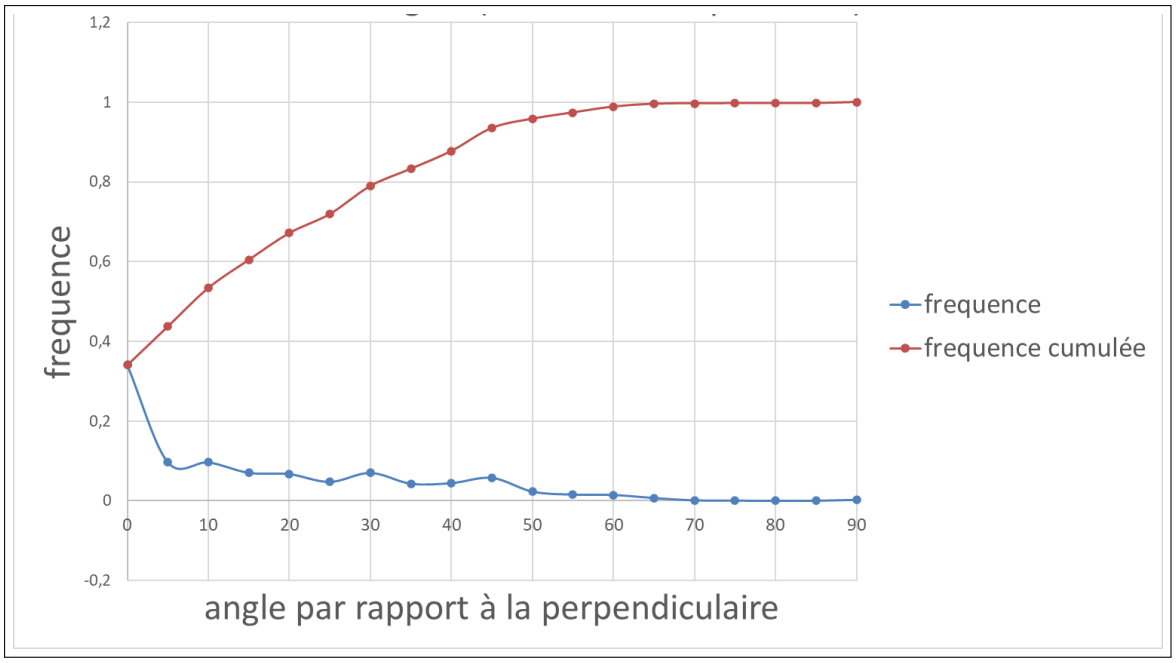



FIGURE 14 – Angle de franchissement par rapport à la perpendiculaire d'après les données MORIPAN (LIANG 2018)

Cependant, les PN qui présentent, au niveau du platelage, un écart de largeur avec les voiries encadrantes sont aussi accidentogènes, même quand le platelage était élargi (MORIPAN). En effet, certains conducteurs « profitaient » de la largeur du PN pour manœuvrer et se croiser dessus (MORIPAN, BEA-TT).

*Cette largeur de franchissement faible et souvent différente de celles des voiries encadrantes peut être un élément explicatif de l'accidentologie des passages à niveau en France.*

### 2.2.2 Accidentologie, technologies, durées d'annonces

Traditionnellement, en France, on représente l'accidentologie aux passages à niveau en fonction du « moment », c'est-à-dire du produit du nombre journalier de véhicules par le nombre de trains journalier, qui est proportionnel à l'espérance de rencontre train véhicule à un passage à niveau. On voit sur la figure 15 que l'équipement et la conception du PN (présence de barrières ou de feux, nombre de barrières) va jouer beaucoup sur le risque de collision. Ainsi, « en moyenne », à moment équivalent, le risque d'accident sur un PN à croix de Saint-André est environ sept fois plus élevé que pour un PN de type SAL 2, lui-même environs deux fois plus accidentogène qu'un SAL 4 à moment élevé.

Cependant, *le moment n'est pas le déterminant principal du risque d'accident* comme l'avait montré Ci Liang (Liang, 2018). En effet, les comportements de conducteurs et les causes d'accidents varient de façon complexe en fonction de l'ergonomie routière du PN, des flux routiers et ferroviaires, de la durée d'annonce (le temps entre la détection du train et son arrivée au PN) (voir section 3.1.1 Comportement au niveau des PN et section 2.2.6 Iden-

transportant des collégiens de la région resté bloqué sur la voie et un train TER qui assure la liaison entre Évian-les-Bains et Genève. La violente collision a fait 7 morts et 25 blessés, dont quatre grièvement.

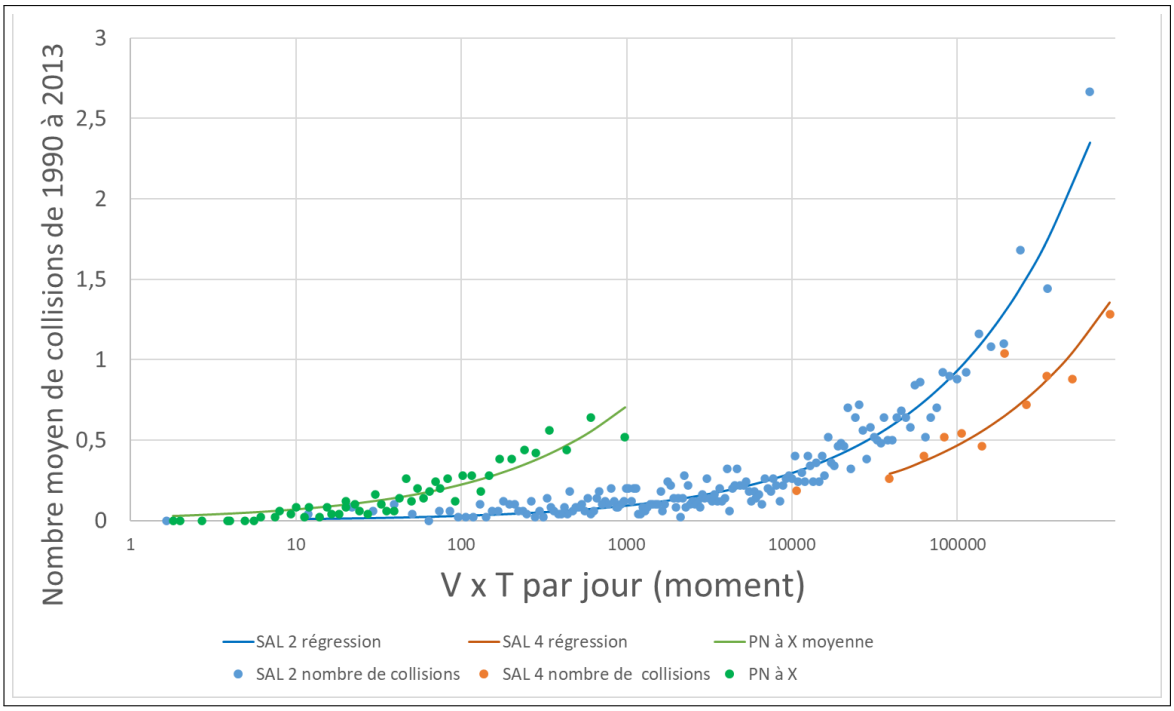



FIGURE 15 – Collisions en fonction du moment et du type de PN d'après les données MORIPAN (LIANG 2018)

tification des « facteurs de risque » de cécité d'inattention ou d'erreur de jugement du conducteur présents dans notre échantillon).

En France, la durée d'annonce minimale varie en fonction du type de PN et de la vitesse ferroviaire (figure 16) :

- 25 s minima (21 s tolérée) pour un SAL 2 sur une ligne à vitesse inférieure ou égale à 140 km/h, 30 s au-dessus de 140 et jusqu'à 160 km h.
- 35 s pour un SAL 4sur une ligne à vitesse inférieure ou égale à 140 km/h, 45 s au-dessus de 140 et jusqu'à 160 km/h.
- Au-dessus de 160 km/h seuls les PN gardés sont autorisés jusqu'à 200 km/h. Au-dessus de 200 km/h tous les PN sont interdits.

La durée d'annonce peut être un paramètre important quant au risque au PN, mais son influence est à priori complexe :

- Une durée d'annonce longue, avec une fréquentation véhicule élevée, va :
  - Réduire le risque d'une pénétration tardive dans la zone dangereuse, pour un véhicule motorisé, et pourrait donc réduire le risque
  - Augmenter l'efficacité du mécanisme d'esquive, car les conducteurs et les modes doux auront plus de temps pour s'échapper
- Une durée d'annonce longue augmente le nombre de véhicules en interaction avec un PN activé et donc devrait augmenter le risque, à la fois pour les véhicules motorisés si le flux de véhicules est faible, et dans tous les cas pour les modes doux.

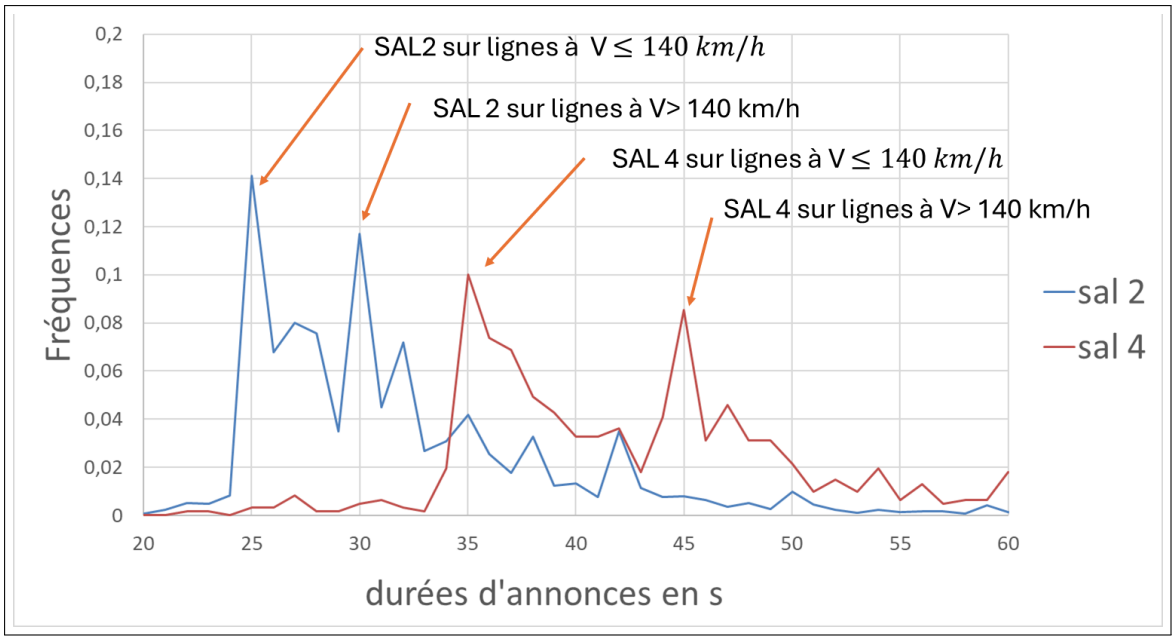



FIGURE 16 – Durée d'annonce sur les PN en France par type de PN et vitesse des trains d'après les données MORIPAN

### 2.2.3 Répartition et fréquence des types de PN en fonction de la fréquentation des lignes sur le réseau français

Les figure 17 et figure 18 représentent la répartition des flux des trains pour les PN de type SAL 2 et SAL 4 et la répartition des véhicules pour les PN de type SAL 2 et SAL 4 en France. La répartition du flux des trains suit une distribution exponentielle et la répartition du flux de véhicules suit une distribution fractale sur les SAL 2.

Pour les SAL 4, les répartitions sont plus complexes et pourraient correspondre à un mélange entre deux types de population :

- Une répartition « indépendante » du flux correspondant à des SAL 4 au voisinage des gares.
- Une répartition fractale (véhicules) ou exponentielle (trains) en fonction du flux mais pour des niveaux de fréquentation plus élevés que pour les SAL 2.

Dans la suite de l'étude, certains résultats seront représentés avec en abscisse soit les centiles de véhicules, soit les centiles de moment. Cette représentation permet de donner, dans les graphiques, une notion du nombre de PN concernés et donc de l'importance de l'impact d'une disposition.

La correspondance entre centiles et valeurs du moment ou du flux de véhicules pour les PN SAL 2 et 4sont représentées par les figure 19 et figure 20.

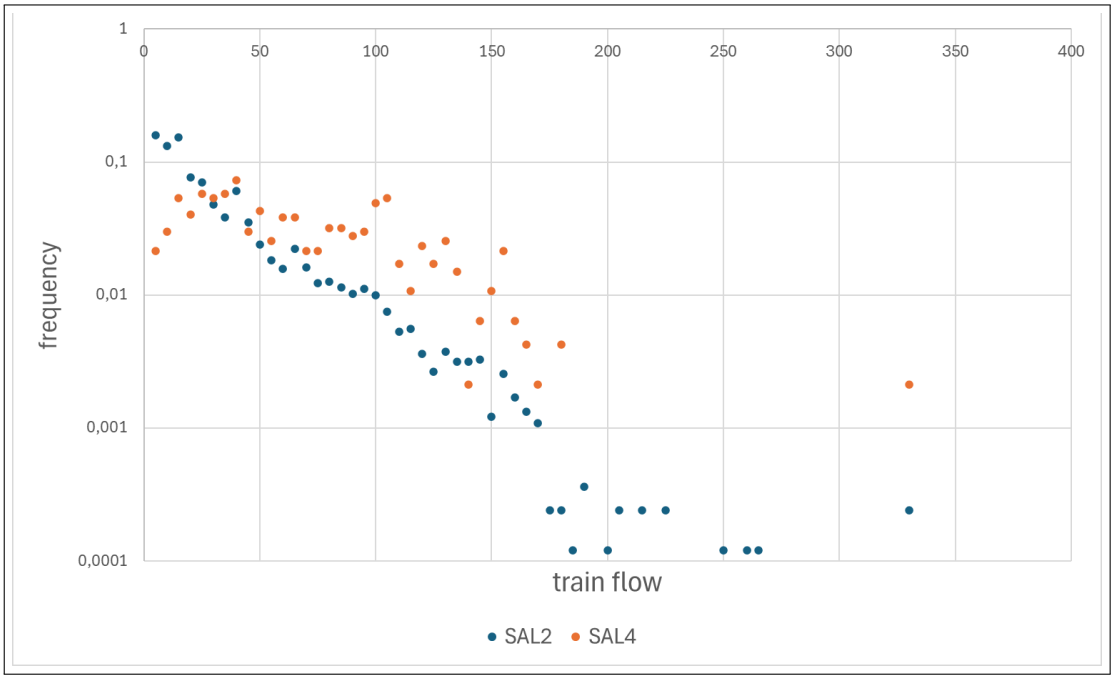



FIGURE 17 – Répartition et fréquences des trains selon le type de PN en France, d'après les données MORIPAN

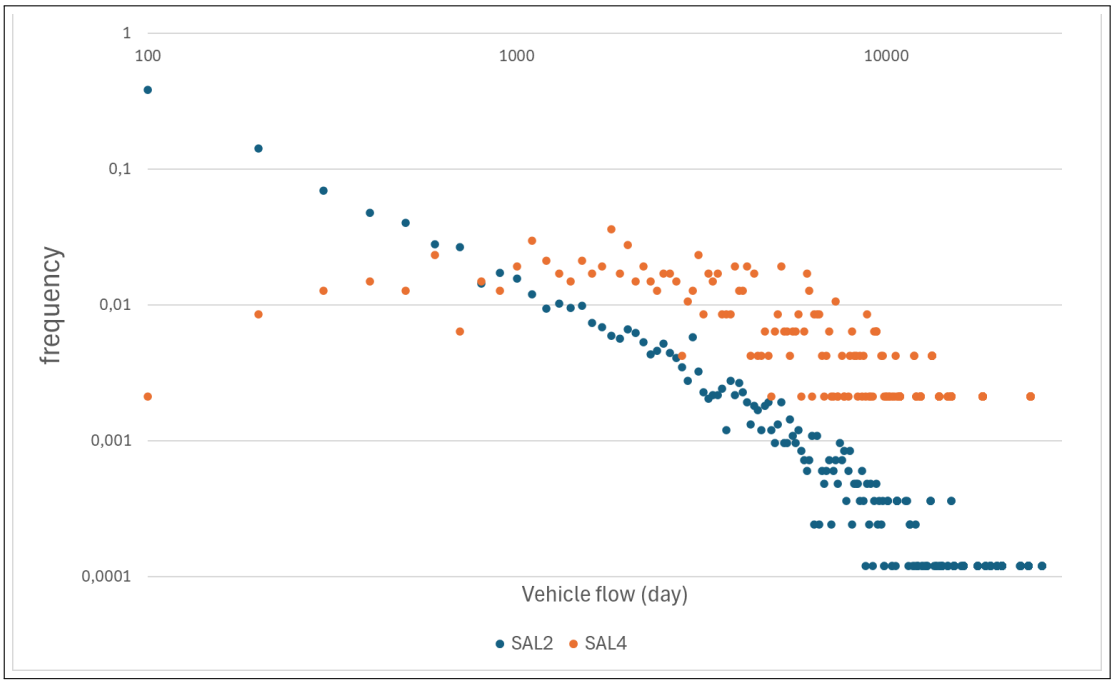



FIGURE 18 – Répartition et fréquences des véhicules selon les types de passages à niveau d'après les données MORIPAN

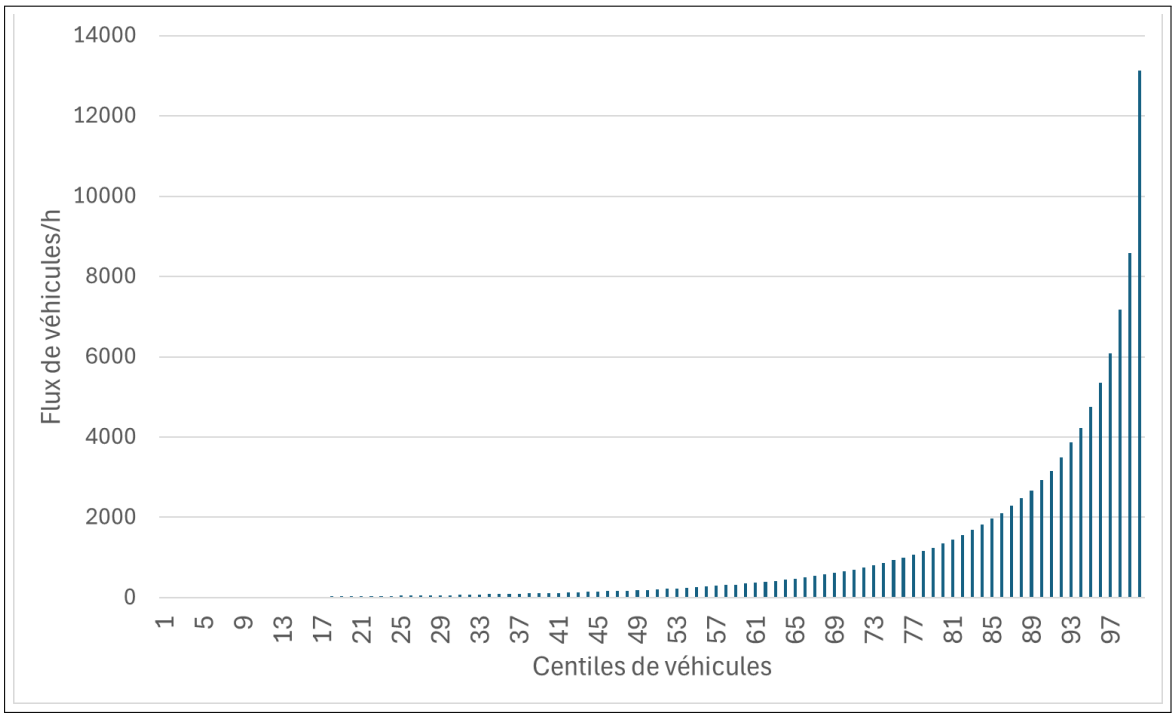
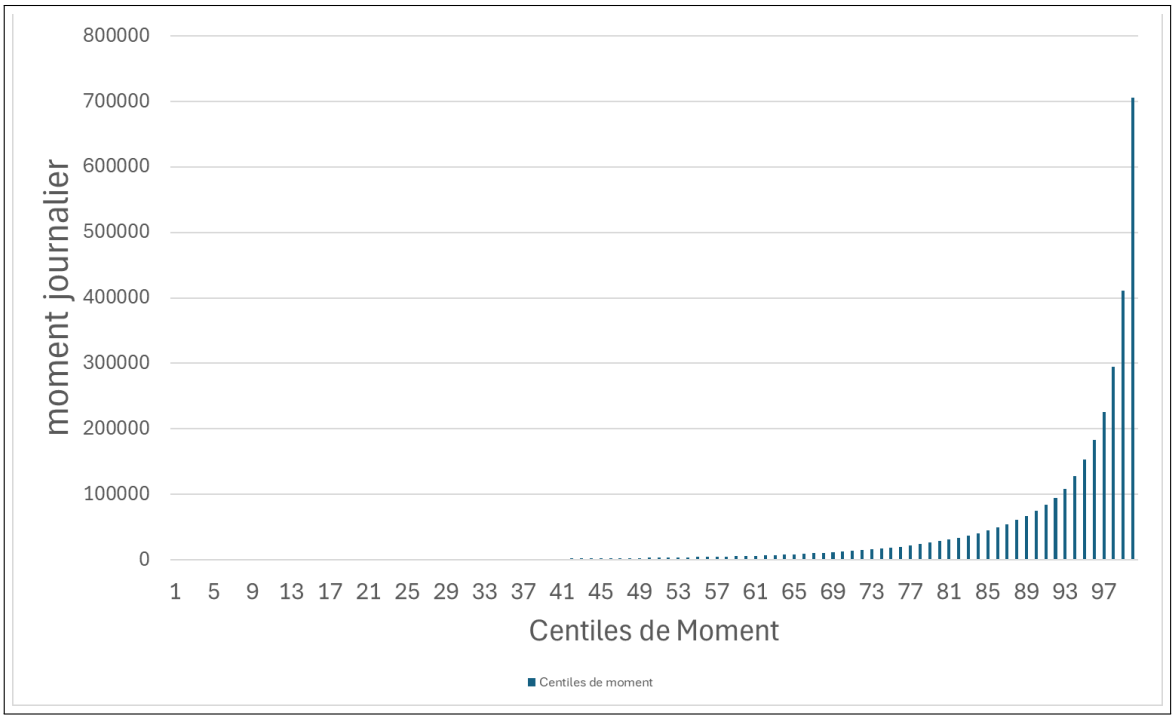



FIGURE 19 – Distribution des véhicules en échelle normale (en haut) et Log (en bas) d'après les données MORIPAN



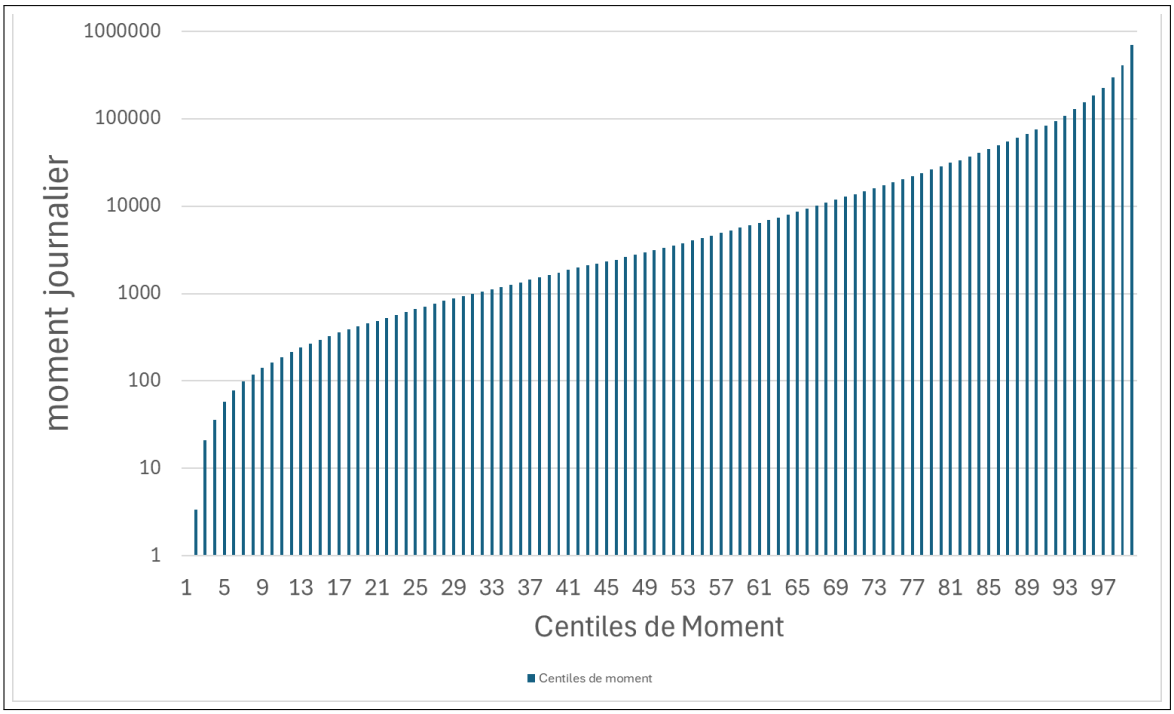



FIGURE 20 – Distribution des moments (Normale en haut et échelle log en bas) d'après les données MORIPAN

### 2.2.4 Gravité des accidents au passages à niveaux

Les paramètres possibles pour définir la distribution de probabilité de la variable aléatoire « nombre de décès/accident » ou « nombre de blessés graves par accident » sont les suivants :

- La vitesse maximale autorisée du train (qui va donner l'énergie maximale).
- La densité de l'obstacle, qui va déterminer si la collision est de type inélastique ou va relever d'un modèle plus complexe de type « pénétrateur », analogue aux obus flèche antichar ou aux bombes anti-bunker.
- Le ratio « masse de l'obstacle /masse du train », qui, en cas de choc inélastique, va déterminer la proportion d'énergie dissipée dans le train et l'obstacle.
- Le taux d'occupation du véhicule routier.
- L'emplacement du choc.
- Le risque de sur-accident lié au mobile impacté : véhicule électrique, transport de matière dangereuse, déraillement possible si le ratio des masses train/véhicule est faible.

Parmi ces paramètres, seule la vitesse du train, qui est partiellement renseignée dans les fichiers SNCF, peut faire l'objet d'une modélisation statistique.

L'espérance des variables décès/accident et blessés graves/accident en fonction de la vitesse maximale du train est représentée figure 21. La variance de ces deux variables, a ensuite été calculée afin de savoir s'il est raisonnable de les modéliser avec des lois classiques (Poisson ou NB i.e., Negative Binomial), malgré l'absence des paramètres « masse de train », « masse d'obstacle » et « occupation du véhicule » dans l'estimateur.

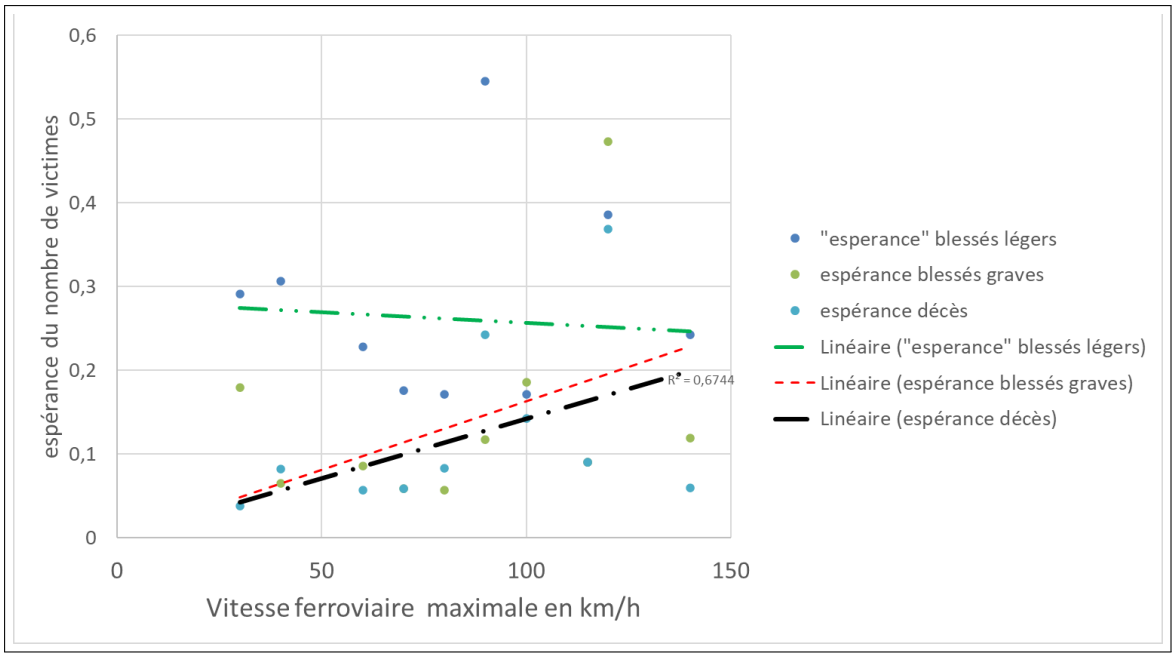



FIGURE 21 – Espérance des variables « nombre de décès/accident » et nombre de blessés graves /accident en fonction de la vitesse maximale des trains (O. Cazier d'après données MORIPAN)

La comparaison de la variance et de l'espérance de la gravité des accidents au niveau des passages à niveau en France (figure 22), indique l'impossibilité de modéliser statistiquement la gravité sans prendre en compte les caractéristiques du véhicule impacté. En effet :

- Les accidents de mode lourd (Bus, Camions) induisent une variance très forte de la gravité de l'accident, à la fois à cause de l'occupation routière (Bus) mais aussi du risque de sur-accident ferroviaire (déraillement avec choc frontal, incendie/explosion en cas de heurt de transport de matières dangereuses).
- Le nombre de blessés graves présente lui aussi une variance très importante, liée à priori à l'occupation du véhicule.
- Si l'on exclut les chocs avec des modes motorisés lourds, le nombre de décès, essentiellement routiers, pourrait être représenté par une loi NB, mais avec une valeur prédictive médiocre.

De plus, l'espérance ne suffit pas, à elle seule, à définir un modèle et la valeur prédictive du modèle va dépendre fortement du ratio variance/espérance. En effet, si ce ratio est trop élevé, la valeur « prédictive » d'un modèle est médiocre.

*Dans cette thèse, le choix fait dans MORIPAN a été reconduit : l'étude statistique portera sur le risque de collisions, et non sur la gravité et la criticité des accidents des modes motorisés.*

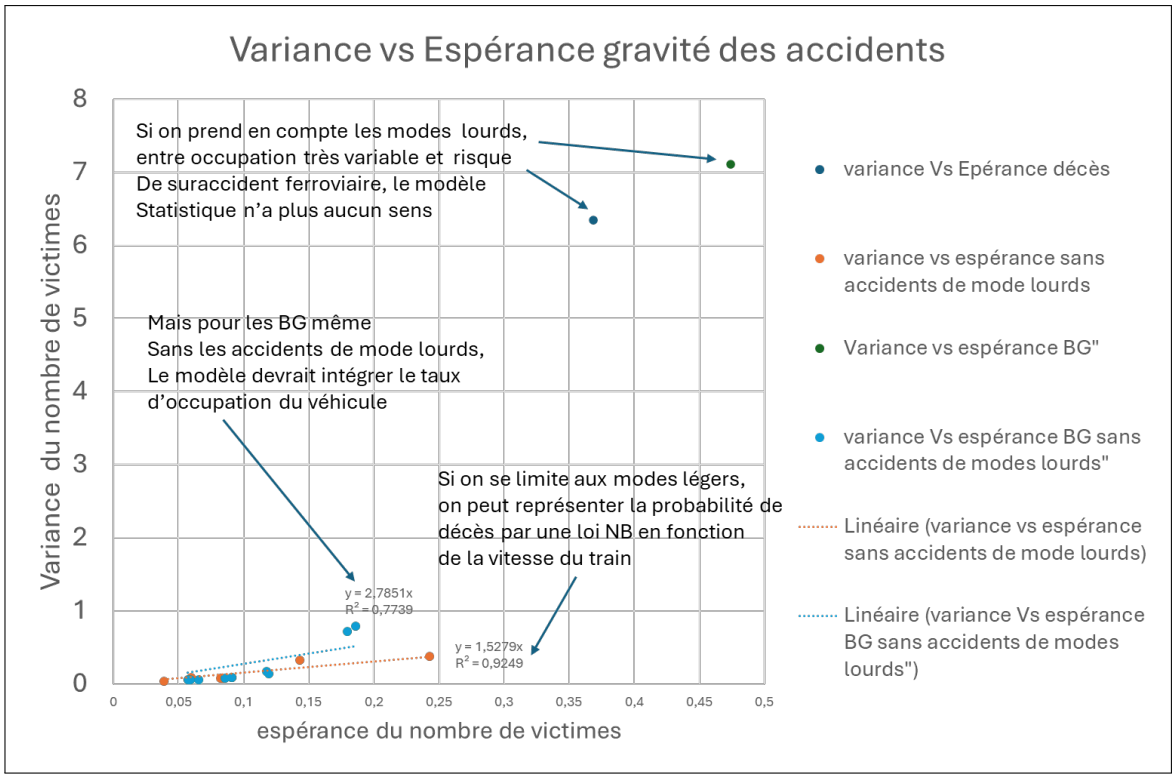



FIGURE 22 – Espérance VS variance pour les décès et les blessés graves (BG) dans les accidents de passage à niveau avec ou sans véhicule en mode lourds en France

### 2.2.5 Corrélation entre les accidents aux PN et la sécurité routière en général : l'accident de PN est bien un accident de la route

Dans sa thèse, Ci Liang a montré que l'accidentologie aux PN était très fortement corrélée à l'accidentologie routière et que le principal déterminant de l'accidentologie à un PN donné n'était pas la fréquentation, mais le niveau de sécurité routière du pays, que ce soit en France, au Japon ou aux États-Unis d'Amérique (LIANG 2018). De plus, cette corrélation est retrouvée en France au niveau régional, les régions ayant les plus hauts taux d'accidents routiers ayant aussi les plus hauts taux d'accidents de PN (LIANG 2018).

Le type de PN, ou les PN eux-mêmes : accidentologie, technologies, durées d'annonces, induit une variation de l'ordre de 1 à 7 entre PN à X et SAL 2, de 1 à 2 entre PN à SAL 2 et SAL 4, et de 1 à 5 entre PN à SAL et PN à SAL+DOPN ou Gardé pour les accidents de mode motorisés.

Quant aux autres facteurs routiers de détermination du risque (géométrie routière, géométrie des PN), l'analyse des résultats d'accidents montre qu'entre le décile le moins accidentogène et le décile le plus accidentogène, il y a au moins un ordre de grandeur (LIANG 2018).

Cependant, la fréquentation du PN, sur lesquelles beaucoup de modèles de risques sont basés, intervient nettement moins que la géométrie routière et les « cultures locales de sécurité » : de l'ordre d'un facteur trois entre premier décile et dernier décile de mo-

ment (voir section 2.2.3 Répartition et fréquence des types de PN en fonction de la fréquentation des lignes sur le réseau français) mais permet trait de comprendre les mécanismes d'accident.

L'analyse des accidents de PN, dans tous les pays, conclut à une très forte proportion, de l'ordre de 98 à $\cong$100 des accidents causés par une défaillance « routière », avec comme mécanismes générateurs d'accidents, soit une erreur de jugement du conducteur routier, soit un problème de cécité d'inattention (Liang 2018).

Les accidents de PN ont donc essentiellement les mêmes causes que les accidents routiers « ordinaires ». Cependant, ces accidents peuvent aussi causer des décès dans les trains, certes peu nombreux (l'espérance du nombre de décès ferroviaire est de 0,15 par an [2] contre 30 morts aux PN et 3000 sur les routes), mais de gravité très variable, et pouvant être catastrophique en cas de sur-accident par exemple *(i)* un heurt avec un camion transportant des matières dangereuses et possibilité d'explosion, *(ii)* ou encore déraillement avec engagement sur la voie opposée et heurt avec train de marchandises en sens inverse.

*Même si les accidents aux PN ne sont pas les accidents routiers les plus faciles à éviter, ce sont les seuls qui ont un réel potentiel catastrophique, bien au-delà des accidents de bus ou des carambolages en série, à cause du sur-accident.*

### 2.2.6 Environnement du PN : le PN comme carrefour souvent mal conçu

L'environnement « routier » du passage à niveau, la présence d'autres dangers particuliers (carrefours, tracés difficiles) ne figure ni dans les fichiers Sncf, ni dans les fichiers de l'ONISR consultés.

Or, la présence de dangers routiers « concurrents » du danger PN, plus fréquents, et avec lesquels le conducteur est plus familier qu'avec l'accident de PN, peut augmenter de façon importante le risque de distraction, de cécité d'inattention du conducteur, et par là contribuer à aggraver le risque (voir section 3.3 Les erreurs de jugement au passage à niveau).

Il n'était pas possible, dans le cadre de cette thèse, de reprendre la totalité des PN français et de recréer une base de données avec ces informations manquantes. Cependant, pour quantifier l'insertion du PN dans son environnement routier, un échantillon d'une centaine de PN à SAL a été choisi de façon à qu'il soit représentatif de la population des PN en France (environ 13000).

**Carte des PN retenus pour l'échantillon** L'échantillon a été sélectionné pour respecter le plus possible deux contraintes :

— Répartition géographique « aléatoire » proche de la densité des PN sur le réseau français (figure 23).

2. Calcul personnel d'après les statistiques Sncf 1993/2024 : 0,1 collision et 0,15 décès suivant une loi de Poisson

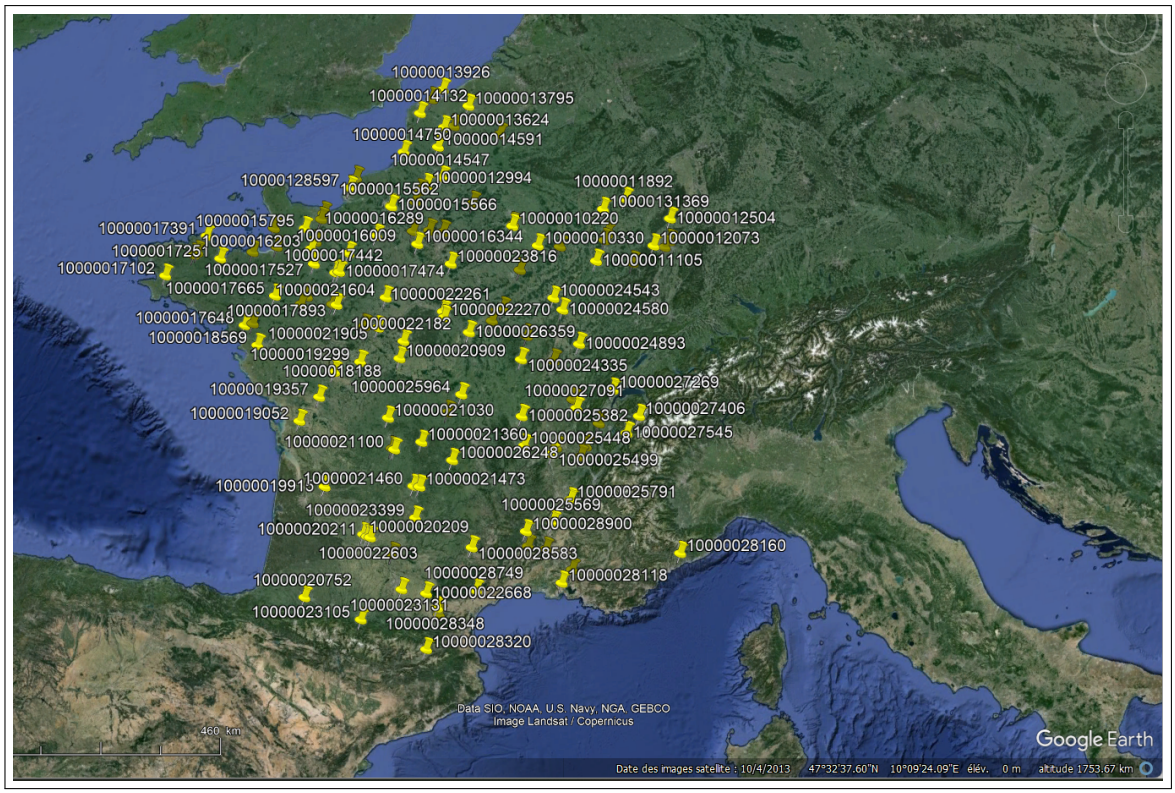



FIGURE 23 – Échantillonnage d'une centaine de PN SAL avec données d'insertion routière (seuls les PN à SAL ont été pris en compte)

TABLE 4 – Facteurs de risques associés à la géométrie du PN (en effectif total sur notre échantillon Calcul O. Cazier d'après échantillon PN SAL)

| Facteurs de risques associés à la géométrie du PN | Côté 1 | Côté 2 |
|---|---|---|
| Alignement ou courbe modérée | 40 | 47 |
| Tracé/profil difficile | 10 | 9 |
| Sas avec T | 8 | 2 |

TABLE 5 – Facteurs de risques causés UNIQUEMENT par la géométrie en proportion de l'effectif sur notre échantillon (Calcul d'O. Cazier d'après échantillon PN SAL).

| | 1 côté | Les deux côtés |
|---|---|---|
| Facteur de risque | 31,03% | 18,97% |
| Dont cécité d'inattention | 17,24% | 15,52% |
| Dont cécité d'inattention et erreur de conduite | 13,79% | 3,45% |

— Distribution des moments de l'échantillon proche de celle des PN du RFN

**Identification des « facteurs de risque » de cécité d'inattention ou d'erreur de jugement du conducteur présents dans notre échantillon**

**Tracé routier** Le tableau 4 recense les facteurs de risques liés à la géométrie du croisement au PN et le tableau 5 indique qu'une proportion élevée de passages à niveau (1/3) présente des sur -risques liés à la géométrie du PN.

TABLE 6 – Carrefours à proximité des PN (Calcul O.Cazier d'après échantillon)

| | Côté 1 | | Côté 2 | |
|---|---|---|---|---|
| Distance PN/ accès en mètres | **Carrefour 1** | **Carrefour 2** | **Carrefour 1** | **Carrefour 2** |
| 0 | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 10 | 5,17% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 20 | 27,59% | 8,62% | 3,45% | 1,72% |
| 30 | 15,52% | 6,90% | 5,17% | 1,72% |
| 40 | 5,17% | 1,72% | 5,17% | 0,00% |
| 50 | 10,34% | 5,17% | 3,45% | 1,72% |
| 60 | 5,17% | 1,72% | 3,45% | 1,72% |
| 70 | 1,72% | 1,72% | 1,72% | 1,72% |
| 80 | 3,45% | 1,72% | 3,45% | 0,00% |
| 90 | 1,72% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 100 | 0,00% | 1,72% | 0,00% | 0,00% |
| *Total* | **75,86%** | **29,31%** | **25,86%** | **8,62%** |

Dans la mesure où il n'existe pas de document « global » permettant de prendre conscience de ce point, notre interprétation est qu'il n'a probablement jamais été pris en compte dans les modélisations précédentes.

**Facteurs de risques liés aux différents flux routiers** Le tableau 6 analyse les carrefours à proximité des PN dans l'échantillon (Le côté 1 est, par convention, le côté du PN où se trouve le carrefour le plus proche).

Les trois quarts des PN ont un carrefour à proximité, et 10% en ont 4. Or, la présence de carrefours, à des distances à moins de 100m du PN, peut attirer de façon prioritaire l'attention des conducteurs et augmenter de façon non négligeable le risque de cécité d'inattention, et donc le risque d'accident au PN.

Le PN n'a probablement jamais été réellement intégré comme un élément de risque routier, mais simplement juxtaposé à d'autres éléments routiers.

### 2.2.7 Conclusions

- La largeur des franchissements des passages à niveau, en France, semble un peu faible pour permettre, sans perte d'attention vis-à-vis du risque PN, le croisement d'un véhicule avec un véhicule de grand gabarit comme un camion ou un engin agricole, et le retour d'expérience montre qu'il s'agit là d'un mécanisme d'accident important.
- **Il faut d'ores et déjà** recommander à tous les gestionnaires routiers ainsi qu'à SNCF Réseau qu'ils prévoient, en cas de travaux sur les accès à un PN, d'homogénéiser la largeur de passage entre le PN et les voiries adjacentes, et de porter cette largeur à un niveau suffisant pour permettre le croisement de véhicules sans pertes d'atten-

tion. **Et de fermer le PN plutôt que de faire un alternat pour les travaux routiers adjacents à un PN.**

— *À défaut de cette mesure, ou quand elle se révèle impossible, il serait utile de mettre en sens unique le PN, ou d'interdire (de préférence physiquement en plus de la signalisation par des portiques G3) l'accès au PN à des véhicules lourds.*

— La technologie des passages à niveau joue fortement, toutes choses égales par ailleurs, sur l'accidentologie : entre un PN à X, un SAL 2 et un SAL 4, l'écart de risque de collision est de l'ordre de 1 à 7 entre PN à X et SAL 2, de 1 à 2 entre SAL 2 et SAL 4 au moins pour les moments « élevés »

— La durée d'annonce exerce probablement une influence mais elle est probablement dépendante d'autres paramètres comme le flux de véhicules, le type de PN c'est l'un des points ou la modélisation est la plus utile.

— La gravité des accidents est un résultat pour l'instant difficile, voire impossible à modéliser. Dans la suite de la thèse, l'option de MORIPAN, de s'intéresser uniquement aux collisions des modes motorisés, qui sont beaucoup plus faciles à modéliser que les variables décès ou blessés graves, qui dépendent fortement de paramètres non renseignés (occupation, masse du train et de l'obstacle, nature de l'obstacle), a été maintenue.

— Le taux d'accidents aux PN est très corrélé à la sécurité routière en général (LIANG 2018) *or malheureusement, les passageà niveau ne semblent pas avoir été pris en compte comme « carrefour », ni en ce qui concerne leur géométrie, ni en ce qui concerne les flux routiers et la présence de carrefours proches.*

*Ce point a une importance extrême : la prise en compte, par les gestionnaires routiers du PN de l'ergonomie routière et la mise au point de méthodes de sécurisation routières (à priori différentes de celles d'un carrefour ordinaire) serait une source de progrès considérable.*

# Chapitre 3

# État de l'art et bibliographie : les mécanismes d'accidents aux passages à niveau

## Table des matières


3.1 Types d'accidents aux PN en France et dans le monde . . . . . 55

3.1.1 Comportement au niveau des PN . . . . . 55

3.1.1.1 Comportement au niveau des passages à niveau à stop ou croix de Saint-André . . . . . 55

3.1.1.2 Comportement des conducteurs aux passages à niveau munis de signaux lumineux, mais sans barrières . . . . . 57

3.1.1.3 Comportement des conducteurs aux passages à niveau munis de signaux lumineux et de barrières . . . . . 58

3.1.1.4 Comportement des piétons et modes doux aux passages à niveau . . . . . 60

3.1.1.5 Modèles de comportements et/ou des accidents . . . . . 62

3.1.2 Expérimentations de détecteurs d'obstacles par la SNCF en France : les expérimentations des DOPN des années 60/70 . . . . . 63

3.1.3 Expérimentations ultérieures de la SNCF en liaison avec le groupe PN et le CEREMA . . . . . 65

3.1.4 Raisons de l'échec en France . . . . . 65

3.1.5 Situation à l'étranger . . . . . 66

3.2 Modèle bayésien et apport à la compréhension des mécanismes d'accident 68
3.3 Erreurs de jugement au passage à niveau . . . . . 69
3.3.1 Environnement complexe . . . . . 69
3.3.2 Configurations routières particulières . . . . . 70
3.3.3 Mécanisme d'accident lié à l'erreur de conduite . . . . . 70
3.4 Cécité d'inattention . . . . . 71
3.4.1 Considérations générales . . . . . 71
3.4.2 Configurations routières particulières . . . . . 73
3.4.3 Lignes secondaires . . . . . 73
3.4.4 Mécanisme d'accident lié à la cécité d'inattention . . . . . 74

## 3.1 Types d'accidents aux PN en France et dans le monde

Le taux d'accident annuel aux passages à niveau est très bien corrélé à l'accidentologie routière (Liang, Ghazel et al. 2018a), et d'après la Sncf, 98% des accidents de passage à niveau sont dus à une cause « routière ». [1]

Les statistiques d'accidents « ordinaires » ont fait l'objet de nombreuses études et publications internationales, dont l'une des plus complètes est le *National Motor Vehicle Crash Causation Survey : Report to Congress*2008.

Ce rapport analyse les causes primaires d'accident, et pointe sur une majorité (de l'ordre de 90%) d'erreur humaine dans les causes primaires d'accident, et une proportion équivalente d'erreur de jugement et d'erreur d'inattention (40/40), dont 20% de cécité d'inattention au sens strict.

Le type d'accident de la route le plus proche de nos accidents de passage à niveau est l'accident à un carrefour dû au non-respect du feu tricolore. Ce phénomène a été bien étudié, et, à défaut d'en connaître les remèdes, les facteurs influençant le non-respect du feu rouge sont bien connus (J. Bonneson, Brewer et K. Zimmerman 2001) :

— Durée du feu jaune d'avertissement. Elle est entre 3 et 5s, dépendant de la vitesse maximale autorisée (5 s correspond à 55 mph, soit environ 90 km/h) ;
— Mauvais réglage de la synchronisation des feux.

Le feu tricolore « traditionnel » a trois aspects (rouge/orange/vert) qu'on peut rapprocher des trois aspects d'un PN à feux et barrières (Non activé, clignotant barrière haute, barrière en mouvement) et les différences de comportement pourraient s'expliquer, soit par les différences du système, soit par des durées très différentes entre l'orange et le comportement des conducteurs à un passage à niveau, ce que l'on va détailler par la suite.

### 3.1.1 Comportement au niveau des PN

#### 3.1.1.1 Comportement au niveau des passages à niveau à stop ou croix de Saint-André

Le cas des passages à niveau non équipés de barrières montre un comportement complexe (Beanland, Filtness et Jeans 2017) et figure 24 :

— Une partie des conducteurs stoppe et regarde si un train est à l'approche.
— Une partie des conducteurs ralentit très fortement et regarde si un train est à l'approche.
— Le comportement et l'attention portée à l'arrivée d'un train ne semblent pas différents entre les conducteurs stoppant entièrement et ceux ralentissant fortement.
— Une partie des conducteurs n'arrête pas, mais la plupart regardent quand même « sommairement » si un train arrive.
— Le comportement est fortement corrélé à la vitesse d'approche du passage à niveau.

Il pourrait ne pas s'agir de cécité d'inattention au sens strict, car la plupart des conducteurs semblent conscients de l'existence du passage à niveau, mais ils n'ont jamais rencon-

1. La réalité semble plutôt être 99 à 99,5%

TABLE 7 – Performances de perception d'un train à l'approche d'après (LARUE et al. 2018)

Variability in performance between participants, as highlighted by the percentiles of train and train movement detections, and moment when it is no longer safe to cross.

| | Train detected | | Train movement detected | | No longer safe to cross | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Percentile** | Distance (m) | Time (s) | Distance (m) | Time (s) | Distance (m) | Time (s) |
| **0%** | 1,347 | 39 | 821 | 24 | 205 | 6.1 |
| **15%** | 1,851 | 58 | 1,154 | 33 | 381 | 10 |
| **50%** | 2,276 | 67 | 1,680 | 49 | 505 | 15 |
| **85%** | 2,399 | 71 | 2,059 | 63 | 877 | 26 |
| **100%** | 2,526 | 73 | 2,384 | 71 | 1,411 | 39 |

tré de trains à ce passage, et ils sous estiment grandement le risque. *La cécité d'inattention ici concerne pas le PN, mais plutôt le train à l'approche*[2].

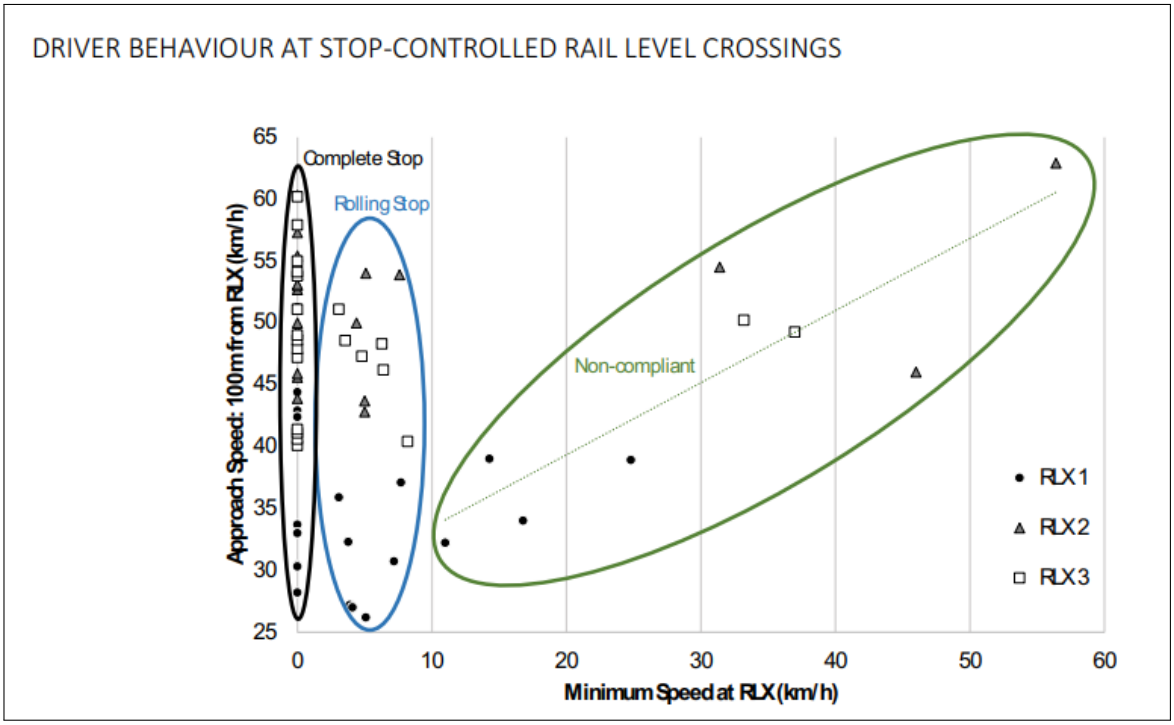



FIGURE 24 – Comportement du conducteur selon la vitesse au passage à niveau de type stop

Par contre, même les conducteurs qui stoppent ou ralentissent fortement et examinent attentivement, sous-évaluent fortement la vitesse du train, et ils traversent souvent trop tardivement, donc en situation de danger (LARUE et al. 2018) : si les participants de l'étude ont bien vu un train à une distance de 2150 m, perçu que le train était en mouvement jusqu'à 1650 m, la distance moyenne à laquelle ils considéraient qu'il n'était plus raisonnable de traverser était de moins de 600m avec de fortes variations individuelles, et 15% des personnes ayant moins de 10 s pour traverser avant la collision (tableau 7).

Cette forte sous-estimation de la distance de sécurité, liée à une sous-estimation de la vitesse, confirme que les accidents de passage à niveau à croix de Saint-André pourraient

2. Il semble qu'on ait un problème analogue avec les PN à feux et barrières : la cécité d'inattention ne concerne pas le PN, mais son état d'activation.

être en partie causés par « l'Illusion de Leibowitz » (Leibowitz 1985) : on sous-estime la vitesse et la distance d'un objet de grande taille et peu familier, car on se base sur la vitesse de variation de l'angle solide angulaire. Des recherches plus récentes (Clark et al. 2017) ont confirmé la réalité de ce mécanisme d'accident. Une autre partie des accidents est probablement liée au « looked but not seen » cad la cécité d'inattention : Les conducteurs qui ne ralentissaient pas étaient conscients de l'existence du passage à niveau, mais convaincus, n'y ayant jamais croisé de train, que le risque était mineur, et leur coup d'œil pour vérifier la présence d'un train était « symbolique ».

En résumé, il semble donc que les accidents aux passages à niveau munis d'une signalisation fixe et sans barrières aient deux causes principales :

- **L'erreur de conduite** : une forte sous-estimation du risque, 85 % des conducteurs soit marquent l'arrêt (environ 60%) soit ralentissent significativement, mais malheureusement, tous sous-estiment fortement la vitesse du train, et donc seraient susceptibles de traverser dans des conditions qui ne leur laissent aucune marge en cas d'incident.
- **La cécité d'inattention** : elle est cause d'une proportion significative des accidents aux passages à niveau munis de Barrières (Bea-Tt 2019). Aux passages à niveau sans barrières, le comportement des 15% de conducteurs qui n'arrêtent pas est assez typique de la cécité d'inattention : ils affirment savoir que le PN est là, mais ne ralentissent pas, regardent très sommairement en expliquant qu'il n'y a jamais de train et s'il y avait un train, il est probable qu'ils le « verraient, mais ne le remarqueraient pas », et il n'est pas exclu que ce soit aussi le cas d'une proportion importante des conducteurs qui marquent l'arrêt (ils remarquent le PN qu'ils franchissent régulièrement et dont ils anticipent la présence, ils s'arrêtent, mais ne remarquent pas le train dont ils anticipent l'absence)

Il ne semble pas qu'il y ait de différence significative de comportement entre les passages à niveau avec Stop et ceux avec croix de Saint-André.

#### 3.1.1.2 Comportement des conducteurs aux passages à niveau munis de signaux lumineux, mais sans barrières

En France, il n'y a plus de passages à niveau équipés uniquement de feux clignotants, sauf en zone urbaine avec des circulations de type tramway. La comparaison directe n'est pas possible. Cependant, les observations faites en Australie (Radalj 2025) ont montré un comportement très différent aux passages à niveau munis de barrières par rapport aux passages à niveau équipés simplement de feux ( figure 25) : dans le cas des passages à niveau munis de barrières, le taux de passage routier reste constant pendant quelques secondes, puis chute exponentiellement pour devenir « non mesurable » lorsque la barrière d'entrée approche de la position basse, alors qu'en absence de barrière, la diminution du flux traversant est beaucoup plus progressive.

La figure 26, tirée de données allemandes (Vijendran, Stevens et Beard 1999) montre que les mêmes observations restent valables pour des durées d'annonces beaucoup plus

longues, mais les auteurs donnent peu de détails sur les circonstances et les conditions de leurs mesures.

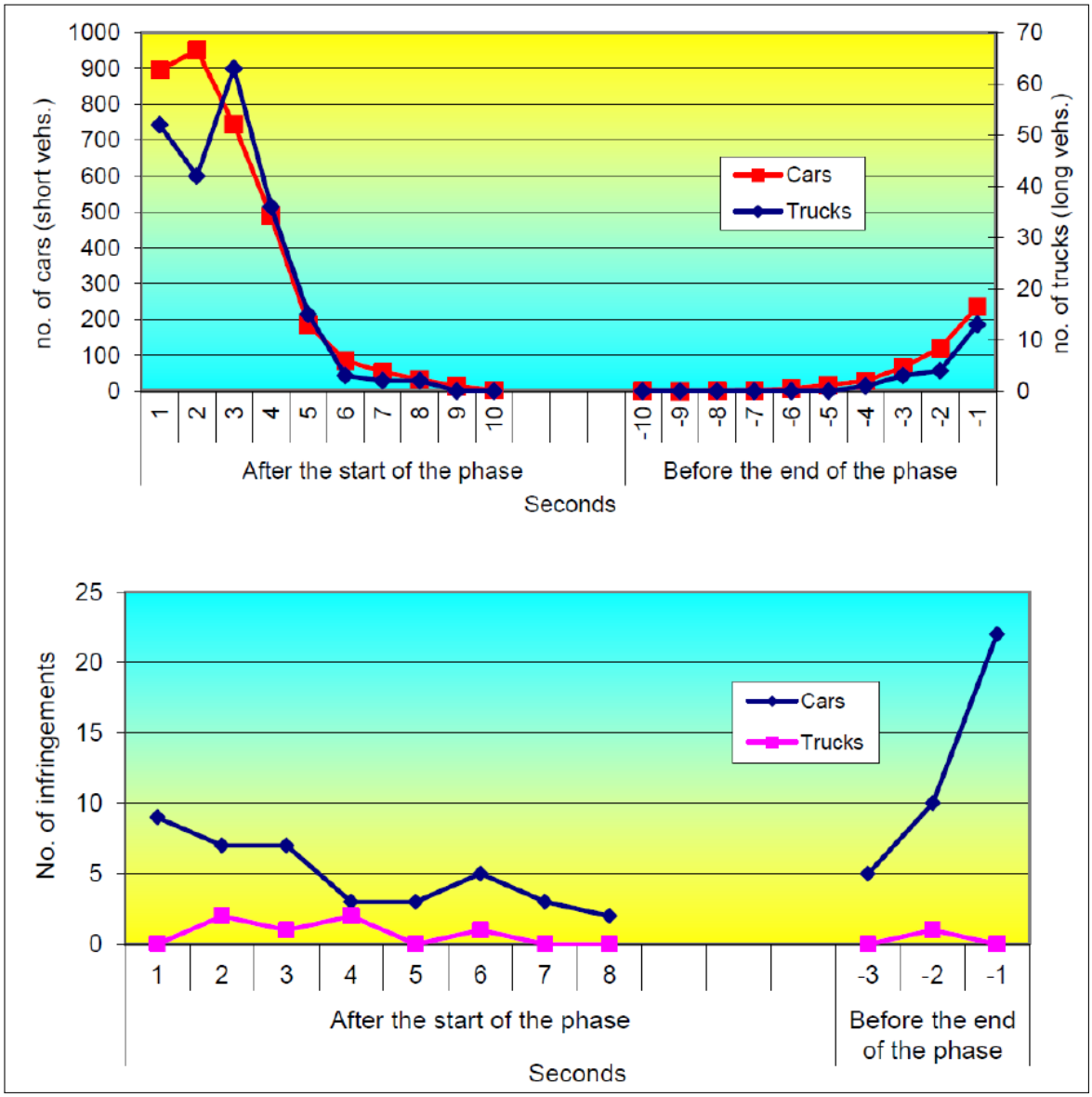



FIGURE 25 – Distribution des flux de passage après début du clignotement pour des PN à feux et barrières et pour des PN à feux seulement (RADALJ 2025)

#### 3.1.1.3 Comportement des conducteurs aux passages à niveau munis de signaux lumineux et de barrières

L'observation pendant plusieurs mois de 13 passages à niveau dans le cadre du projet MORIPAN (LIANG, GHAZEL et al. 2018b) a permis de donner une base statistique fiable aux observations du comportement des conducteurs. Ils confirment d'ailleurs les conclusions de (RADALJ 2025) en ce qui concerne les PN à feux et barrières. La présence de barrières modifie très fortement l'accidentologie au passage à niveau à barrières, comparé à une intersection routière ou à un passage à niveau dépourvu de barrière.

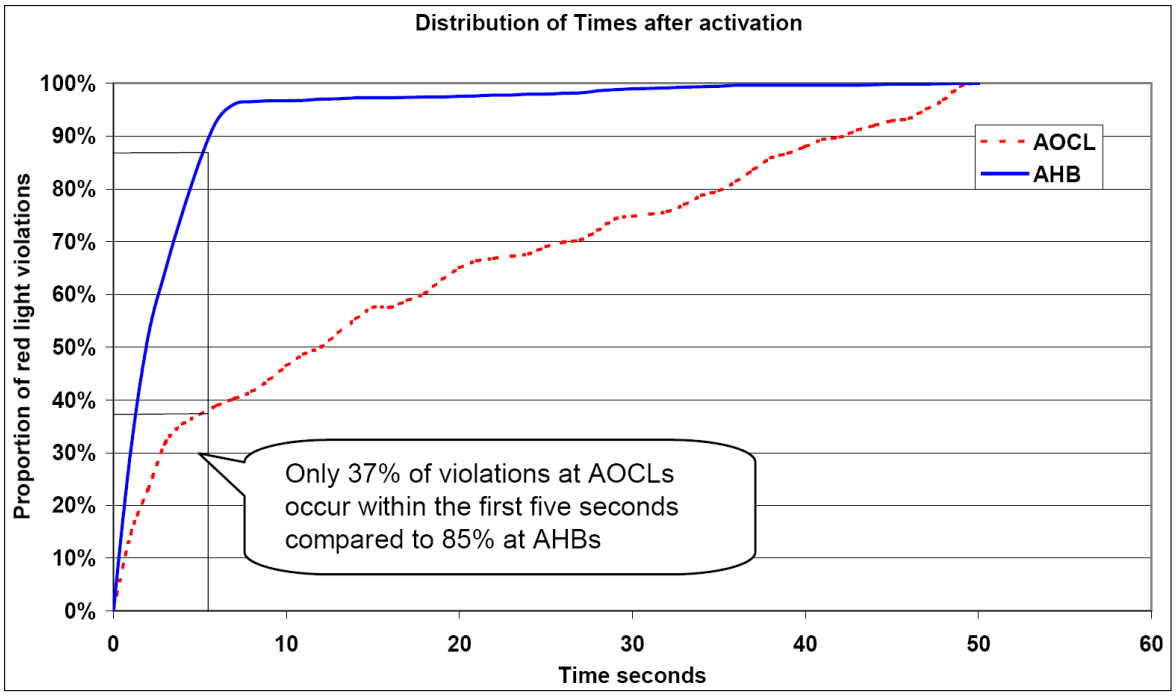



FIGURE 26 – Comportement des conducteurs en Allemagne sur des PN à deux demi-barrières (AHB) et des PN à feux sans barrières (AOCL : Automatic Open crossing locally monitored) – (VIJENDRAN, STEVENS et BEARD 1999)

Lors des essais de MORIPAN, le franchissement des barrières par un véhicule motorisé après fermeture de celle-ci est très rare sur 1 700 000 observations et 9 000 passages pendant le cycle d'activation. Ce qui a été vu est essentiellement des passages tardifs pour les véhicules motorisés, plutôt que de vraies chicanes, et ces passages très rares semblent indépendants de la durée écoulée depuis l'activation (Distraction ?) et pourraient concerner davantage les deux roues que d'autres véhicules motorisés.

Ce comportement est assez voisin de celui observé sur les feux tricolores routiers, où une majorité des infractions au feu rouge a lieu peu après la transition jaune-rouge, et provient là aussi de conducteurs ayant vu le feu jaune et considérant qu'il reste assez de temps pour le franchir (J. A. BONNESON et K. H. ZIMMERMAN 2004).

Les franchissements barrières fermées sont relativement courants, au contraire pour les modes doux. Pour les véhicules motorisés, les deux modes principaux d'accidents aux PN semblent bien être :

— *L'erreur de jugement* : passage sur le PN suivi d'une immobilisation due à un second incident : panne, remontée de file, sortie du platelage, problème de gabarit bas (Dos d'âne) ou haut (caténaire), voire manœuvre sur le passage à niveau
— *La cécité d'inattention* : soit sous sa forme classique (on ne voit pas un phénomène parce qu'on anticipe son absence), soit sous forme de « change blindness », la cécité au changement (on ne regarde pas l'objet au moment de son activation, soit parce que l'on regarde autre chose, soit pour des raisons physiologiques, clignement d'yeux, et lorsqu'on le regarde à nouveau, on ne remarque pas qu'il a changé).

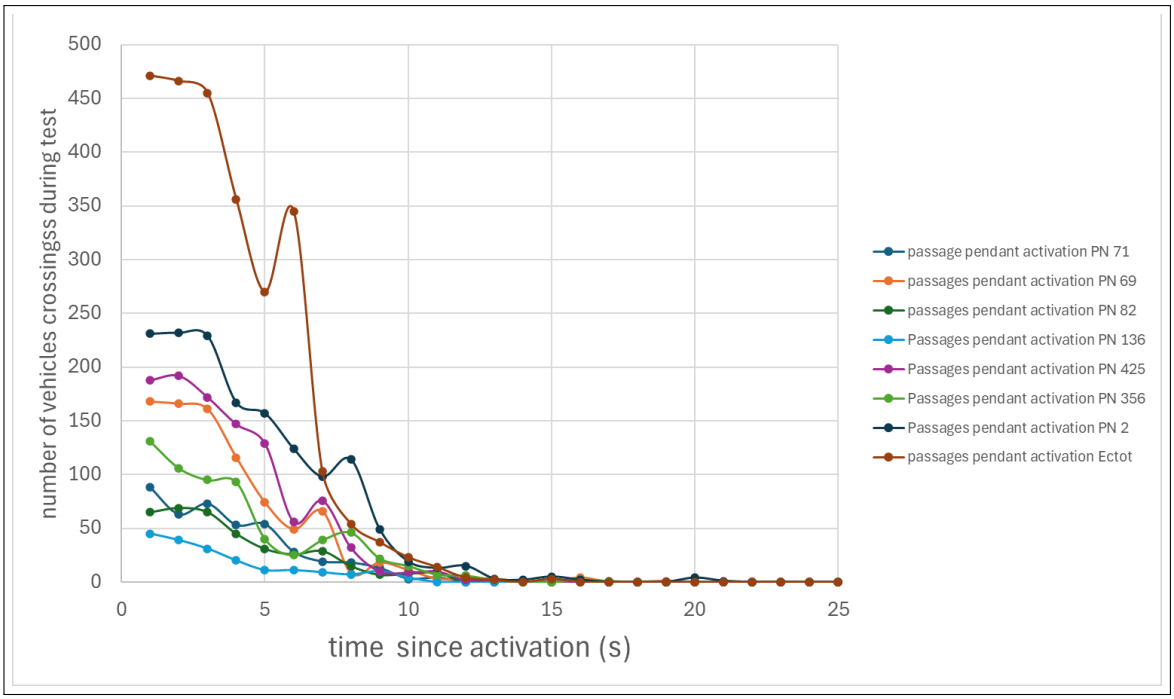



FIGURE 27 – Exemples de comportement mesurés sur MORIPAN par PN, en nombre de véhicules traversant le PN en fonction du temps écoulé depuis l'activation

L'erreur de jugement a été observée par la SNCF lors des essais de détecteur d'obstacle sur le passage à niveau de Roissy-en-Brie, mais pas sur aucun des autres sites. Cependant, ils ont pu observer, toujours sur Roissy-en-Brie, mais pas sur les autres sites, plusieurs dizaines d'incidents (Communication avec SNCF, Sriranjan Sarouthan et Mathieu Gueraud, 2018/2023).

La cécité d'inattention n'a jamais été observée directement, mais elle est la seule explication cohérente pour certains accidents de passage à niveau, dont la catastrophe récente de Millas.

Les observations de (LIANG, GHAZEL et al. 2017) ont porté sur plusieurs types de configuration de passages à niveau :

— onze PN à deux demi-barrières et deux PN à quatre demi-barrières
— quatre PN à proximité de gares et neuf PN éloignés de gare

Il n'a pas été constaté de différence de comportement conducteurs entre les PN à deux demi-barrières et celui à quatre demi-barrières. Cependant, et uniquement aux heures de pointes, le taux de passages tardifs (après 7 s) était légèrement plus élevé pour les passages à niveau à proximité de gares aux moments où des services à quai pouvaient entrainer des fermetures longues.

#### 3.1.1.4 Comportement des piétons et modes doux aux passages à niveau

Les accidents liés aux mobilités douces sont moins bien connus et moins étudiés que ceux liés aux modes motorisés et semblent significativement différents, avec notamment beaucoup de chicanes d'après les retours du terrain.

Malheureusement, la plupart des études ont porté sur des PN très accidentogènes et un nombre très limité de configurations., essentiellement des passages à niveau de gare. L'analyse devra donc s'interroger sur un possible biais d'échantillon.

Il y a cependant quelques travaux d'observations exploitables comme (Stefanova, Burkhardt et al. 2015) et (Stefanova, Oviedo-Trespalacios et al. 2018). Parmi les facteurs aggravant le risque d'accident, les auteurs ont constaté :

- La densité de population et la présence de points d'intérêt pour les piétons (écoles, centres commerciaux),
- Un nombre réduit de voies à traverser,
- Des catégories à risque : les jeunes adultes sont ceux qui traversent le plus souvent, les personnes âgées et les scolaires traversent surtout en groupe.

L'équipement du passage à niveau va influencer le comportement des piétons : lorsqu'il y a un équipement de type feux et barrières complètes ou quatre demi-barrières, le comportement global est voisin de celui des modes motorisés, avec une majorité des transgressions avant fermeture complète des barrières ou après début d'ouverture.

On peut cependant supposer que pour les incidents/accidents modes doux, l'erreur de jugement est plus importante que pour les modes motorisés, que l'esquive est probablement un phénomène important, car plus de 50% des incidents rapportés par le terrain impliquent des piétons ou des modes doux, ce qui serait cohérent avec un ratio Inattention/imprudence inférieur à celui des modes motorisés, probablement à cause de l'effet Leibowitz déjà évoqué pour les passages à niveau à croix de Saint-André.

Le risque « un train peut en cacher un autre » est bien réel, aggravé par le biais du risque souligné par Cesare Beccaria (*Des délits et des peines* 2025) : le risque mineur de manquer son train ou d'arriver quelques minutes en retard l'emporte sur le risque majeur d'être tué, et l'attention se fixe sur le risque mineur au lieu du risque majeur, avec d'ailleurs un biais d'âge et de genre : ce risque est plus souvent associé aux adolescents et jeunes adultes masculins, plutôt qu'aux personnes âgées.

En ce qui concerne les résultats quantitatifs (malheureusement sur un tout petit nombre de sites, mais à la fois très équipés et très accidentogènes), les auteurs ont constaté des variations très significatives entre sites du taux de franchissements tardifs pour les modes doux, contrairement à ce qui avait été constaté (Liang, Ghazel et al. 2018a) pour les modes motorisés, et avec, dans certains cas, des taux très élevés. En effet, sur un site, plus d'un tiers des fermetures observées comportaient des franchissements après activation, et un tiers de ces franchissements, soit une dizaine de pour cent, avaient lieu après fermeture des barrières.

Par rapport aux modes motorisés, les franchissements tardifs pour les modes doux sont donc très nombreux. Les circonstances du franchissement sont aussi très variables, une majorité des cas étant un franchissement tardif devant un train à l'approche. Sur les sites avec peu d'infractions, le franchissement tardif peut représenter la quasi-totalité des

franchissements, mais des franchissements derrière un train, à l'arrêt et à l'approche d'un train croiseur, semblent plus fréquents sur les sites où il y a beaucoup d'infractions.

Sans que cela puisse être une certitude, compte tenu des biais déjà mentionnés et du petit nombre de sites, les observations portant sur les piétons seraient compatibles avec les hypothèses suivantes :

- **Un taux d'erreur de jugement plus élevé que pour les modes motorisés**, se manifestant par des « vraies chicanes » en proportion très variable, mais globalement nettement plus élevé que pour les modes motorisés.
- **Un taux de cécité d'inattention significatif**, et, les barrières étant moins étanches que pour les modes motorisés, moins ou pas du tout d'effet Stott.
- **Le pourcentage de traversées plus ou moins tardives, en moyenne relativement élevé**, mais extrêmement variable, avec une majorité (65%) de jeunes adultes et d'adolescents d'âge scolaire, moins de femmes que d'hommes et assez peu de personnes âgées.
- *Plus de 70% des traversées en infraction correspondaient à des franchissements tardifs pour prendre un train sur le quai opposé.*
- **Une esquive probablement beaucoup plus importante** que pour les modes motorisés, avec un ratio accidents/incident beaucoup plus faible.

Globalement, on manque de données sur les incidents/accidents de mode doux, avec un nombre d'observations trop faible, sur un nombre de sites restreint, et dans des configurations très particulières pour pouvoir modéliser ce type d'accidents.

Cependant, même si les éléments connus ne permettent pas de modélisation quantitative, ils permettent d'esquisser quelques hypothèses quant :

- Aux passages les plus vulnérables : sites urbains, proximité de points d'intérêt pour des piétons (écoles, zones commerciales, et gares).
- Aux mécanismes d'accident : effet Leibowitz, cécité d'inattention (et notamment focalisation sur un risque mineur d'être en retard par rapport au risque de collision).
- Aux moyens de réduire le risque : anti-trespass, calfeutrement autour du passage à niveau, quatre demi-barrières et jupes sous barrières, voire barrières d'entrevoie.

#### 3.1.1.5 Modèles de comportements et/ou des accidents

Les accidents ferroviaires sont très rares et les difficultés de mise en place d'un « modèle » pour l'accidentologie, analyse des défaillances possibles du système et définition des enchaînements d'événements, avec des probabilités de passage d'un événement au suivant, sont importantes. Cependant, les passages à niveau sont l'un des sous-systèmes ferroviaires avec la plus forte accidentologie et sont installés à plusieurs milliers d'exemplaires rien qu'en France, avec une centaine d'accidents annuels. Ainsi, pour une première démarche de démonstration, le PN est probablement idéal.

Certains réseaux (UK, Australie, Allemagne, etc.) exploitent à titre opérationnel des modèles de risques aux PN, mais aucun n'a fait l'objet de publications scientifiques. La première formulation explicite d'un « modèle » de PN a été faite par Mohamed Ghazel sous

forme d'un réseau de Petri stochastique (GHAZEL 2010) mais avec un modèle essentiellement descriptif dû au fait qu'il n'y avait que très peu d'observations de PN réels.

Le projet MORIPAN (2015 /2018) a été l'occasion de combler cette lacune.

L'objectif de ce projet était essentiellement d'exploiter le retour d'expérience des accidents de PN, et de fournir un modèle statistique permettant d'identifier les passages à niveau les plus « problématiques » et de prévoir de façon fiable leur risque d'accident.

Cependant, pour comprendre si la variabilité du risque était due au comportement des conducteurs, on a observé pendant une période longue (6 mois) 12 PN SAL 2 choisis comme représentatifs des PN du réseau français, plus un PN SAL 4 comme « contrôle ».

Ces observations, décrites dans la thèse de Ci Liang (LIANG 2018) ont permis de démentir de nombreuses idées reçues [3], et d'évaluer « statistiquement » le comportement des conducteurs face à un PN.

### 3.1.2 Expérimentations de détecteurs d'obstacles par la SNCF en France : les expérimentations des DOPN des années 60/70

Dans les années 60, la SNCF était l'un des réseaux les plus modernes et les plus innovants, et, sous l'impulsion de Louis Armand et de ses collaborateurs, elle a, plus que tout

3. Par exemple, on a observé très peu de vraies chicanes. essentiellement des passages « un peu tardifs », ni vu de différence de comportement entre SAL 2 Et SAL 4

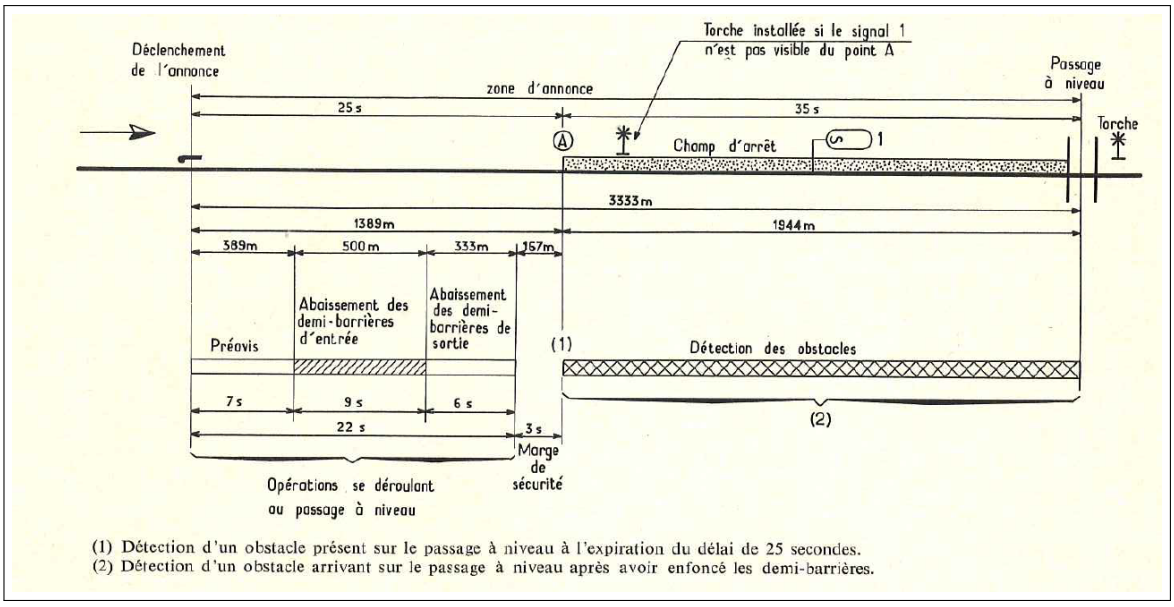



FIGURE 28 – De 1968 à 1980, la France a expérimenté, avec un certain succès, des détecteurs d'obstacles (RGCF 1975)

autre réseau, contribué à mettre au point les innovations qui allaient marquer le chemin de fer du dernier quart du 20e siècle : Voie sur Dalle expérimentée sur Paris Toulouse et sur la grande ceinture, Grande Vitesse en collaboration avec les Japonais, et détecteurs d'obstacles aux passages à niveau.

Elle a notamment expérimenté des détecteurs d'obstacles, basés sur des faisceaux d'ondes radars centimétriques, à peu près en même temps (et probablement en liaison, car les deux réseaux collaboraient régulièrement) avec les JNR.

**L'expérimentation a été considérée comme un succès en France comme au Japon, l'utilisation des détecteurs a été validée dans l'arrêté ministériel du 8 février 1973 et ils ont été rendus obligatoires pour V supérieure à 160 km/h.**

Les services techniques de l'équipement ont ensuite émis la Directive technique NG EF 5 B 64 n°7 qui donnait les instructions pour installer des détecteurs d'obstacles, qui a été signée par le directeur de l'équipement de la SNCF (Jean Alias) le 20 février 1979.

En 1982, début de démontage des 12 détecteurs existants dont la maintenance posait un problème.

Les raisons de l'abandon ne semblent pas claires et plusieurs raisons ont été données : rapport coût/efficacité faible (mais l'efficacité était donnée à 10%, ce qui n'était pas cohérent avec les essais, où l'on n'avait constaté aucun accident au lieu de trois accidents attendus avec l'accidentologie de l'époque), coût de maintenance, impossibilité de financement (la SNCF avait évalué que 2500 PN pourraient bénéficier de DOPN, n'avait pas les moyens de les équiper, et les partenaires potentiels comme l'État et les collectivités n'étant pas intéressés). À l'inverse, les JNR ont équipé progressivement leurs PN de détecteurs d'obstacles.

### 3.1.3 Expérimentations ultérieures de la SNCF en liaison avec le groupe PN et le CEREMA

| **Expérimentations ultérieures de la SNCF en liaison avec le groupe PN et le CEREMA** | **Conclusion Favorable** | **Non concluant** | **Rejeté** |
|---|---|---|---|
| Expérimentation de feux bicolores fixes sur 6 SAL 2 en 1982/1985 | | X | |
| Expérimentation de feux clignotants surélevés en 1985/1987sur 4 PN SAL 2 | | X | |
| Expérimentation de feux tricolores routiers en 1989 sur un PN SAL 2 | | X | |
| Pose de plaque zébrées et peinture zébrée sur potences de feux (24 PN) en 1994 : non concluante potence, négative plaques | | Potence | Plaques |
| Feux tricolores 50 m en amont du PN, sur 3 PN en 1997 : les automobilistes grillent le feu et arrêtent au PN | | | X |
| Films rétroréfléchissants sur portique G3 et signalisation avancée sur un PN en 1997 | | X | |
| Feux rouges clignotants sur potence sur 9 PN (1987-...) | X | | |
| Panneau à message variable sur 8 PN | X | | |
| Doublement des feux clignotants sur candélabres sur cinq PN | X | | |
| Feux tricolores sur route latérale sur 2 PN | X | | |
| Feu tricolore en remplacement du R24sur 4 PN en cas de carrefour à feux | X | | |
| Damier au sol sur 4 PN : | | | X |
| Expérimentations routières contre la cécité d'inattention après Port Ste Foy : | | | |
| — 1$^{er}$type : Thénioux et Nonant le Pin : conclusions favorables, mais difficilement interprétables ; nombreuses modifications par rapport au système actuel, dont certaines sont probablement efficaces comme l'augmentation du nombre de R24, et d'autres moins | X | | |
| — 2$^{e}$type : Juillié et Therasson ; dispositifs plus modestes, conclusion plutôt défavorable | | | X |
| Contrôle automatisé des franchissements (Lagny le sec, Hondeghem) | | X | |

### 3.1.4 Raisons de l'échec en France

On peut le voir avec la liste précédente : En France, on a beaucoup expérimenté d'innovations aux passages à niveau, mais à l'exception de l'aller-retour sur les DOPN et des radars de franchissement, on n'en a validé aucune.

L'examen de l'expérimentation sur les DOPN peut suggérer une première réponse : avec 144 années d'expérimentation sur des PN accidentogènes, on pouvait attendre de l'ordre de trois accidents au moins, et on n'en a constaté aucun.

Ces valeurs pointent vers une efficacité « probable » de l'ordre des 80/90% constatés par les Japonais dans leur retour d'expérience, mais même sur un essai aussi important et aussi long, il restait un intervalle de confiance très large de 10 à 100%. On pouvait conclure avec une certitude raisonnable que les DOPN étaient efficaces, mais le niveau exact d'efficacité ne pouvait pas être chiffré avec précision, ce qui a permis aux gestionnaires de conclure, en choisissant la borne basse, que le rapport coût efficacité était médiocre (même s'il était supérieur à celui d'une suppression par ouvrage).

Dans tous les cas, et même lorsque l'expérimentation a été accompagnée d'une instrumentation, **l'absence d'un modèle prédictif d'accident rend les conclusions fragiles** ; Il faudrait, en fonction de la précision requise, plus d'un millier d'années d'observation pour évaluer l'efficacité d'une de ces mesures, car en l'absence de modèle prédictif, on ne peut pas évaluer l'impact du changement éventuel de comportement des conducteurs à l'accidentologie, et même mesurer le taux de cécité d'inattention sur les PN à Barrières.

*En résumé, on ne peut pas malheureusement déduire grand-chose d'une expérimentation sur les PN, à moins d'accepter, comme l'ont fait certains réseaux (comme les JNR) de prendre le risque de dépenser des sommes relativement importantes, d'installer un nombre important de systèmes et de les observer pendant plusieurs années, ce qui est très difficile dans le contexte français ou les réseaux n'arrivent même pas à faire les investissements nécessaires pour pérenniser leur patrimoine* .

### 3.1.5 Situation à l'étranger

Globalement, la situation à l'étranger est voisine de la situation française, même si la France, à cause de problèmes de financement plus aigus, exige beaucoup plus de « preuves » pour accepter une innovation que les pays comparables, et beaucoup de pays ont adopté des changements, innovations, etc. sans études lourdes, mais n'ont pas fait non plus de retour d'expérience pour valider ou non leurs choix.

Un exemple est l'adoption de feux fixes rouges/jaunes aux PN en Allemagne en remplacement des feux clignotants, modification d'intérêt d'ailleurs « discutable »[4].

Concernant les DOPN, deux pays ont fait exception à cette règle, le Japon en 1996/1997 (ANANDARAO et MARTLAND 1998), une thèse en collaboration JR EAST MIT, et la Suède en 2004 (OLE 2005). Le plus sérieux REX est celui de JRE, mais il souffre de limitations importantes dues :

- À la nature même du risque PN : le risque est assez faible, ce qui impose des échantillons assez grands.
- Aux biais possibles d'échantillonnage : on équipe en général davantage les PN préoccupants

4. Notre analyse de la situation est que son impact a été négligeable.

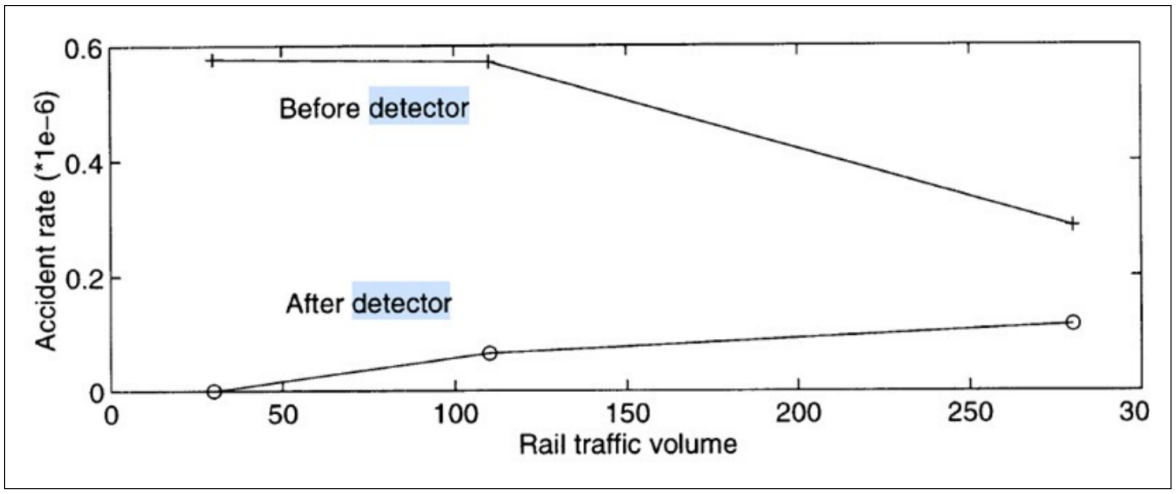



FIGURE 29 – Taux d'accidents au Japon en fonction du flux de train avec et sans DOPN d'après le REX PN de 1997 (ANANDARAO 1996)

### 3.7.6 Crossings by grade, and equipped with obstacle detector

Obstacle detectors have been very effective in reducing the number of accidents at Grade 1 crossings (as shown in Figure 3-26) [14]. The mean accident rate reduces by nearly a factor of 10 at crossings where obstacle detectors are installed. The mean rate decreases from 0.479 per million trains to 0.060 per million trains and is statistically significant (the null hypothesis is rejected at p=0.01). The monetary collective risk decreases from 59.62 million yen (per million trains) to 3.55 million yen (per million trains) and is significant (p=0.01).

FIGURE 30 – Extrait du REX de 1996 de JR EAST sur la sureté aux PN avec DOPN(ANANDARAO 1996).

Une des conséquences de ses limitations est que la réduction d'accident « moyenne » est significative (mais peut-être un peu surestimée, car biais d'échantillon probable) mais que la variation du gain en fonction du volume de circulation du PN présente une forte incertitude et est difficile à interpréter.

L'autre difficulté tient dans la différence entre les réseaux : à moment égal, le nombre de trains au Japon est deux à quatre fois élevé qu'en Europe, les trains y compris fret sont d'excellents freineurs, le nombre de véhicules deux à quatre fois plus faible, le PN de référence est plus proche de notre SAL 4 que du SAL 2 aujourd'hui, car il semble qu'au moins sur les moments faibles, les PN équipés de DOPN ont pu être proches de nos SAL 2B (2 barrières longues, avec une annonce à 31s).

Deux points importants :

— Une réduction de 88% du nombre d'accidents.

— Mais aussi, si on admet que le coût des accidents est représentatif de la gravité, une réduction de l'ordre de 50% des conséquences des accidents résiduels.

Dans le document de JRE, l'évolution des accidents est présentée en fonction du volume de trafic ferroviaire, ce qui est un premier problème : dans notre modèle, elle dépend davantage du Moment et du Nombre de véhicules, et uniquement indirectement (par la corrélation moment/trains) du nombre de trains.

Si l'on en croit la figure 30 pour la partie ayant un trafic train comparable à la France (30 trains par jour, dernier décile moins de 100 trains par jour), l'efficacité de réduction serait supérieure à 90%.

Mais elle semblerait aussi se réduire avec le nombre de trains au-dessus de 110 Trains/-jour, essentiellement parce que l'accidentologie des PN de référence sans DOPN diminue pour les PN très fréquentés.

On n'a jamais constaté ce type de diminution en France, mais il faut savoir que les moments des PN peuvent être au Japon très élevés, et qu'il n'y a pas en France assez de PN ayant des moments comparables pour pouvoir avoir des statistiques valides sur leur accidentologie.

## 3.2 Modèle bayésien et apport à la compréhension des mécanismes d'accident

Dans le cadre du projet MORIPAN, Ci Liang a développé un modèle Bayésien de risque aux passages à niveau, en deux étapes (LIANG, GHAZEL et al. 2018b).

— La première a été l'établissement d'un « a- priori » à partir du retour d'expérience de l'accidentologie des passages à deux demi-barrières de la SNCF entre 1995 et 2013. Cet a priori était déjà en lui-même un excellent modèle statistique, cohérent avec la quasi-totalité des passages à niveau.
— La seconde étape, le modèle Bayésien proprement dit, a généré un « a posteriori » à partir du modèle a priori et de l'historique individuel des accidents des passages à niveau.

L'examen des différences entre l'a priori et l'a posteriori issu des travaux de Mme Liang a permis de dégager un certain nombre de facteurs qui vont jouer dans l'accidentologie du passage à niveau « réel » avec un environnement routier complexe par rapport au passage à niveau « moyen ».

Parmi les facteurs identifiés de sur-risque, il y a :

— La présence d'un environnement routier complexe : carrefours et voirie parallèles proches de la voie ferrée, présence d'un point d'arrêt ou d'une gare.
— Un environnement susceptible de détourner l'attention du passage à niveau : travaux à proximité du PN (Saint-Médard), configuration routière « délicate » demandant au conducteur une attention sur d'autres points que le PN (Saint-Médard, Millas).

— Une configuration routière particulière : surlargeur du platelage PN par rapport aux voiries proches (manœuvres de croisement de véhicules sur le PN) ou variation de largeur au niveau de la voirie à proximité du PN (stationnement de véhicules engageant le gabarit).
— Des risques particuliers : dos d'âne ou caténaire.
— Un environnement routier « trop simple » : ligne secondaire, le plus souvent non électrifiée et très discrète dans le paysage, voirie rectiligne favorisant la perte d'attention

Il est bon de rappeler ici qu'en France, les statistiques « officielles » d'accidents aux PN excluent les suicides. Conformément à cette règle les actes de suicides ne seront pas inclus dans notre analyse.

Tout cela confirme qu'il existe au moins deux mécanismes distincts pouvant conduire à l'accident au passage à niveau :
— Un mécanisme d'erreur de jugement
— Un mécanisme de cécité d'inattention (Mack et Rock 1998)

## 3.3 Erreurs de jugement au passage à niveau

### 3.3.1 Environnement complexe

La complexité de l'environnement du PN peut jouer à la fois sur des mécanismes d'erreur de jugement, mais aussi de cécité d'inattention.

Concernant l'erreur de jugement, elle peut être facilitée par la présence d'un carrefour à faible distance du PN en aval de celui-ci : une difficulté de circulation au niveau de ce carrefour peut causer un blocage, l'immobilisation des véhicules précédents, et l'impossibilité de quitter la zone dangereuse pour un véhicule qui se serait engagé sur le passage à niveau.

La présence d'une gare peut avoir deux conséquences :
— Tout d'abord, elle peut inciter les conducteurs routiers à passer un peu plus tardivement (dans le cycle de fermeture) le passage à niveau, la plupart des conducteurs étant des habitués, et sachant qu'à certaines heures la fermeture est plus longue (Observations de Ci Liang /Moripan).
— Elle peut aussi, surtout pour les cyclistes et piétons (qui peuvent contourner facilement les barrières) inciter à traverser le passage à niveau même fermé, notamment si le train est à quai de l'autre côté des voies, mais dans ce cas, il est possible qu'une partie des traversées « dangereuse vienne d'erreur de jugement (effet Leibowitz) et une partie de la cécité d'inattention (on est focalisé sur le risque d'être en retard pour prendre son train, pas sur le risque au PN)

### 3.3.2 Configurations routières particulières

Les surlargeurs au voisinage d'un passage à niveau, ou au niveau du platelage sont statistiquement associés à un risque plus élevé (MORIPAN 2018), et le BEA-TT a noté, dans ses rapports, plusieurs exemples d'accidents dûs, soit à des manœuvres de croisement sur un PN, soit à des véhicules longs se garant peu après le PN, leur partie arrière ne dégageant pas le gabarit.

De même, les dos d'âne, ou les caténaires non protégées par portique G3 ont pu causer des immobilisations sur la chaussée.

### 3.3.3 Mécanisme d'accident lié à l'erreur de conduite

À l'exception des chicanes, les incidents causés par une erreur de conduite ont lieu relativement tôt dans le cycle du PN. Il reste plusieurs secondes au conducteur pour réagir, redémarrer, quitter la zone dangereuse.

La SNCF et JRE ont pu observer, notamment lors du retour d'expérience des essais de DOPN de Roissy-en-Brie de 2015 à 2018 (pour la SNCF) et des essais de DOPN pour JR EAST un certain nombre d'incidents suivi de redémarrage.

Même si le nombre observé par la SNCF (60 évènements) est un peu faible, il permet d'avoir une idée de la distribution du temps nécessaire pour qu'un véhicule arrêté puisse redémarrer et quitter la zone dangereuse et le résultat est cohérent avec les observations de JR EAST (figure 31).

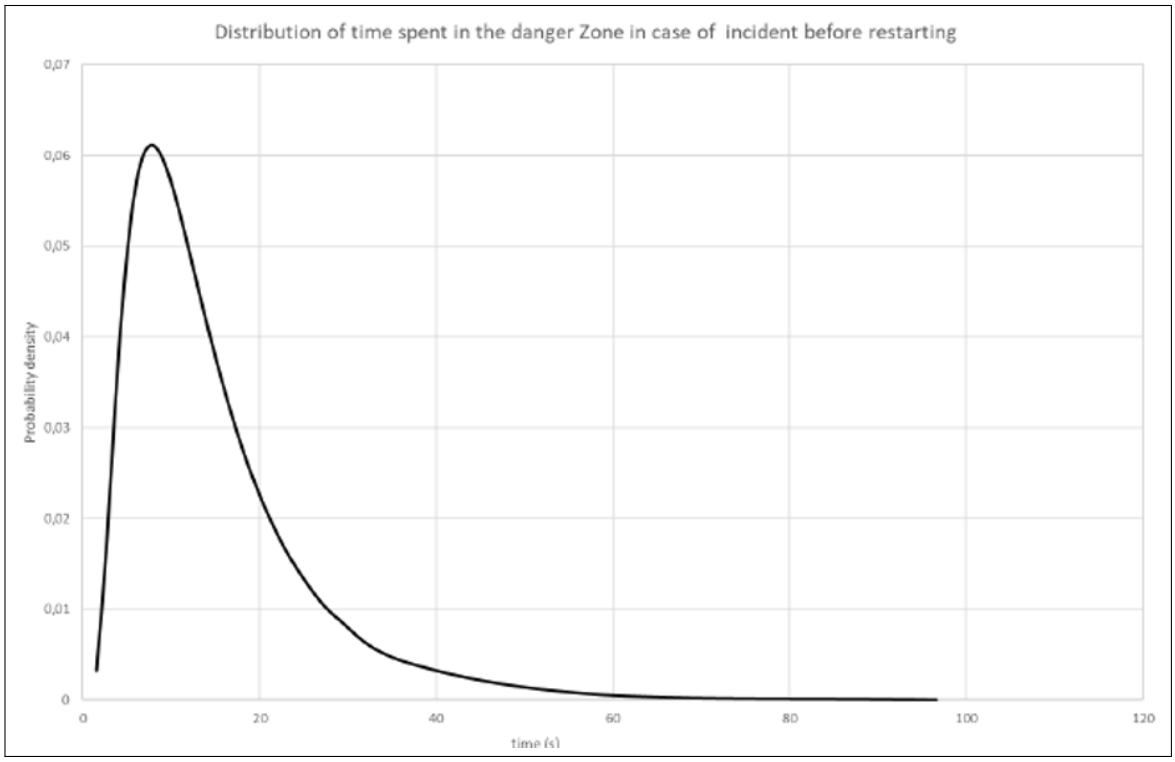



FIGURE 31 – Distribution du temps nécessaire pour redémarrer et s'échapper de la zone dangereuse. O. Cazier d'après données SNCF et JRE.

*On peut donc faire l'hypothèse ; en ce qui concerne les accidents dûs à l'erreur de conduite, qu'il s'agit en fait d'un mécanisme en quatre étapes :*

1. Le véhicule pénètre dans la zone dangereuse à t, en général avant la fin de la chute des barrières, le conducteur est conscient de la présence du PN et qu'il est activé, mais pense avoir le temps de franchir la zone dangereuse (analogue d'un « passage à l'orange », mais les 7 s de délai de clignotement et les 14 s avant fermeture complète peuvent réduire la sensation de risque par rapport aux 3 s / 5 s d'un feu orange).
2. Un premier incident (panne, sortie du platelage, raclage sur dos d'âne, remontée de file, etc.) provoque l'immobilisation du véhicule dans la zone dangereuse.
3. Le conducteur tente de redémarrer son véhicule.
4. Dans une partie des cas, il arrive à s'échapper. Dans d'autre cas, souvent lorsqu'il a pénétré tard dans la zone dangereuse, il n'y arrive pas et c'est l'accident.

## 3.4 Cécité d'inattention

Dans ce mécanisme d'accident, le conducteur peut-être (ou non) conscient de la présence du PN (surtout s'il est un habitué), mais il n'a pas conscience de son activation.

### 3.4.1 Considérations générales

L'une des difficultés vis-à-vis de la cécité d'inattention est que cette notion est en fait mal connue, et que malheureusement, les différentes études sur le sujet présentent parfois des résultats incohérents.

Par exemple, (Wood et Simons 2019) ont étudié quantitativement les mécanismes de cécité d'inattention, et ont conclu que la durée d'exposition au signal influait peu : soit on remarque immédiatement le changement, soit allonger l'exposition au signal modifié ne change pas significativement le risque.

À l'inverse, (Kreitz, Furley et Memmert 2015) conclue qu'augmenter la durée d'exposition au signal modifié réduit sensiblement le risque de cécité d'inattention, ce qui semble être l'opinion majoritaire.

Il se pourrait qu'en fait la cécité d'inattention traditionnelle « Looked but not seen » recouvre plusieurs notions distinctes (Rensink 2009).

— La « change blindness », la cécité au changement, où l'on ne remarque pas une modification d'environnement, souvent parce qu'elle a eu lieu à un moment où l'on ne regardait pas l'objet, au moment d'un clignement d'yeux, ou lorsqu'on regarde un autre point d'attention. La durée du signal ou sa répétition peuvent jouer sur la non-perception.
— La cécité d'inattention proprement dite, où l'on anticipe un événement, par exemple de rencontrer le passage à niveau ouvert, et où l'on ne remarque pas qu'il est fermé. Dans ce cas, la durée de perception *d'un signal non variable* semble peu jouer sur le risque de cécité d'inattention.

Cette confusion de deux notions distinctes (cécité d'inattention et cécité au changement) est probablement une des causes des contradictions ci-dessus, d'autant que les deux phénomènes, même s'ils sont distincts, ne sont pas totalement indépendants : par exemple, (KOIVISTO, HYÖNÄ et REVONSUO 2004) *The effects of eye movements, spatial attention, and stimulus features on inattentional blindness* ont constaté qu'un événement non anticipé, mais apparaissant dans la proximité visuelle du point d'attention et présentant des points communs, par exemple taille et couleur avec un événement anticipé, avait une chance plus élevée d'être détecté.

À noter aussi un point qui avait été souligné dès le 18e siècle par Cesare Beccaria (*Des délits et des peines* 2025) : Beccaria, qui était opposé à la peine capitale, avait remarqué que celle-ci était très peu dissuasive, parce que les humains avaient un fort biais dans leur perception du risque : un risque grave, mais à terme était sous-estimé (d'ici là, on aura trouvé une solution) de même qu'un risque grave, mais d'occurrence faible (je suis plus malin que les autres, ce sont eux que la police attrapera), alors qu'un risque mineur, mais fréquent, était davantage pris en considération : cet « effet Beccaria » peut expliquer pourquoi certains usagers des passages à niveau se focalisent sur des risques mineurs (manquer son train par exemple) et franchissent les voies en ne remarquant pas le risque grave de collision avec un train, *ou quand une erreur de jugement favorise la cécité d'inattention*.

Un autre exemple de cette interdépendance est cité dans (BEANLAND, FILTNESS et JEANS 2017). Dans cette étude, les auteurs constatent que :

- Le risque de cécité d'inattention est plus faible lorsque l'objet est associé à un risque (Safety relevant), probablement parce que les conducteurs consacrent leur attention sur les objets significatifs sur le point de vue du risque (cécité au changement).
- Le risque de cécité d'inattention est plus faible pour des signaux lumineux, ou des objets mobiles que pour un panneau fixe (cécité au changement).
- Le risque de cécité d'inattention augmente quand l'environnement est plus complexe (visual clutter : cécité d'inattention au sens strict).

Les hypothèses retenues, en ce qui concerne la cécité d'inattention, sont les suivantes :

1. La cécité d'inattention est un phénomène complexe, dû à un ensemble de causes interdépendantes,
2. Parmi ces causes, on peut citer :
   (a) La non-anticipation : le conducteur ne s'attend pas à rencontrer le passage à niveau fermé ou en cours de fermeture
   (b) L'absence d'attention : l'attention du conducteur est totalement ou partiellement accaparée par d'autres objets que le passage à niveau
   (c) Des limitations physiques du conducteur (clignement d'yeux, fatigue, etc.)

Parmi les dispositions pouvant influer fortement sur le risque de cécité d'inattention, il y a :

— La nature du signal, et son « émergence » par rapport au fond : signal lumineux plutôt que panneau fixe, feu clignotant plutôt que feux fixe, feux « à éclats » plutôt que feu clignotant, présence ou non de barrières mobiles.
— La position du signal, et notamment si le (ou un) signal se trouve dans la zone d'attention.
— Le danger perçu : le signal sera d'autant mieux perçu que le danger « subjectif » ressenti par le conducteur au passage à niveau sera plus élevé.
— L'état physique du conducteur : âge, fatigue, consommation de médicaments ou de psychotropes pouvant influer sur l'attention.

### 3.4.2 Configurations routières particulières

Il a été vu plus haut qu'un environnement routier particulièrement complexe favorisait l'erreur de jugement. Mais la présence d'un environnement complexe, et notamment d'autres « dangers » peut aussi focaliser l'attention du conducteur sur autre chose que le passage à niveau, et favoriser les incidents dus à la cécité d'inattention. À titre d'exemple, on peut citer les accidents de Millas (tourne à gauche, séparateur de chaussée contraignant la giration du car), Saint-Médard (travaux à proximité du PN), Allinges (véhicule s'engageant en face sur le PN et profil/tracé du PN difficile).

L'accès sur une voirie parallèle, avec une courte durée de visibilité du R24 (les feux clignotants des PN) avant d'arriver sur le PN peut aussi être une cause : outre les remontées de file (en aval du PN), un ou plusieurs carrefours proches du PN augmentent le risque de cécité d'inattention. Un véhicule arrivant au PN par une rue parallèle aura moins de durée de visibilité des signaux, les verra une partie du temps en vision périphérique lointaine (donc hors des zones d'attention possibles que sont la route et les bas-côtés). *Si l'on en croit (Koivisto, Hyönä et Revonsuo 2004), un risque quatre fois plus élevé de ne pas remarquer le changement.*

De même, un véhicule arrivant sur la route « principale » peut avoir son attention détournée par un véhicule convergeant depuis la route « secondaire » : si le carrefour est suffisamment proche du PN, il se peut que l'attention du conducteur du véhicule arrivant sur ligne principale ne se reporte pas sur le PN.

### 3.4.3 Lignes secondaires

Les PN sur des lignes secondaires, à faible moment, présentent une sur-accidentologie (Cf. Analyse des corrections bayésiennes du modèle de Ci Liang dans Moripan), notamment dans des configurations de voirie rectiligne traversant une ligne secondaire, non électrifiée et peu remarquable : On peut l'interpréter comme un « apprentissage » par les conducteurs que le PN est « toujours ouvert » et qui entraine une non-anticipation du risque PN.

### 3.4.4 Mécanisme d'accident lié à la cécité d'inattention

L'incident lié à la cécité d'inattention, sur les PN à barrières, semble cependant très rare.

Cependant, il peut intervenir à n'importe quel moment dans le cycle, et le mécanisme d'accident est plus simple :

- Pénétration dans la zone dangereuse, souvent freinage d'urgence du véhicule routier et immobilisation.
- S'il reste quelques secondes, tentative de redémarrage et en cas d'échec, impact.

Compte tenu de la chaine plus simple, et qui ne nécessite pas la conjonction de deux incidents successifs, on ne peut pas rejeter l'idée que les accidents liés à la cécité d'inattention (attestés par un certain nombre d'accidents) constituent une part significative des accidents de PN, même s'ils n'ont jamais été observés directement sur un PN comme Roissy-en-Brie, car le ratio « accidents/incidents » va être modulé :

- Par le mécanisme d'esquive (surtout efficace sur les incidents précoces).
- Par l'effet Stott (surtout efficace sur les PN à fort flux de véhicules et les incidents tardifs).

# Chapitre 4

# Modèle de comportement des conducteurs routiers aux PN

## Table des matières


4.1 Réflexion préliminaire et données d'entrées d'un modèle prédictif . . . . 77

4.2 Comportement du conducteur routier . . . . . 77

4.3 Modèle préliminaire du comportement des conducteurs routiers aux PN à feux et barrières . . . . . 78

4.3.1 Principe d'un modèle stochastique de « Monte-Carlo » . . . . . 78

4.3.2 Paramètres envisagés et distribution de probabilité de ces paramètres pour le modèle. . . . . 79

4.3.2.1 Répartition de la vitesse moyenne des véhicules sur le réseau routier français . . . . . 79

4.3.2.2 Influence du rayon de la route, de la visibilité, etc. . . . . 79

4.3.2.3 Modélisation de l'arrivée des véhicules au PN . . . . . 82

4.3.2.4 Type de réaction et temps de réaction du conducteur . . . 83

4.3.2.5 Réponse du véhicule . . . . . 85

4.3.2.6 Vitesse des véhicules . . . . . 86

4.3.3 Référentiel d'interprétation proposé . . . . . 88

4.3.3.1 Algorithme du modèle de comportement des conducteurs routiers aux PN . . . . . 89

4.3.4 Résultats du modèle de comportement des conducteurs aux PN . . 90

4.3.4.1 Hypothèse « respect du code de la route » . . . . . 91

4.3.4.2 Hypothèse : le conducteur interprète le PN comme un feu tricolore « aberrant » . . . . . 92

4.3.4.3 Ce qu'enseigne le modèle de comportement des conducteurs aux PN . . . . . 94

4.3.4.4 Conclusion pour 30 km vitesse maximale affichée PN . . . 96

4.3.4.5 Passages à niveau avec des vitesses affichées plus élevées (50 km/h, 80 km/h, 90 km/h) . . . . . 98

4.3.4.6 Adaptation de la vitesse aux conditions routières . . . . . 98

4.3.4.7 Synthèse des résultats du modèle de comportement des conducteurs aux PN . . . . . 100

4.3.5 Conclusion sur le comportement des conducteurs routiers à partir du modèle et des données bibliographiques . . . . . 100

4.3.5.1 PN à feux et barrières . . . . . 101

4.3.5.2 PN à feux sans barrières (non utilisés à la SNCF, mais très utilisés pour les tramways) . . . . . 101

4.3.5.3 PN à Stop ou croix de Saint-André . . . . . 102

## 4.1 Réflexion préliminaire et données d'entrées d'un modèle prédictif

Modéliser un passage à niveau n'est pas possible par les techniques habituelles de modélisation, car même si le modèle lui-même n'est pas très complexe, une grande partie des données est très variable, et n'est connue que sous forme d'une « distribution statistique ».

C'est le cas notamment :

— Du comportement du conducteur routier en réponse au stimulus visuel et sonore d'un PN activé.

— Du comportement du mécanicien ferroviaire en réponse soit à la vue d'un obstacle sur la voie ou, en cas de détecteur d'obstacle, à la torche ou au signal l'avertissant de la présence d'un obstacle.

— De l'efficacité du freinage aussi bien du véhicule (état de la chaussée, ABS, etc.) que du train (état du rail, type de train, vitesse au moment de l'alarme en cas de détecteur d'obstacle.)

## 4.2 Comportement du conducteur routier

Comme vu au chapitre précédent, le comportement des conducteurs est très différent aux Feux tricolores, aux PN sans et avec barrières et feux. Le graphique (figure 32) résume cette différence telle qu'elle apparaît à la synthèse des observations :

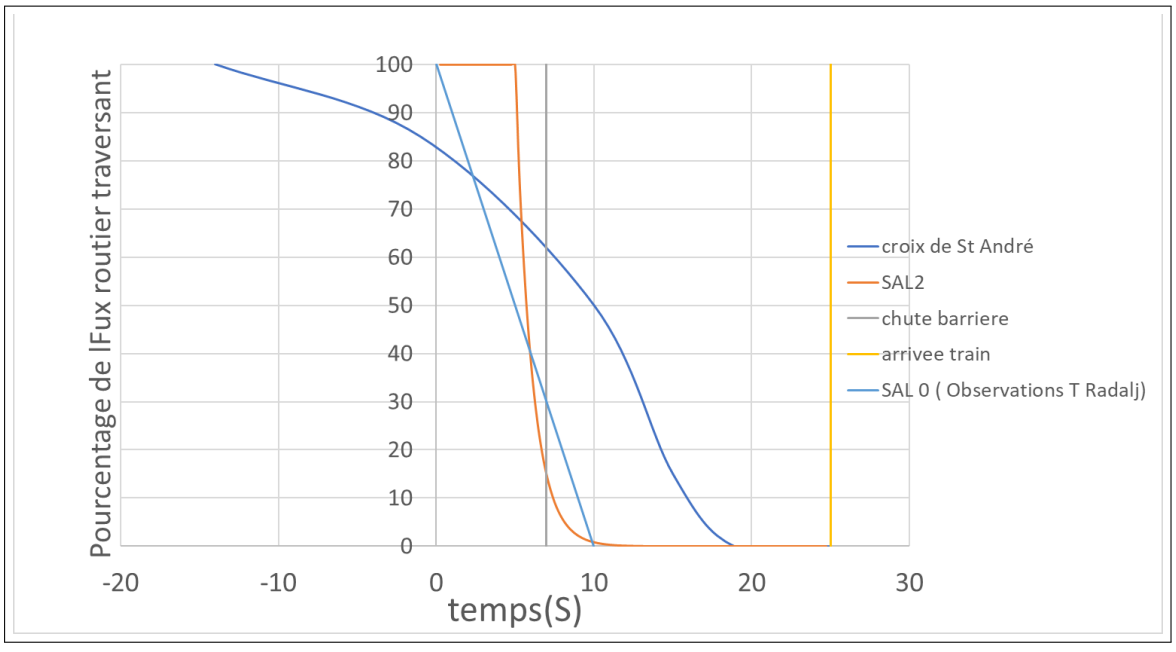



FIGURE 32 – Comportement des conducteurs aux PN avec feux et barrières et à croix de Saint-André (O. Cazier)

1. Pour les PN à croix de Saint-André, il n'y a pas d'événement repère. Une proportion importante de conducteurs n'anticipe pas la présence d'un train, ce qui entraine un risque extrêmement élevé de cécité d'inattention. Les autres conducteurs stoppent

ou ralentissent fortement au niveau du PN, mais jugent très mal la vitesse et la distance du train à cause de « l'illusion de Leibowitz », ce qui augmente fortement le risque d'accident lié à l'imprudence.

2. Pour les PN à feux et barrières, il y a, pour les conducteurs, outre la vue éventuelle du train, deux « informations » qui lui permettent de juger de l'imminence du danger : l'activation des feux et le mouvement des barrières.

Un modèle simple va permettre de clarifier le comportement et les motivations d'un conducteur routier à un PN dans le cas très simple d'un PN et d'une route avec une distance de visibilité connue.

Compte tenu d'une durée d'annonce relativement longue (7s) par rapport à la durée des feux jaunes routiers (3 à 5s), les conducteurs, dont une majorité sont des usagers réguliers du PN, semblent réagir et s'arrêter plus par « anticipation » de la chute des barrières qu'à l'activation des feux clignotants.

Mais pour vérifier cette hypothèse, il faut utiliser un modèle pour éliminer les explications alternatives possibles.

## 4.3 Modèle préliminaire du comportement des conducteurs routiers aux PN à feux et barrières

L'objectif de cette modélisation préliminaire est de disposer d'un modèle stochastique prédictif expliquant le comportement des conducteurs routiers observé par T. Radalj à Perth (Radalj 2025) et par Ci Liang sur Moripan (Liang, Ghazel et al. 2018a).

En effet, à partir de ce modèle, il sera possible d'en faire varier les paramètres, de le complexifier en ajoutant des carrefours. Même si le manque de données limite la fiabilité et la complexité des modèles d'arrivée aux PN, disposer d'un tel modèle peut permettre au moins d'identifier les principaux paramètres jouant sur le comportement des conducteurs, et de quantifier leur importance. À partir des paramètres, l'étude du retour d'expérience pourra être facilitée et permettre l'acquisition des données pertinentes, ou encore de déclencher un cercle vertueux où l'on enrichira tour à tour les modèles et le retour d'expérience.

### 4.3.1 Principe d'un modèle stochastique de « Monte-Carlo »

À la fin des années 30, les physiciens ont été confrontés à un problème nouveau lié à l'apparition de théories dans lesquelles ce qui était « déterminé » n'était plus la valeur des observables traditionnels (vitesses, position, énergie) mais la distribution de probabilité de ces observables. Ce qui posait un problème vis-à-vis des modèles et de leur comparaison avec les mesures, car calculer directement la distribution de probabilité d'un observable obtenu à partir d'une équation complexe (à tous les sens du terme !) et de données d'entrées connues uniquement par leurs distributions n'est en général pas possible.

Mais il est possible de la déterminer par « force brute » : on génère des populations d'événements avec les « bonnes » fréquences des paramètres d'entrée, on calcule, pour chacun de ces événements, la valeur de l'observable souhaité, ce qui donne un ensemble de mesures de l'observable qui peut être traité de façon statistique, pour déterminer la distribution de probabilité de l'observable.

Un modèle de Monte-Carlo est un modèle dont les équations sont déterministes, mais dont les entrées (données) comme les résultats sont sous forme de distributions de probabilité.

Les méthodes de Monte-Carlo sont à la fois très puissantes (elles permettent de résoudre à peu près n'importe quel problème qui peut être posé sous forme probabiliste) et peu utilisées, voire décriées, pour plusieurs raisons :

— Elles nécessitent de bien connaître les distributions de probabilité des diverses entrées, ce qui est souvent un travail considérable et rarement bien réalisé.
— Elles consomment des ressources importantes en temps de calcul et volume de fichiers.

Cependant, elles ont l'avantage d'être « agiles » et faciles à modifier, ce qui les rend « idéales » pour une modélisation exploratoire.

### 4.3.2 Paramètres envisagés et distribution de probabilité de ces paramètres pour le modèle.

Les paramètres envisagés pour ce modèle sont les suivants :

— Durée d'annonce (paramètre fixe) prise à 25 s et durée de clignotement fixe prise à 5 s ou 7s.
— Vitesse du véhicule, voir paragraphe suivant.

#### 4.3.2.1 Répartition de la vitesse moyenne des véhicules sur le réseau routier français

Pour la répartition de la vitesse des véhicules, les données 2022 de l'ONISR (figure 34, Office National Interministériel de la Sécurité Routière) pour les routes à 50 km/h ont été comparées avec la vitesse réelle mesurée par l'Université Gustave Eiffel et la SNCF lors des tests de MORIPAN (figure 33).

#### 4.3.2.2 Influence du rayon de la route, de la visibilité, etc.

Lors des tests de MORIPAN, la vitesse a été mesurée pour 13 PN, à la fois pour les véhicules traversant avec le PN ouvert (flèche relevée) et le PN activé (clignotant/fermant). Lorsque l'on compare les vitesses mesurées dans le cadre de MORIPAN avec les données publiées par l'ONISR, on constate que la vitesse des véhicules franchissant la PN ne varie pas qu'elle soit ouverte ou clignotante, et que la vitesse des véhicules aux PN est similaire aux vitesses de l'ONISR pour le réseau routier à 50 km/h, y compris une « distribution non gaussienne », avec une fréquence plus élevée pour les basses vitesses. La conduite automobile est « à vue », on peut donc s'attendre à ce que dans un environnement urbain, ou dans un environnement à faible visibilité, les conducteurs adaptent leur vitesse à la

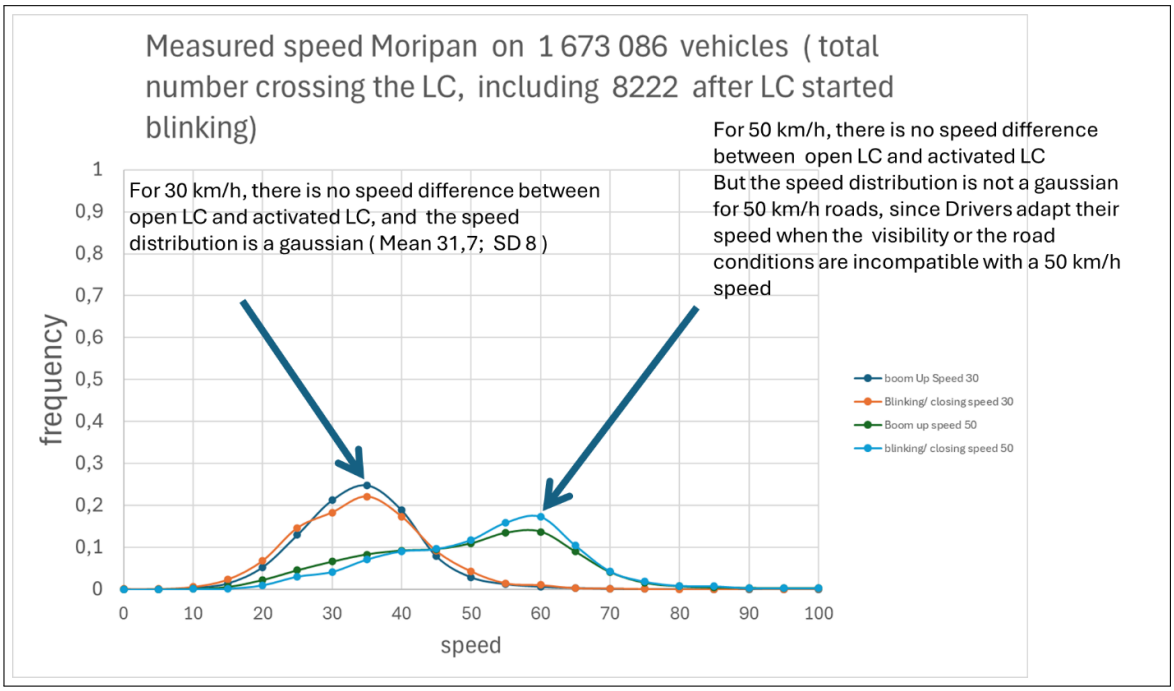



FIGURE 33 – Répartition de la vitesse des véhicules aux PN, pour PN avec vitesse maximale affichée 30 et 50 km/h (source MORIPAN)

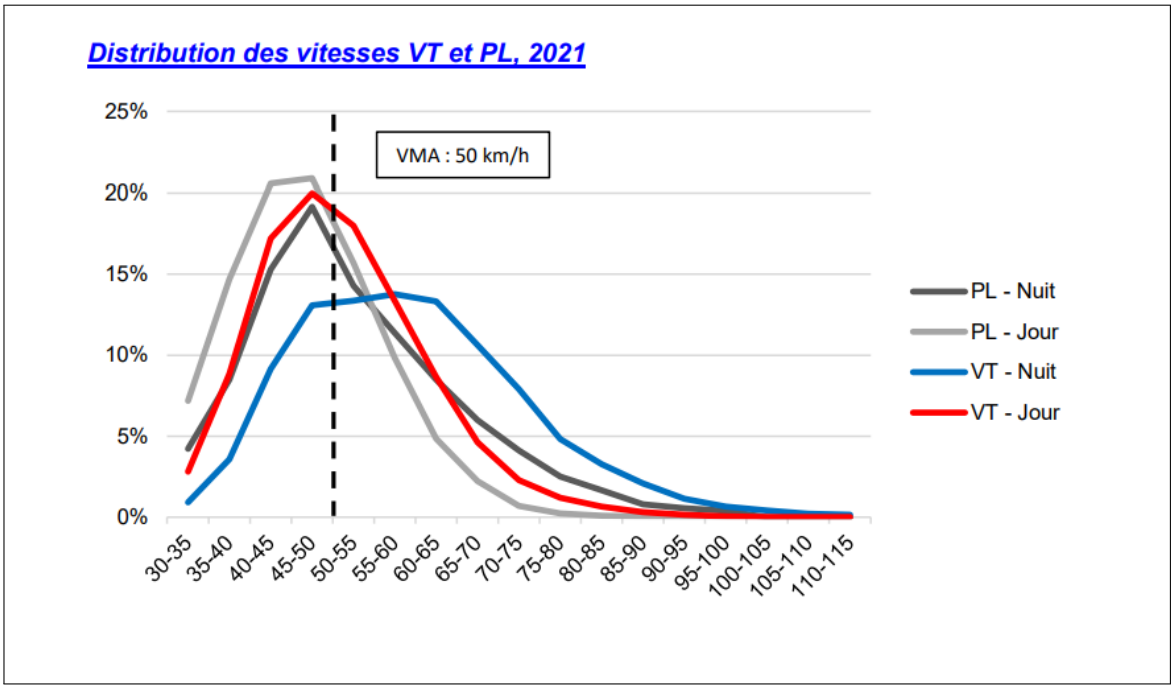



FIGURE 34 – Répartition de la vitesse des véhicules mesurée par l'ONISR sur les routes urbaines à vitesse maximale affichée 50 km/h

situation de conduite réelle, y compris le rayon de la route et la visibilité PN (une grande majorité des utilisateurs de PN sont des utilisateurs fréquents).

Selon la commission européenne (Speed and Speed management 2018),

> *« De nombreux conducteurs dépassent les limites de vitesse affichées. Mais même s'ils respectent la limite de vitesse affichée, leur vitesse peut être inappropriée pour la circulation, la route ou les conditions météorologiques. Il est difficile d'obtenir des données objectives sur la prévalence des vitesses inappropriées. L'une des raisons est que nous n'en savons pas assez sur la vitesse appropriée pour des conditions spécifiques. Cependant, plusieurs études concluent que les conducteurs adaptent leur vitesse aux conditions réelles, mais pas suffisamment. Par exemple, dans des conditions pluvieuses, la vitesse moyenne est plus basse que lorsqu'il fait sec. Dans le même temps, le risque d'accident est plus élevé en cas de pluie (SETRA-CSTR, 1990). De même, en Norvège, il a été constaté que la vitesse est considérablement réduite lorsque la neige tombe ou lorsque le sol est recouvert de neige, mais que les usagers de la route n'ont pas suffisamment adapté leur vitesse de conduite pour compenser les effets négatifs sur le nombre d'accidents (Elvik & Kaminska, 2011). Il faut donc en conclure que l'adaptation à la vitesse est souvent insuffisante et que la vitesse reste inadaptée aux conditions pluvieuses et autres conditions défavorables. »*

Un examen des données de l'ONSIR et de la littérature scientifique confirme les conclusions de l'UE :

- Les gens adaptent leur vitesse aux conditions de la route, au design, etc.
- L'adaptation est assez souvent insuffisante.
- Les données sur l'adaptation de la vitesse sont insuffisantes pour une modélisation précise.

Par exemple, l'une des données publiées sur la variabilité des « vitesses réelles » se trouve dans (Török 2011) (cf. figure 35).

Selon Török, la distribution des vitesses sur un site donné peut être assimilée à une gaussienne, mais elle est très variable selon le site et les conditions routières.

Selon (Török 2011), la vitesse moyenne peut être modélisée comme une fonction linéaire de :

- Vitesse maximale affichée.
- Largeur de voie.
- Distance de visibilité (plutôt que rayon de la route).

Néanmoins, il y a suffisamment d'informations pour permettre de faire une modélisation préliminaire avec un modèle « de base » :

- Si la vitesse affichée sur la route est de 30 km/h ou moins, le conducteur n'adaptera pas sa vitesse.
- Si la vitesse affichée est de 50 km/h, le conducteur adaptera sa vitesse en fonction de la distance de visibilité, si la visibilité à 50 km/h est inférieure à 5s, de façon à conserver une durée de visibilité d'au moins 5s.
- Si la visibilité est supérieure à 5s, le conducteur n'adaptera pas sa vitesse.

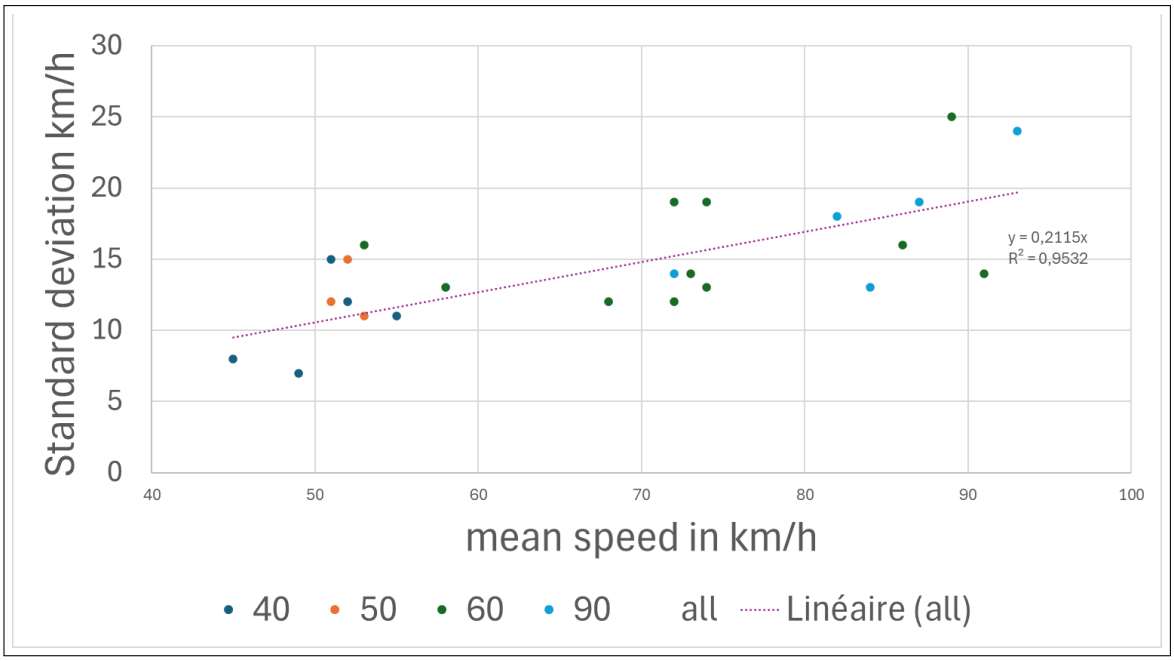



FIGURE 35 – Adapté d'«étude des effets de l'environnement routier sur le choix de l'environnement» (TÖRÖK 2011)

L'adaptation de la vitesse sera effectuée à la fois pour les conducteurs alertés et distraits. L'analyse des accidents dans les fichiers BEA-TT montre qu'une part assez importante de la distraction du conducteur aux passages à niveau est associée à une trop grande attention pour d'autres dangers que le PN (virage serré à Millas, véhicule qui passe devant et profil difficile à Allinges, travaux à Saint-Médard, etc.), qu'ils sont conscients de la présence du PN mais que c'est son activation qui n'est pas remarquée.

#### 4.3.2.3 Modélisation de l'arrivée des véhicules au PN

Pour l'intervalle de temps entre véhicules, a été adopté une distribution de type loi exponentielle, équivalent sur le plan mathématique d'une loi de Poisson pour la distribution de probabilité du nombre de véhicules arrivant au PN par unité de temps.

C'est une hypothèse classique en modélisation routière en l'absence de bouchons : le lecteur intéressé trouvera une démonstration complète de l'adéquation de la loi de Poisson à la modélisation d'un flux routier dans (SCHUHL 1956) et qui coïncide bien avec les observations de Ci Liang sur MORIPAN. En utilisant la distribution des vitesses précédente, on en déduit la distribution spatiale des véhicules suivante :

Sur cette figure 36, qui représente une répartition issue de 20 000 tirages pour un PN avec 214 v/j, on peut voir que le modèle respecte bien les hypothèses :

— La distance entre véhicules suit une loi exponentielle entre le véhicule N et le véhicule N+1.
— Le modèle évalue la distance N/N+1 en tirant au sort une répartition exponentielle.

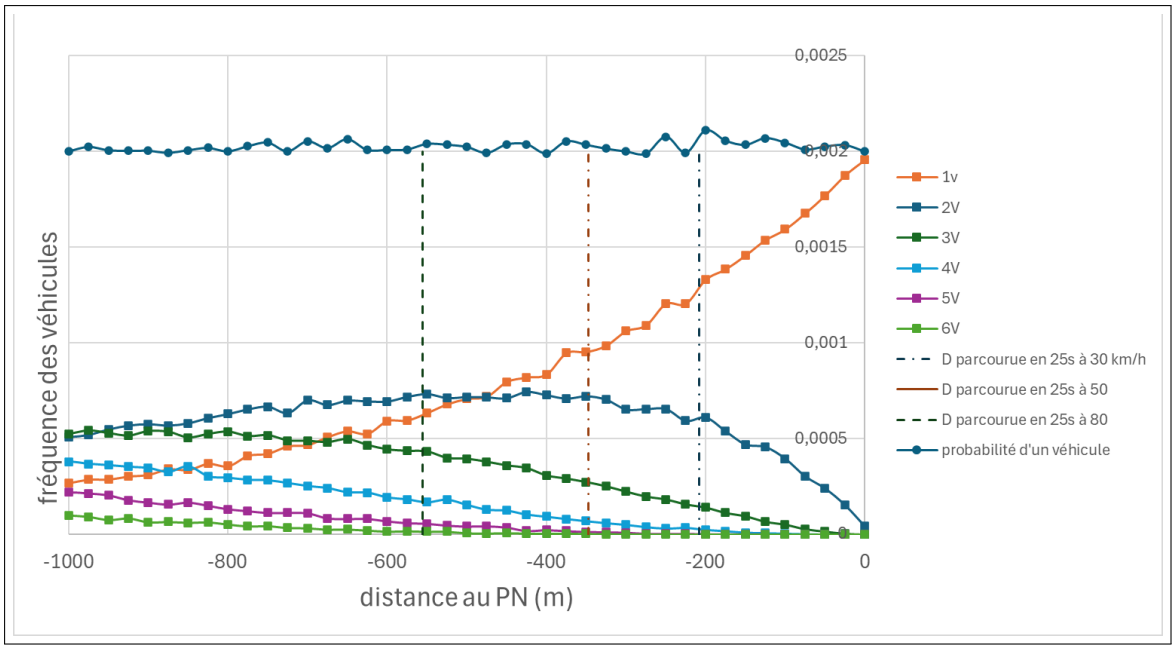



FIGURE 36 – Répartition des distances au PN au moment de l'activation du cycle pour les 1e,2e,3e,4e,5e et 6e véhicules (la contribution des véhicules > 6 est négligeable) - Modèle de comportement du conducteur au PN

— Le véhicule N+1 est toujours, par construction, plus éloigné du PN que le véhicule N, ce qui n'empêche pas que l'espérance d'arrivée des véhicules est constante et l'arrivée des véhicules suit une loi de Poisson.

L'abscisse 0 représente l'emplacement du PN et l'ordonnée la fréquence, la courbe nV est un estimateur de la probabilité de présence du n$^{e}$ véhicule à n mètres du PN à l'instant de l'activation.

#### 4.3.2.4 Type de réaction et temps de réaction du conducteur

Quel est le stimulus entrainant la réaction du conducteur et quelle est la réponse du conducteur à ce ou ces stimuli ?

Ce point est une des incertitudes qui motivent l'établissement d'une simulation.

Il n'y a que peu d'études consacrées au comportement d'un conducteur routier vis-à-vis d'un passage à niveau équipé de feux clignotants et de barrières. La seule étude qui a mesuré « directement » le temps de réaction d'un conducteur à un PN, dans des conditions réelles (et incluant le temps de réaction du pied sur le frein) est celle de (TRIGGS et HARRIS 1982) en figure 37, donc déjà ancienne et dont on verra plus loin qu'elle n'est pas compatible avec toutes les autres observations.

Temps de réaction d'un conducteur en cas d'activation de PN – Harris et Triggs, Monash university Une autre source possible pour le modèle est d'utiliser des données issues non plus de mesures sur les PN, mais de la littérature ergonomique routière (KOPPA 2000) corrigées, pour être cohérent avec les mesures de Harris et Triggs, du temps d'action du pied sur le frein (de l'ordre de 0,3 s, pris fixe, car il varie assez peu) et du temps d'établisse-

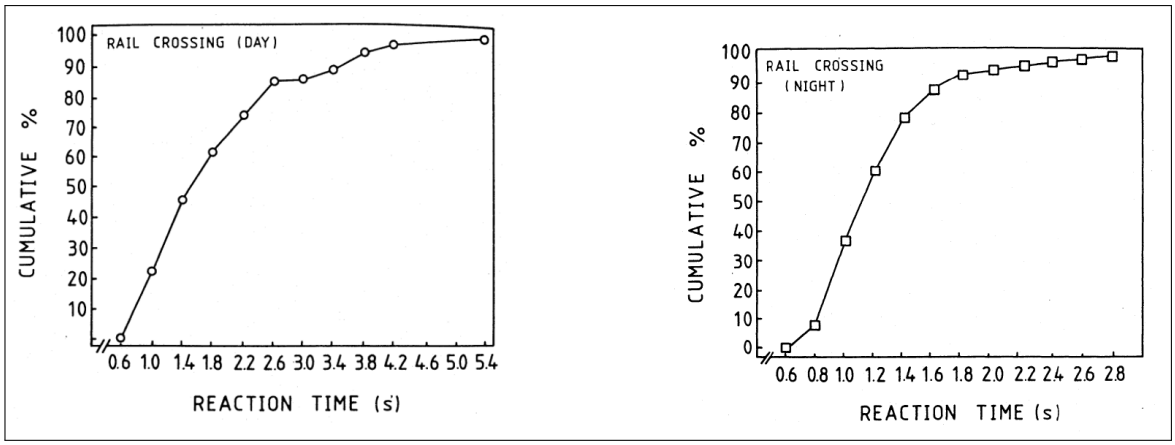



FIGURE 37 – Temps de réaction d'un conducteur en cas d'activation de PN - Harris et Triggs, Monash

ment du freinage (apparemment inclus dans la valeur moyenne des accélérations prises dans le modèle).

Avec ces corrections, les valeurs de temps de réponse représentées figure 38 pour des conducteurs « alertés » (anticipant les Stimuli) et distraits, sont cohérentes avec les mesures de (KOPPA, FAMBRO et ZIMMER 1996) et les temps de réponses publiés par (KOPPA 2000).

Les données de Harris et Triggs sont aussi représentées aux fins de comparaison.

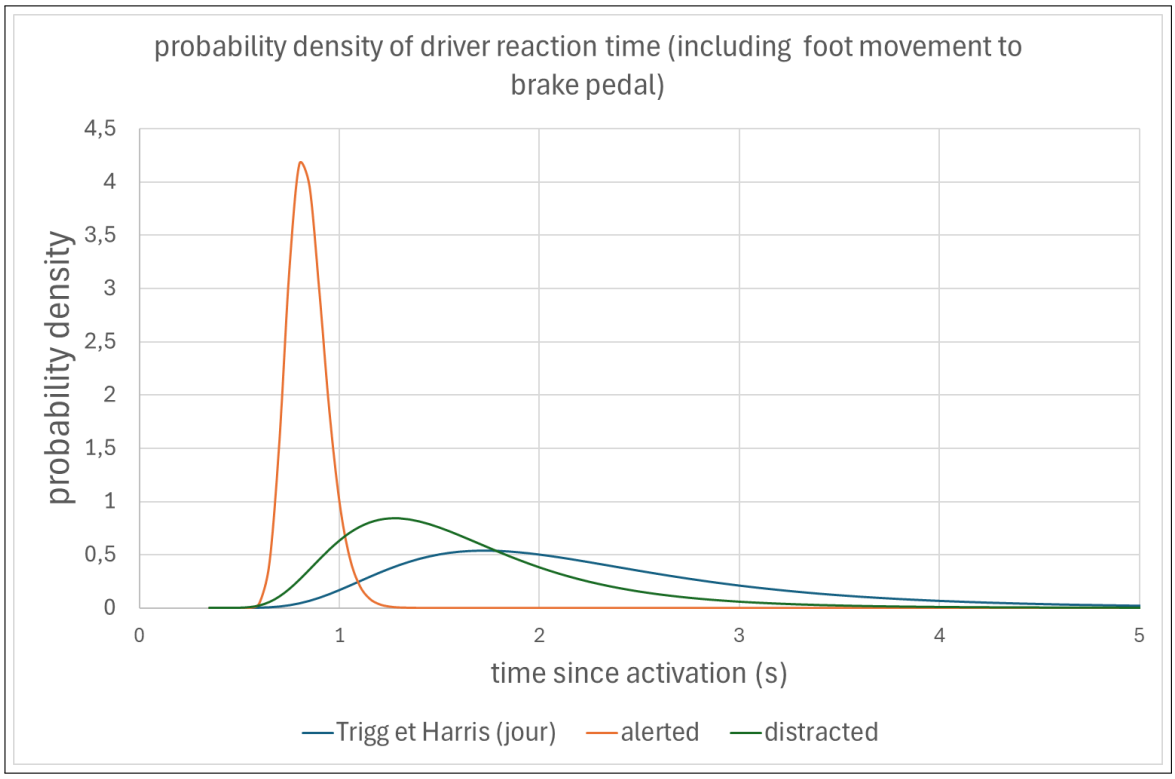



FIGURE 38 – Données de temps de réaction du conducteur (perception du signal + mouvement pied) utilisées dans l'étude inspirées de (KOPPA 2000) et (TRIGGS et HARRIS 1982)

Dans la figure 38, l'ordonnée représente le temps depuis le début du stimulus (début du clignotement) et l'ordonnée la densité de probabilité du temps mis par le conducteur à remarquer le stimulus et à déplacer son pied sur le frein.

On peut remarquer que, selon Harris et Triggs, le temps de réaction au PN est très différent entre le jour et la nuit, avec notamment un 85$^{e}$ percentile de l'ordre de 1,5 s pour la nuit, et de l'ordre de 2,6 s pour le jour, à comparer aux valeurs habituellement prises pour un conducteur alerté (85$^{e}$ percentile 0,65s) et même « surpris » » (85$^{e}$ percentile : 1,87s) et que les mesures de Harris et Triggs ne sont pas compatibles avec les valeurs prises habituellement comme réaction d'un conducteur routier à un stimulus.

Ce qui suggère que Harris et Triggs ont pu faire une erreur d'interprétation : leur hypothèse est que le conducteur réagit « tardivement » au stimulus « feu clignotant », alors que, comme on va le voir un peu plus loin, le comportement le plus vraisemblable du conducteur est qu'il réagit « par anticipation » à la fermeture des barrières (7 s en France, 5 s hors de France) de la même façon que les conducteurs routiers ne réagissent pas à l'orange, mais davantage à l'anticipation du passage au rouge pour un feu tricolore.

Cela nous conduit donc, en ce qui concerne le conducteur, à faire l'hypothèse suivante (complémentaire) sur son comportement : comme le conducteur dispose, à un PN, d'une marge de sécurité plus grande qu'à un feu tricolore (5 à 7 s contre 3 à 5s), il va adapter son comportement et « viser » l'arrêt du véhicule un peu avant la fermeture des barrières.

Un tel comportement serait caractéristique des conducteurs français d'après (Cestac et al. s. d.) (Rapport à la règle chez les conducteurs français) et très différente de l'exigence du code de la route (le feu rouge clignotant impose l'arrêt immédiat).

Dans la modélisation, plusieurs hypothèses sont testées :
- Conducteur « alerté » et conducteur « surpris » tiré de (Koppa 2000).
- Conducteur respectant à la lettre le code de la route.
- Conducteur interprétant le PN comme un feu tricolore et adaptant son comportement à une durée d'avertissement de 5 s à 7 s au lieu de 3 s à 5s.
- Distance de visibilité des R24 : fixe (choisie) ou conforme aux recommandations routières pour la visibilité des signaux (5 v avec v en m/s).

#### 4.3.2.5 Réponse du véhicule

Concernant la décélération des véhicules, des données récentes d'essais de deux types de véhicules européennes ont été utilisées pour le modèle de comportement des conducteurs aux PN, la Ford Focus et la Xsara Picasso (2022).

En résumé, on retient une accélération « moyenne maximale » de $6m/s^2$ correspondant aux véhicules raisonnablement récentes, avec un temps de mouvement du pied sur la pédale de 0,3 s (cf. figure 39).

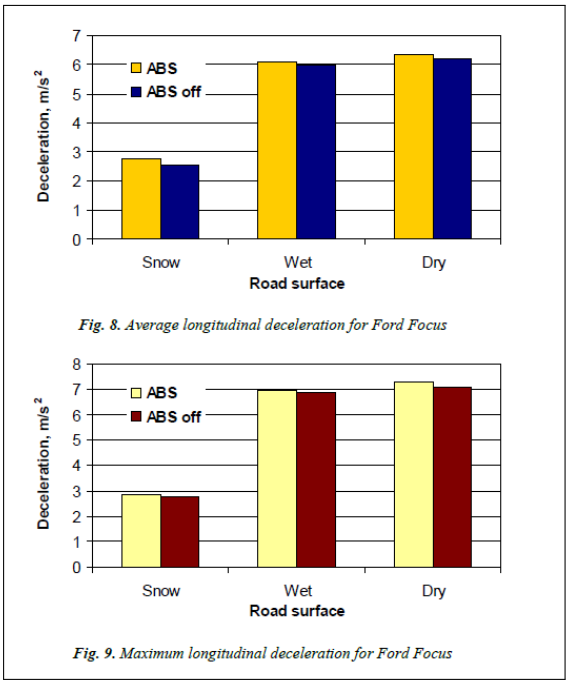



*Fig. 8. Average longitudinal deceleration for Ford Focus*




*Fig. 9. Maximum longitudinal deceleration for Ford Focus*

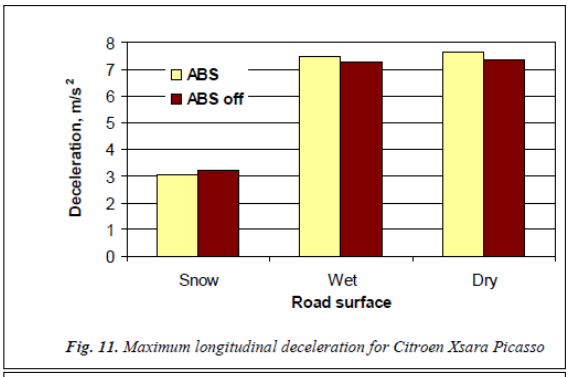



*Fig. 11. Maximum longitudinal deceleration for Citroen Xsara Picasso*

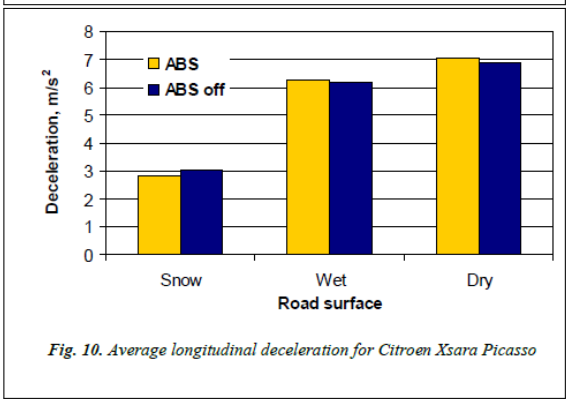



*Fig. 10. Average longitudinal deceleration for Citroen Xsara Picasso*

FIGURE 39 – Décélérations moyennes et maximales de quelques véhicules courants (KADIKYANOV et al. 2014)

#### 4.3.2.6 Vitesse des véhicules

Lorsque la vitesse maximale affichée est faible (30 km/h), les tests de MORIPAN ont montré que les vitesses des véhicules étaient plutôt homogènes, et pouvaient être facilement modélisées comme une distribution gaussienne (cf. figure 40).

Mais pour les vitesses maximales affichées de 50 km/h ou plus, la répartition de la vitesse est beaucoup plus complexe (figure 41).

Cette différence est interprétée comme une adaptation de la vitesse réelle aux conditions de circulation : lorsque la VMA est supérieure à 30 km/h, dans des conditions difficiles (visibilité, intempéries, etc.), le conducteur réduit sa vitesse.

Le problème n'est pas de modéliser une distribution aléatoire différente des distributions classiques : comme on peut le voir sur la figure 48 qui représente la répartition mesurée par MORIPAN (pour des PN ouverts ou en cours d'activation) et le tirage dans notre modèle (hypothèse « vitesse MORIPAN »), des techniques simples peuvent être utilisées pour générer des nombres pseudo-aléatoires avec une distribution connue, mais de comprendre l'origine de cette distribution, afin de ne pas faire d'erreur d'interprétation.

Notre hypothèse est que :

— Pour les faibles vitesses autorisées (ie 30 km/h), il n'y a pas de « besoin perçu » significatif pour les automobilistes d'adapter leur vitesse aux conditions réelles de la route (visibilité, trafic, météo...).

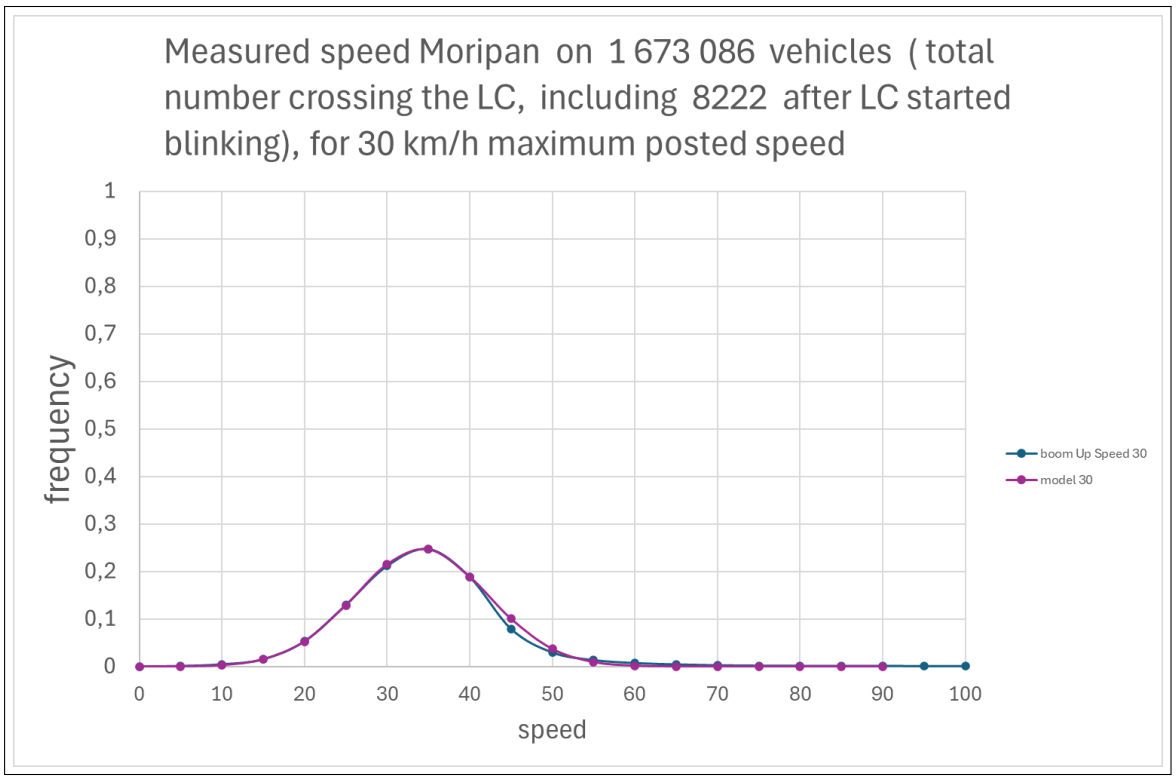



FIGURE 40 – Vitesse routière observée pour les PN à VMA 30 de MORIPAN

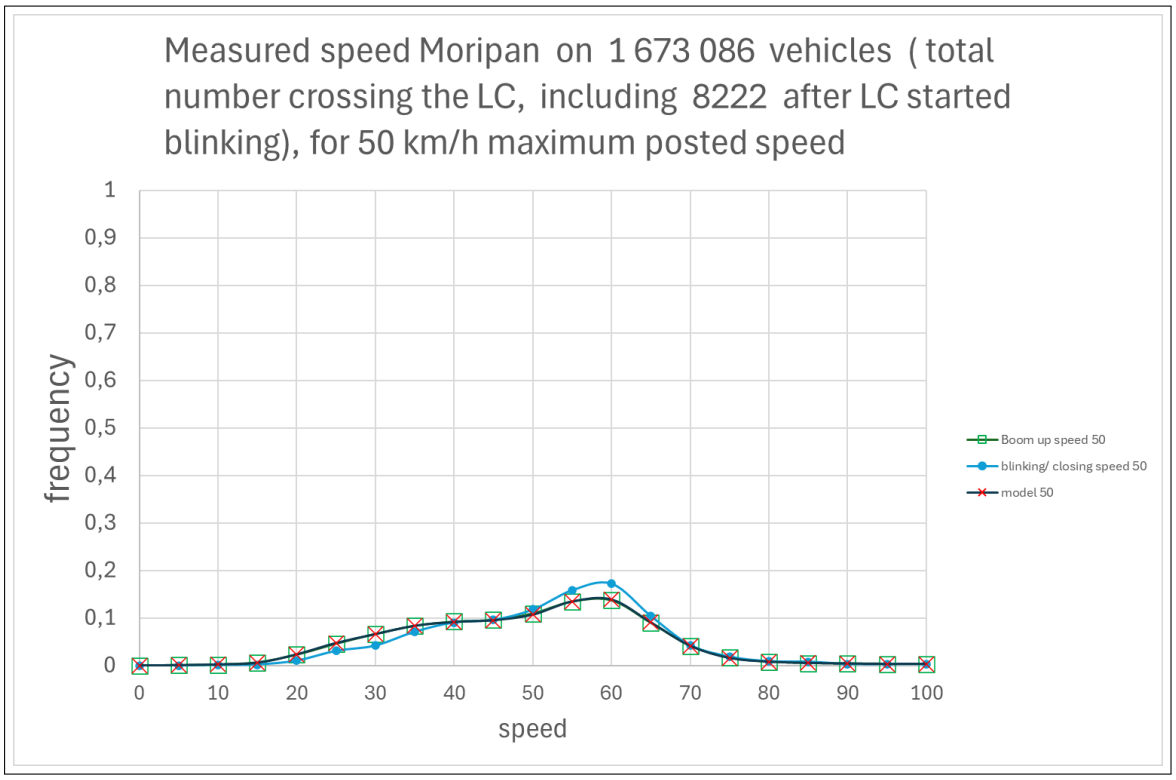



FIGURE 41 – Vitesse routière observée, pour les PN à VMA 50 de MORIPAN et exemple de tirage issu d'une simulation de MC

— Pour des vitesses autorisées plus élevées :
  — Les conducteurs alertés rouleront soit près de la vitesse maximale lorsque les conditions routières sont favorables, soit adapteront leur vitesse lorsque les conditions routières seront défavorables.
  — L'expérience montre également que les conducteurs distraits impliqués dans des accidents aux passages à niveau, adapteront également leur vitesse (Allinges, Millas...) puisque dans les comptes rendus d'accident, les conducteurs qui ont été distraits par d'autres dangers de la route, ont adapté leur vitesse à ces dangers (rayon prononcé, véhicules arrivant à l'avant et largeur de route réduite...) et ont concentré uniquement leur attention sur les dangers de cette route.

En fait, cette adaptation de la vitesse par un conducteur distrait, parfois excessive, a pu dans certains cas, comme à Allinges (voir annexe) faire partie de la chaine conduisant à l'accident.

### 4.3.3 Référentiel d'interprétation proposé

Il existe un faisceau d'observations sur le comportement des conducteurs aux PN à feux (Radalj 2025), aux PN à feux et barrières (Vijendran, Stevens et Beard 1999), le CEREMA et Harris et Triggs.

Si cette observation des mesures faites par Radalj sur des PN à feux, sans barrières est comparée aux observations du CEREMA sur le comportement des conducteurs face à des carrefours de tramways, ainsi qu'aux observations de Vijendran, Beard, Stevens sur les PN à demi-barrières et annonces « longues » de la DB, une hypothèse de travail plausible serait que le stimulus qui déclenche l'action du conducteur au passage à niveau n'est pas le déclenchement des R24 lui-même, mais que ce déclenchement est interprété comme une « annonce » : le conducteur visant d'arrêter avant la fermeture des barrières d'entrées (pour les SAL 4 et les SAL 2 français avec annonces courtes) ou l'anticipation de l'arrivée du train (pour les carrefours PN à feux et les SAL0 voire les SAL 2 à annonces longues), cette anticipation étant inconsciemment évaluée par le conducteur à partir de l'information de déclenchement des R24.

Or, l'existence de deux séries d'observations (Radalj à Perth avec clignotement de 5 s et Liang avec clignotement de 7 s avant chute des barrières) pourrait permettre de discriminer entre ces deux hypothèses.

Enfin, on peut aussi tester l'hypothèse « le conducteur respecte à la lettre le code de la route qui prescrit l'arrêt absolu au feu clignotant », car cela se traduirait par une chute beaucoup plus rapide, après activation des feux, que constaté dans nos observations et dans celles de Tony Radalj.

Pour interpréter les observations de Radalj et Liang, nous allons donc utiliser un « modèle de comportement du conducteur » de type « Monte-Carlo », dans lequel :
— À chaque événement (activation du passage à niveau), on tire au sort successivement la position des 6 premières véhicules les plus proches du PN.

— On tire au sort les vitesses et l'on évalue les temps d'arrivée à distance de visibilité du PN des véhicules successifs.

Pour chaque véhicule arrivant à distance de visibilité, le conducteur :

— Remarque que le PN clignote ou est fermé/en cours de fermeture, avec une distribution de probabilité de temps de réaction soit distrait, soit alerté.
— La réaction du conducteur sera :
  — De freiner avec une décélération inférieure à 6 m/s s'il estime que c'est possible en fonction de sa vitesse et de sa distance au PN.
  — De « choisir « un plan d'action, qui peut être :
    — De s'arrêter immédiatement (selon le code de la route (hypothèse $H_1$).
    — Une réponse similaire aux feux tricolores « normaux », le signal clignotant étant compris comme l'équivalent d'un feu orange, le mouvement de la barrière étant compris comme l'équivalent d'un feu rouge, et la réaction du conducteur adaptée à un avertissement de 7 s au lieu de 3/5 s pour les feux tricolores (hypothèse $H_2$).
— Pour tenir compte de la diversité des conducteurs et de leur sensibilité à la sécurité, la réaction du conducteur est modélisée comme suit (dans l'hypothèse $H_2$) :
  — Le conducteur vise à s'arrêter à $T$.
  — $T$ aura une distribution gaussienne, avec $T_m$ « pas très différent du temps de clignotement » et un écart-type $S$.
— Dès qu'un véhicule s'est arrêté, on considère que le PN est protégé par le véhicule arrêté et on « saute » à l'événement suivant.

L'objectif est de déterminer :

— Pour l'hypothèse $H_1$, si elle est compatible avec les mesures de Radalj et de Liang
— Pour l'hypothèse $H_2$, la distribution de $T$ et les valeurs de $T_m$ et de $S$ « compatibles » avec les mesures de Liang er de Radalj.

#### 4.3.3.1 Algorithme du modèle de comportement des conducteurs routiers aux PN

— Taux d'arrivée des véhicules (par sens) $\tau = 0,5\frac{V}{3600}$ en véhicules/s (utilisé dans la loi de Poisson $\lambda = \tau t$)
— Pour chaque événement (déclenchement du PN) :
— Calcul du délai entre véhicule N et N+1 $T_n = (\frac{1}{\tau})ln(\frac{1}{Alea})$ avec $Alea$ un tirage « aléatoire » entre 0 et 1 pour les 6 véhicules les plus proches du PN (on néglige les véhicules au-delà du 6e, sachant que leur contribution est extrêmement faible)
— Distance entre véhicule N et N+1 $D_n$ : tirage aléatoire de la vitesse $V_{an}$ distribuée suivant une loi normale dépendant de la VMA, vérification de la durée de visibilité $> 5s$ $T_{visibilite} = \frac{Dist_{visibilite}}{V_a}$ et $V_b = \frac{Dist_{visibilite}}{5}$ et $V = min(V_{an}, V_b)$ et $D_n = V \times T_n$
— (Ajustement de la vitesse)
— Tirage du temps de réaction conducteur (distrait ou non) et calcul de la distance au PN correspondant à la fin de la réaction conducteur

— S'il n'y a pas de véhicule précédent déjà arrêté depuis le début de l'événement (déclenchement de l'annonce du PN), tirage de $T_{cible}$ en fonction d'une loi aléatoire gaussienne $T_m$, $S$, sinon événement suivant.
— Vérification de la possibilité d'arrêter à $T_{cible}$ avec une accélération inférieure à l'accélération maximale.
— Si possible, arrêt, sinon on considère que le véhicule traverse le passage à niveau.
— Passage au véhicule suivant (avant le 6e Véhicule) ou à l'événement suivant.
— Au bout de 100 000 événements, comptage des véhicules ayant franchi le PN à l'instant t et détermination du nombre et de la fréquence de passage du véhicule en fonction du délai écoulé depuis le déclenchement de l'annonce.

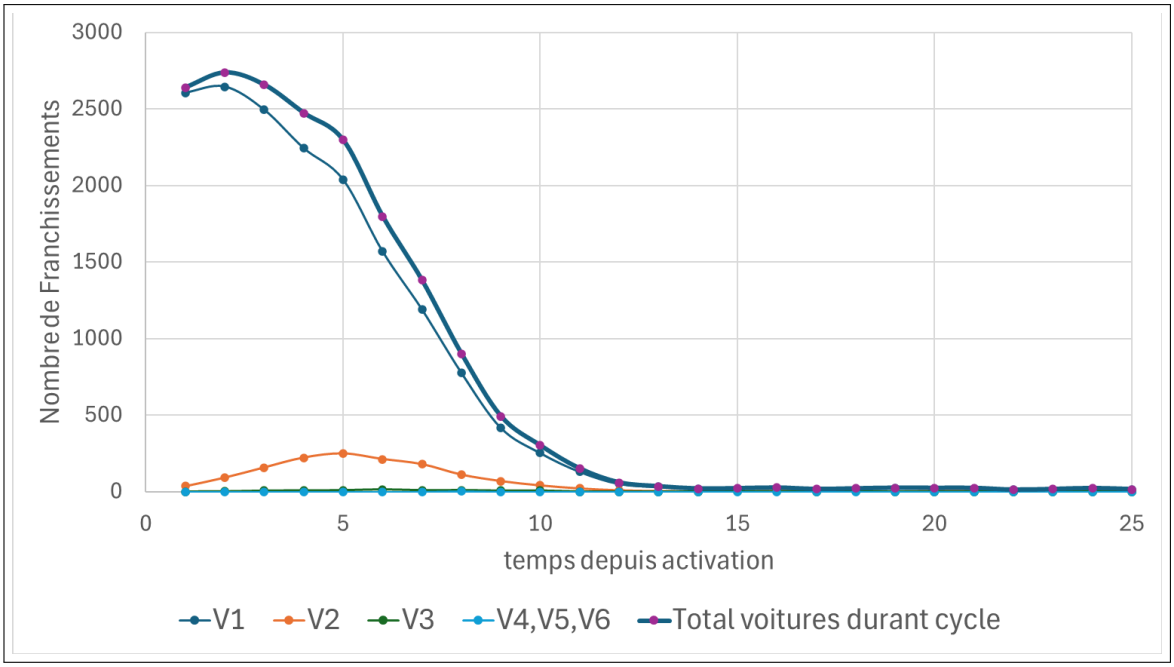



FIGURE 42 – Exemple de simulation du comportement des conducteurs routiers aux PN : contribution au franchissement des véhicules successifs à VMA 50km/h et visibilité 100m pour un flux de 200v/h.

### 4.3.4 Résultats du modèle de comportement des conducteurs aux PN

La figure 42, représente le résultat d'une simulation de passage des véhicules successifs avec en abscisse, le temps depuis l'activation, en ordonnée, le nombre de Franchissements.

On voit que même avec un effet Stott limité (200 v/h), la contribution du 1er véhicule et du second véhicule représentent l'essentiel des franchissements.

Le 3e véhicule est négligeable et les véhicules 4,5 et 6 ne contribuent pas au franchissement pour 200 v/h.

#### 4.3.4.1 Hypothèse « respect du code de la route »

La figure 43 représente la simulation par le modèle du « respect strict du code de la route » (Article R412-30) dont voici un extrait (version en vigueur au 19/12/2024) « Tout conducteur doit marquer l'arrêt absolu devant un feu de signalisation rouge, fixe ou clignotant. »

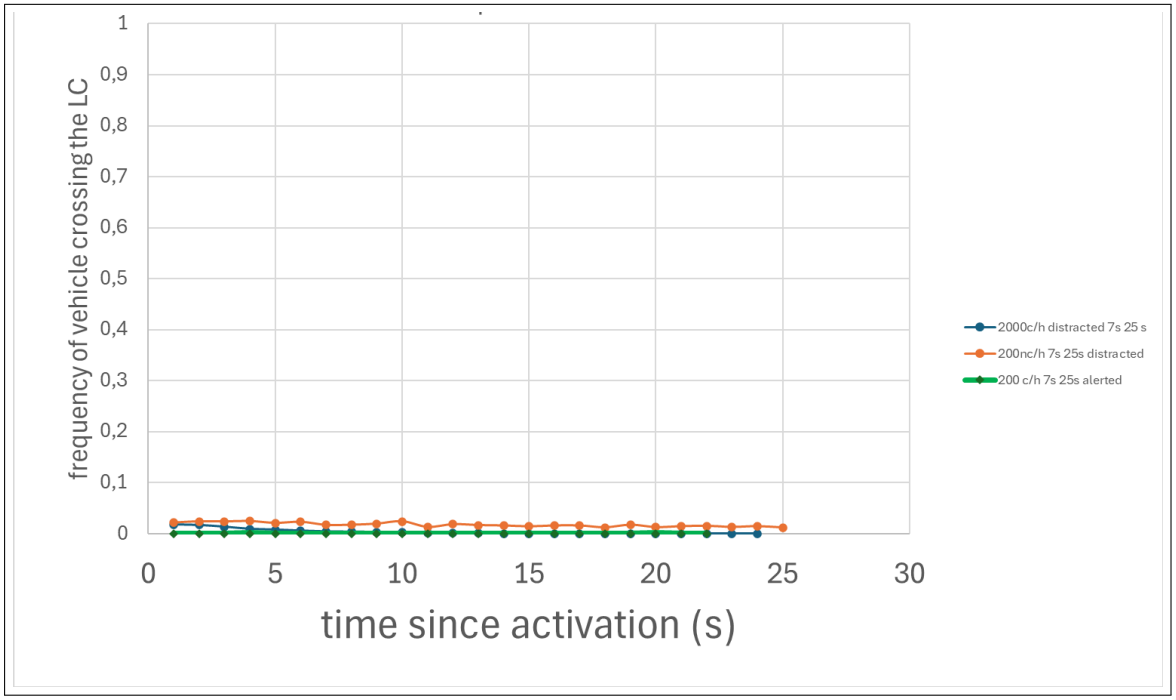



FIGURE 43 – Modèle de comportement des conducteurs aux PN (simulation du respect du code de la route). La réponse des conducteurs n'est pas compatible avec le respect strict du code de la route

Si un conducteur alerté respectait cette exigence, on voit sur la figure 41 qu'avec les fréquences d'arrivée des véhicules (pour 200 v/h), la probabilité qu'un véhicule se trouve au moment du déclenchement de l'activation à l'intérieur de la distance de freinage est très faible. Avec 2000v/h, cette probabilité est faible et on peut constater quelques véhicules traversant dans la simulation pendant les 2/3 premières secondes d'activation Pour les conducteurs distraits, on remarque par contre qu'ils traversent le PN dans la simulation, avec une fréquence faible ou très faible, mais uniquement modulée par l'effet Stott.

En abscisse, la durée écoulée depuis le début du clignotement, en ordonnée la fréquence de passage des véhicules traversant le PN, pour une VMA 30 avec une bonne visibilité (plus de 5s) : la réponse du conducteur n'est pas cohérente avec l'hypothèse « s'arrêter immédiatement, selon le code de la route ».

La conclusion ne change pas avec des VMA de 50 km/h.

*En l'absence de « pré-annonce » tel qu'un feu orange, il est impossible à un conducteur dans la distance de freinage d'arréter immédiatement au PN, et en conséquence, cette exigence n'est pas respectée, MEME PAR DES CONDUCTEURS AU DELA DE LA DISTANCE DE FREINAGE. C'est un des*

*lieux communs de la sécurité routière et de l'ergonomie routière (CESTAC et al. s. d.) (CESTAC et Al, 2018) : face à une exigence irréaliste ou considérée comme illégitime ou irréaliste, les conducteurs routiers l' « interprètent » et sans pré-annonce, l'exigence du code de la route est irréaliste.*

#### 4.3.4.2 Hypothèse : le conducteur interprète le PN comme un feu tricolore « aberrant »

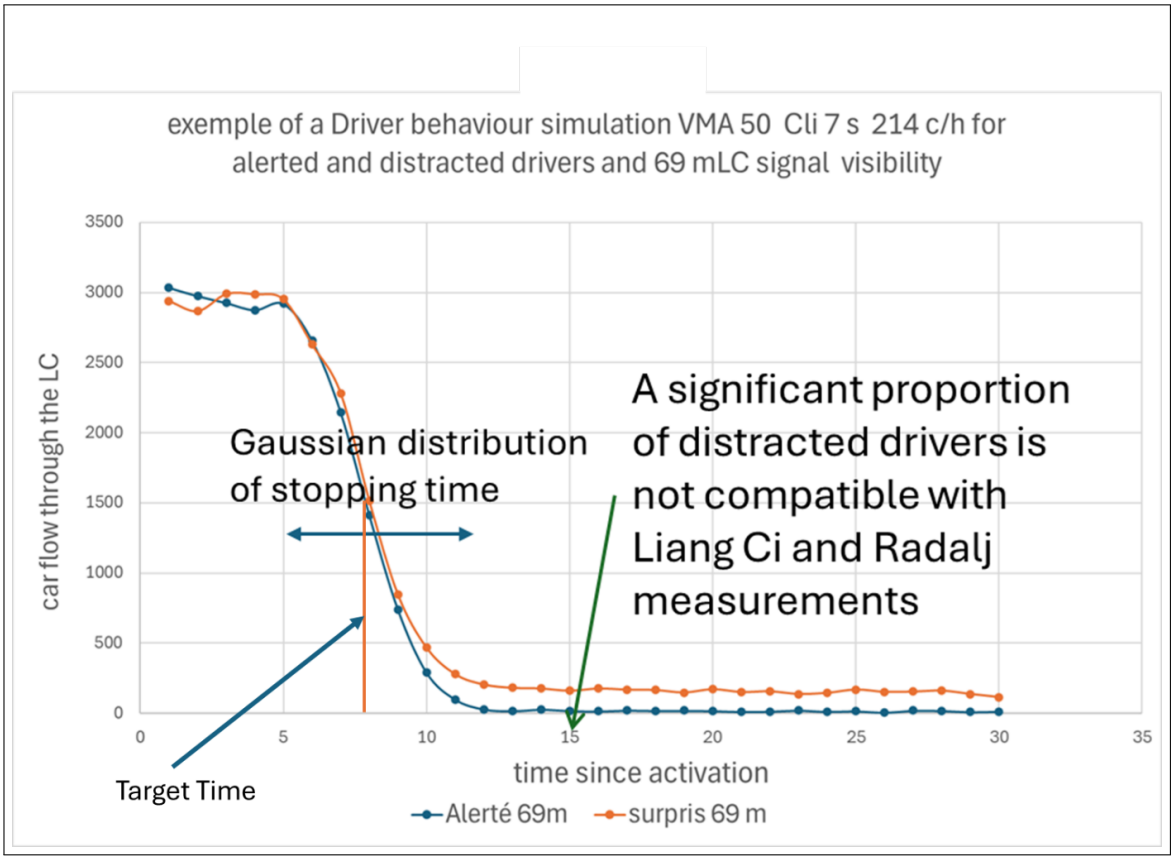



FIGURE 44 – Réponse des conducteurs avec 5 s et 7 s de clignotement Simulation issue du modèle de conducteur avec une distribution gaussienne de T arrêt cible

Le comportement du conducteur est cohérent avec notre deuxième hypothèse : les conducteurs interprètent les trois états d'un PN avec des feux et des barrières comme similaires à des feux de signalisation ordinaires à trois états, avec adaptation à la différence de temps d'avertissement (cf. figure 44).

Dans cette simulation (214 v/h, VMA 50 km/h, Visibilité 69 m) on a en abscisse le temps écoulé depuis le début du clignotement, et en ordonnée le nombre de véhicules ayant franchi le PN à l'instant t dans la simulation.

On constate que le modèle reproduit assez fidèlement le résultat des mesures de MORIPAN, avec un conducteur alerté « visant » à arrêter son véhicule à un « temps cible » un peu avant le début du mouvement des barrières et une dispersion du temps cible reflétant la plus ou moins grande « compétence » du conducteur.

On voit aussi que si le conducteur est alerté, le PN dispose avant l'arrivée du train d'une marge de sécurité considérable (beaucoup plus qu'un feu tricolore)

On constate aussi que, dans ce modèle, les conducteurs distraits sont à l'origine de la quasi-totalité des passages tardifs Les seules possibilités d'accidents suivant notre simulation concernent donc :

- Pour un conducteur alerté, une séquence avec de multiples incidents : un conducteur alerté traverse le PN, mais est immobilisé dans la zone dangereuse par un « second incident », et ne peut pas redémarrer à temps pour se dégager.
- Pour un conducteur distrait, la présence d'une très faible minorité de conducteurs distraits ne remarquant pas le PN activé est compatible avec les mesures de Moripan et expliquerait les quelques passages tardifs constatés.
- Soit un comportement « suicidaire » (Nota : les suicides sont exclus en théorie des statistiques d'accidents de PN).

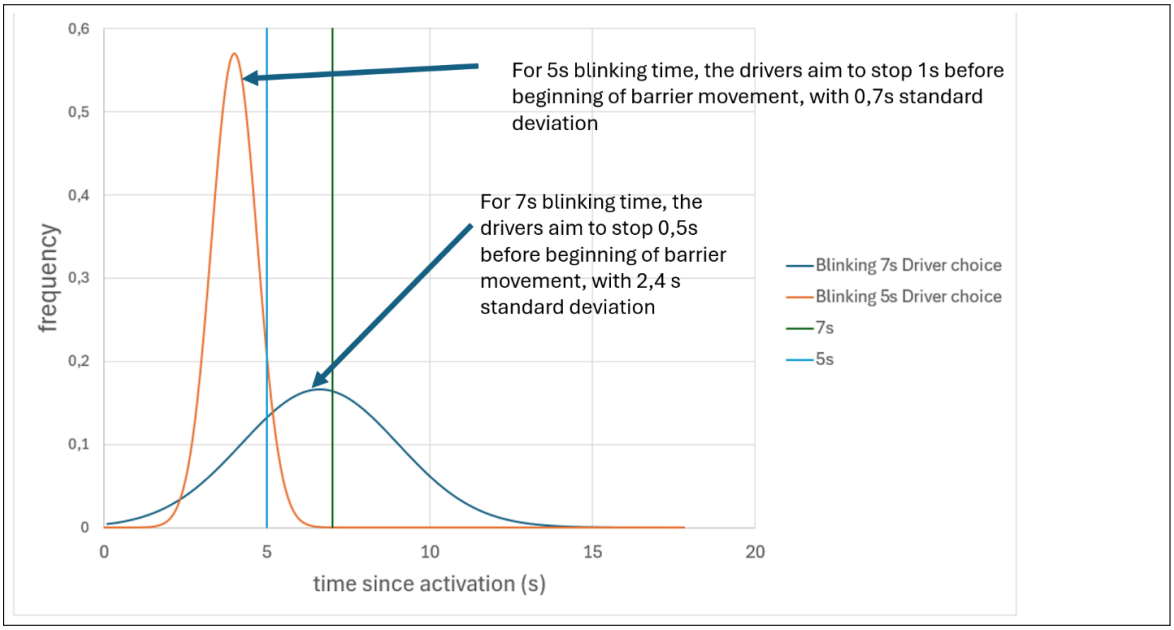



Figure 45 – Distribution du « temps cible d'arrêt » pour les durées de clignotement de 5 s et 7 s compatible avec les observations de Radalj et de Liang. Modèle de comportement du conducteur routier.

Un conducteur routier n'est pas un mécanicien ferroviaire : si on augmente sa marge de sécurité, son comportement devient moins prudent (*Wilde : Risk Homeostasis 1982*). Sur la figure 45, l'abscisse représente le temps « cible » $T$ visé par le conducteur pour arrêter au PN, et l'ordonnée la « fréquence » de ce choix.

On voit que l'on peut modéliser cette distribution statistique par une loi de probabilité gaussienne avec :

- Pour un clignotement de 5s, une espérance $T_m$ de 4 s et un écart type de 0,7s.
- Pour un clignotement de 7s, une espérance $T_m$ de 6,5 s et un écart type de 2,4s.

On constate que pour une durée de clignotement à 5s, les conducteurs ont un comportement à la fois plus prudent (ils visent l'arrêt à 4s) et plus homogène (écart type faible de 0,7s) que pour 7 s (arrêt visé à 6,5 s et écart type de 2,4s).

Cette différence n'est pas surprenante : c'est une conclusion classique dans les études de sécurité routière qu'augmenter la marge de sécurité des conducteurs sur route n'augmente pas toujours la sécurité...parce que les conducteurs routiers utilisent la marge supplémentaire pour adopter un comportement moins prudent. (WILDE 1982)

#### 4.3.4.3 Ce qu'enseigne le modèle de comportement des conducteurs aux PN

**Influence du temps de clignotement sur le risque de collision**

Les passages à niveau français ont deux particularités :

1. Temps d'annonce total court (entre 25 et 35secondes pour la plupart des PN)
2. Longs délais de clignotement avant d'abaisser les barrières (7 s au lieu de 5 s dans les autres pays)

L'idée ultime derrière le long délai de clignotement est de permettre à 100% des conducteurs de s'arrêter avant que le passage à niveau ne commence à fermer...Ce qui n'est clairement pas le cas.

De plus, donner aux automobilistes une marge de sécurité excessive et visible va à l'encontre des tendances modernes en matière de sécurité routière, qui visent désormais des configurations routières qui n'induisent pas un sentiment de sécurité excessif chez l'automobiliste (souvent avec une augmentation concomitante de la cécité involontaire), quand elles ne visent pas à augmenter le risque subjectif perçu sans augmenter ou en diminuant le risque objectif. Mais avant de suggérer qu'une diminution du temps de clignotement de 7 s à 5 s améliorerait la sécurité, il faut d'abord évaluer l'impact :

- Sur les conducteurs distraits, qui sont probablement impliqués dans la majorité des accidents.
- Sur la distance de récupération (distance de visibilité ou distance entre le lieu de la distraction) et le passage à niveau.

**Influence du flux de véhicules (effet Stott) sur le taux d'infractions tardives pour les conducteurs alertés et distraits pour des durées de clignotements de 5 s et 7s**

La figure 46 représente l'impact des différents temps de clignotement (5 s et 7s) sur les passages « tardifs » (passages après 7s) pour les conducteurs « alertés » et « distraits » et pour des flux de véhicules/h entre 20 et 2000.

L'«effet Stott» entraîne bien une diminution des franchissements tardifs, mais l'effet est plus marqué pour les conducteurs alertés que pour les conducteurs distraits.

Pour les passages très tardifs (figure 47), l'impact est encore plus faible, aussi bien chez les conducteurs alertés que chez les conducteurs distraits.

En résumé : avec le flux de véhicules entre 20 et 2000 v/h, on constate que :

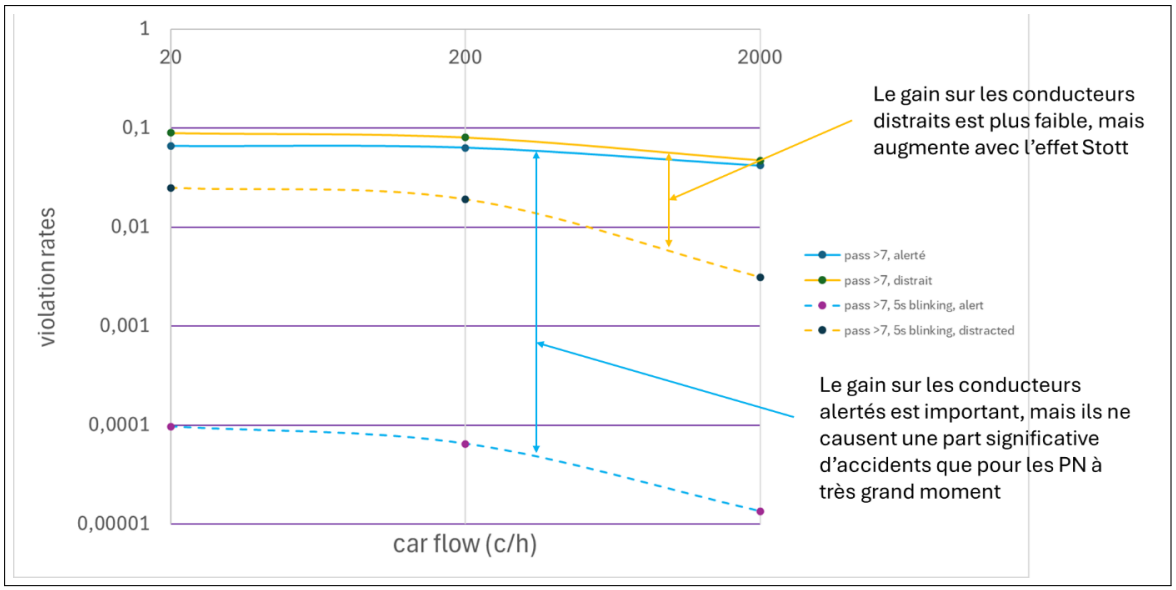



FIGURE 46 – Influence du flux de véhicules sur les passages tardifs pour des flux entre 200 et 2000 v/h et une VMA de 30 km/h, avec une bonne visibilité - Modèle de comportement des conducteurs aux PN

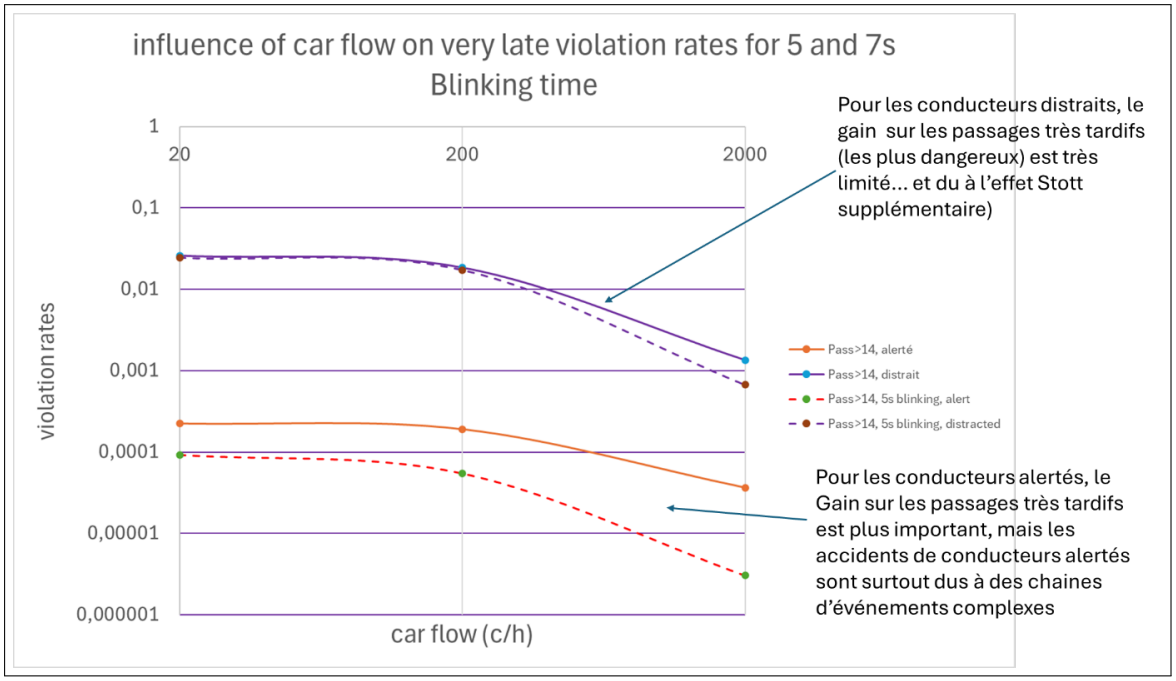



FIGURE 47 – Influence du temps de clignotement sur les passages très tardifs et pour des flux de véhicules de 20 à 2000 v/h, VMA 30 et bonne visibilité. Modèle de comportement des conducteurs aux PN

— Les taux de passages tardifs (après 7s) et très tardifs (après 14s) sont plus faibles quand le temps de clignotement est de 5 s et non de 7s.
— Les taux de passages tardifs et très tardifs diminuent quand le flux de véhicule augmente.
— Le gain entre 5 s et 7 s est surtout important pour les conducteurs alertés.

Encore une fois, ce n'est pas une surprise, puisque les conducteurs distraits ne réagissent pas, ou réagissent très lentement aux stimuli, l'influence d'une réduction du temps de clignotement est limitée après 14 s sur les PN à flux de véhicules faible ou modéré. Elle ne peut être significative que pour les grands flux de véhicules (effet Stott).

*De ces simulations utilisant le modèle de comportement des conducteurs aux PN, il est possible de conclure :*

— Que la diminution du délai de clignotement de 7 à 5secondes avec le même délai d'annonce a probablement une influence faible sur le risque de collision pour les flux de véhicules petits et moyens.
— Qu'il pourrait diminuer significativement le risque d'accident pour les grands et très grands flux de véhicules, mais indirectement : avec 5 s clignotants au lieu de 7s, la probabilité d'une file d'attente de véhicules avant le PN est plus élevée, et l'on sait depuis 1987 (effet Stott) que cela réduit le risque de collision.

**Influence de la distance de récupération/visibilité sur les taux d'infractions tardives pour les retards de clignotement de 5 et 7s.** Concernant la distance de visibilité du PN activé, la figure 48 représente la variation du taux de passages tardifs et très tardifs, pour des clignotements de 5 et 7s, des conducteurs alertés et distraits et la distance de visibilité du PN entre 20 et 60 m pour une VMA de 30 km/h (Soit des durées de visibilité comprises entre 2,4 et 7,2 s).

Cette simulation suggère fortement que la diminution du délai de clignotement diminue le taux d'infraction pour les conducteurs alertés et pour les conducteurs distraits (puisque les deux se comportent plus prudemment lorsque la marge d'arrêt au PN est plus faible).

Par contre, concernant la distance de visibilité, on voit que si le taux de franchissement tardifs plafonne au-delà d'une cinquantaine de m, le taux de franchissement très tardifs continue à diminuer quand la visibilité augmente, et c'est le mode dominant des accidents.

La simulation confirme donc la position du BEA-TT sur l'intérêt d'augmenter la visibilité des R24, ou, si ce n'est pas possible, de réduire la VMA.

#### 4.3.4.4 Conclusion pour 30 km vitesse maximale affichée PN

Bien que le modèle de simulation du comportement d'un conducteur à un passage à niveau soit très simple, il éclaire néanmoins certains points jusqu'à présent non résolus :

1. Concernant le type de signaux lumineux : il ne semble pas y avoir de différence entre le comportement « alerté » d'un automobiliste face à des feux tricolores fixes ou face

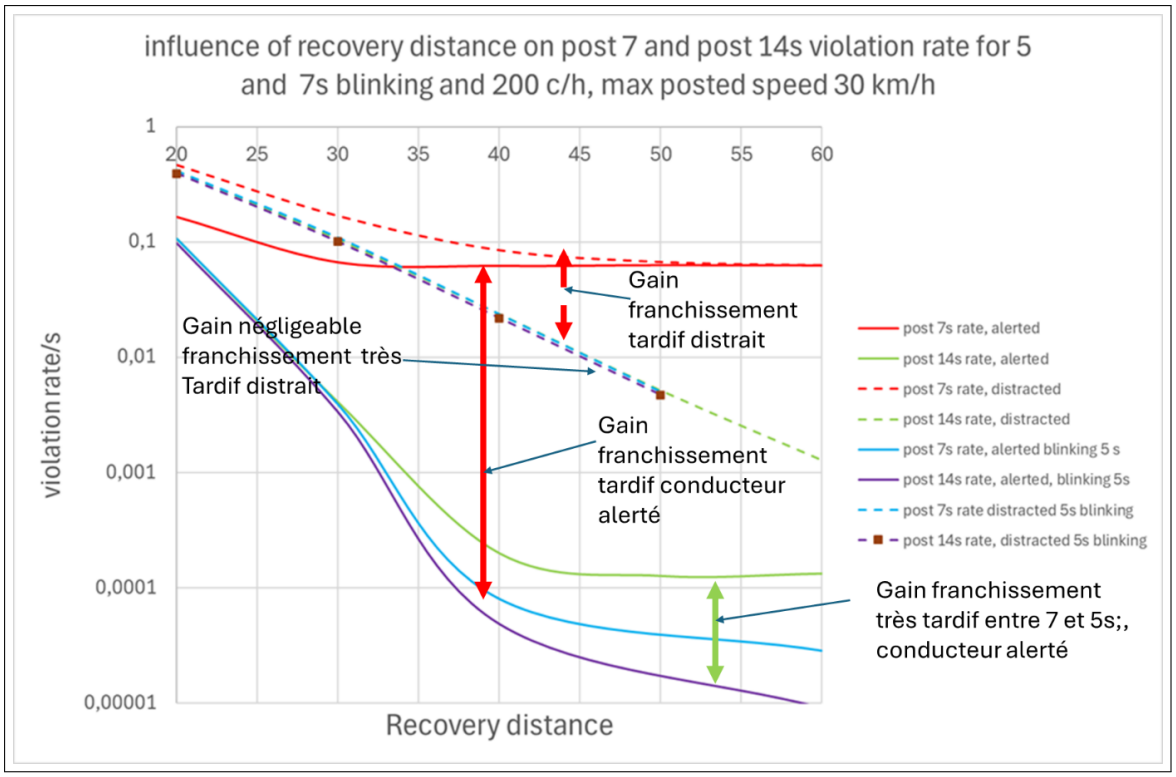



FIGURE 48 – Influence de la visibilité sur les passages tardifs – modèle de comportement des conducteurs aux PN

à un passage à niveau à trois volets (ouvert, activé, fermé ou en cours de fermeture), les différences s'expliquant par la durée des phases orange ou clignotante avant la fermeture.

2. Concernant la durée des phases : il semble que la durée de la phase de clignotement avant fermeture, de 7 s en France, soit trop longue, et entraîne une confiance excessive des conducteurs. La réduire à 5s, ce qui est une durée courante dans de nombreux réseaux, tout en conservant le temps d'annonce total, réduirait probablement le risque de collision aux passages à niveau pour ceux où il y a un grand flux de véhicules.

Enfin, le modèle confirme qu'il est probablement très important, en termes de maîtrise des risques au passage à niveau :

— D'avoir une bonne visibilité du passage à niveau et des signaux/barrières, pour toutes les directions d'approche et tous les types d'usagers.

— D'éviter autant que possible toute cause de distraction pour les conducteurs dans la zone d'approche du passage à niveau, afin qu'un conducteur distrait par un autre point d'intérêt ou danger (intersection, réduction de la largeur de la route, bosse, etc.), ait le temps nécessaire à la fois pour réduire l'occurrence de distraction due à des causes externes, et prendre en compte le risque de passage à niveau.

#### 4.3.4.5 Passages à niveau avec des vitesses affichées plus élevées (50 km/h, 80 km/h, 90 km/h)

Pour des vitesses de 50 km/h, deux modèles ont été développés dans cette thèse :

1. L'un avec la distribution de vitesse « complexe » des essais de Moripan.
2. L'un avec une répartition de vitesse « adaptée », compatible avec notre interprétation, et prenant en compte une adaptation des vitesses des conducteurs « alertés » et des conducteurs distraits en cas de mauvaise visibilité du passage à niveau et de ses signaux.

Compte tenu de notre interprétation, qui rejoint celle de (Torok 2011) la seconde hypothèse a été retenue.

#### 4.3.4.6 Adaptation de la vitesse aux conditions routières

Le fait que les conducteurs routiers adaptent leur vitesse aux conditions routières est un phénomène bien connu, et qualitativement, les facteurs impliqués dans le choix de la vitesse effective du conducteur sont bien connus : distance de visibilité des obstacles, conditions météorologiques, largeur de la route, présence d'intersections, trafic, etc.

Mais il est possible d'utiliser notre modèle comme ci-après :

- Les conducteurs n'adaptent pas leur vitesse lorsque la vitesse maximale affichée est très faible : cette observation a déjà été faite à propos des données Moripan à 30 km/h, et cela est également confirmé dans de nombreuses études sur l'adaptation à la vitesse.
- Pour une vitesse affichée de 50 km/h, et une visibilité limitée D, on adoptera une distribution de vitesse gaussienne :
  - Identique à la distribution à 30 km/h si D est inférieur à 50 m
  - Avec une espérance de 0,6D si D est inférieur à 83,3m
  - Identique à la distribution issue de Torok pour D supérieure ou égale à 83 m.

Avec cette adaptation de vitesse, les résultats de la simulation, pour un conducteur alerté, sont conformes aux observations de Ci Liang dans Moripan (cf. Figure 49).

À l'inverse, utiliser la distribution de vitesse sans adaptation conduirait à un taux de passage très tardif extrêmement élevé.

Comme le montre la figure 49, avec une adaptation de vitesse des conducteurs en fonction de la visibilité, le risque de passage très tardif diminue avec la distance de visibilité, puis se stabilise, voire réaugmente.

Pour les conducteurs distraits, l'évolution est similaire, mais bien sûr avec un risque beaucoup plus élevé de passages tardifs (cf. figure 50).

De la même manière que l'augmentation du temps de clignotement avant de fermer les barrières ne réduit pas le risque, l'augmentation de la distance de visibilité ne réduit pas nécessairement le risque, du moins au-dessus de celle-ci d'une certaine valeur.

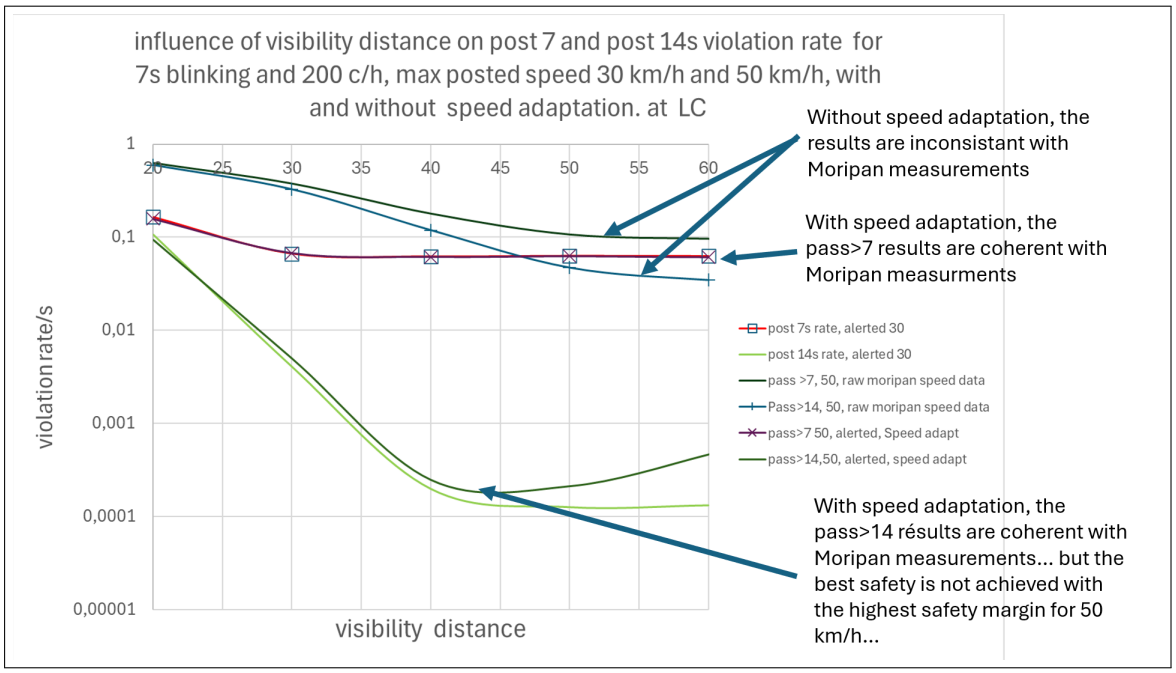



FIGURE 49 – Influence de la visibilité sur le taux d'infraction de +7 s et +14s, AHB français, retard de 25s, clignotement de 7s, 200 c/h, conducteur alerté – modèle de comportement des conducteurs aux PN

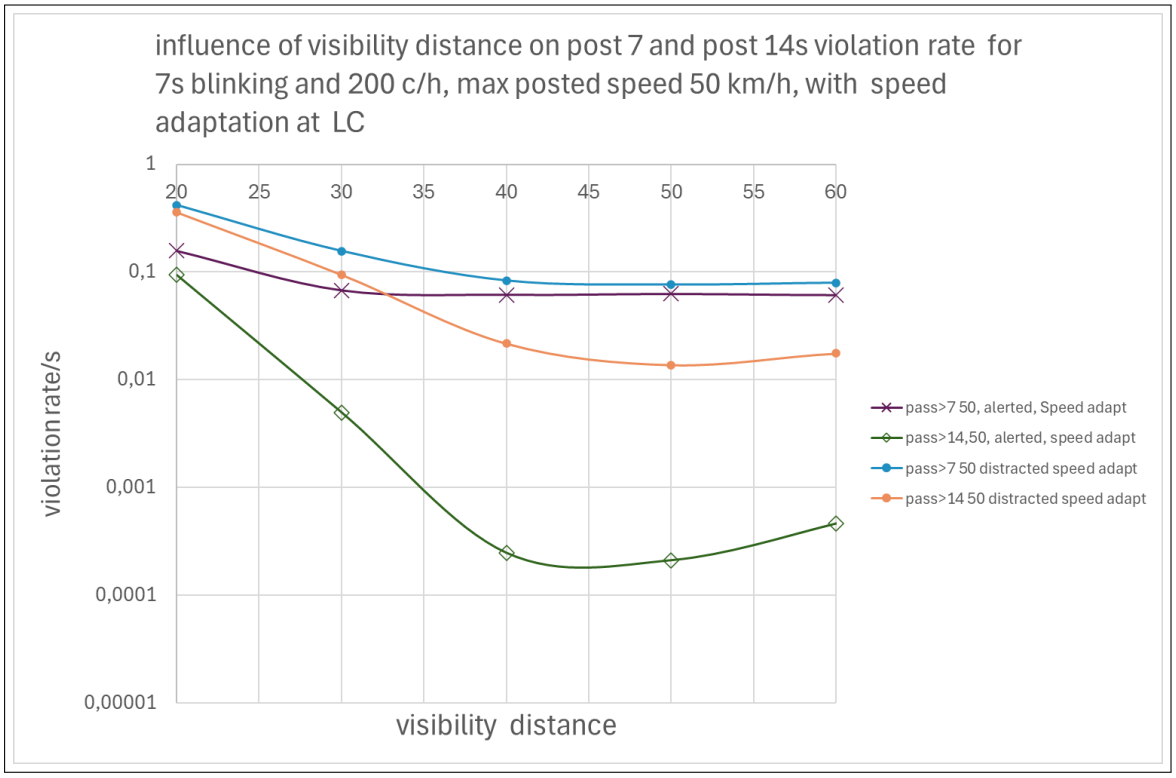



FIGURE 50 – Influence de la visibilité sur le taux d'infraction de +7 s et +14s, AHB français, retard de 25s, clignotement de 7s, 200 c/h, conducteur distrait – modèle de comportement des conducteurs aux PN

Si ce type de comportement ne se manifeste pas chez les conducteurs ferroviaires, il est relativement fréquent chez les conducteurs routiers : l'augmentation de la marge de conception et la réduction du danger apparent entraînent une augmentation des comportements à risque...et parfois, conduit à un risque plus élevé.

Cependant, étant donné que les conducteurs font très peu pour adapter leur vitesse en dessous de 30 km/h, viser des distances minimales de visibilité de 40/50 m (pour des vitesses maximales inférieures ou égales à 50 km/h) et éviter, dans la mesure du possible, toute cause de distraction pour les automobilistes dans cette zone à l'approche du passage à niveau devrait limiter le risque.

#### 4.3.4.7 Synthèse des résultats du modèle de comportement des conducteurs aux PN

*Même si le modèle de comportement des conducteurs aux PN utilisé est relativement sommaire, il permet de conclure que, face à un système de PN à feux et barrières pouvant présenter 3+2 aspects (1 : pas de clignotant, barrières hautes, 2 : clignotant, barrières hautes, 3 : clignotant, barrières en mouvement; 4 clignotant, barrières fermées, 5 clignotant, barrières en réouverture), le conducteur réagit de la même manière que devant un feu tricolore, et non comme il le devrait en fonction du code de la route (clignotant= arrêt immédiat) :*

- 1 est pour le conducteur l'équivalent d'un feu vert.
- 2 est pour le conducteur l'équivalent d'un feu orange.
- 3-4 est pour le conducteur l'équivalent d'un feu rouge.

*Cette simulation explique aussi pourquoi, comme on le verra plus loin, le remplacement, en Allemagne, de feux clignotants par des feux fixes à deux aspects, avec : 1 : pas de feu, barrières hautes, 2 : jaune fixe, barrière haute, 3 : rouge, Barrière en mouvement, 4 : rouge, barrière basse, 5 : rouge, barrière se relevant, n'a eu aucune conséquence apparente quant au comportement des conducteurs et à l'accidentologie, les conducteurs interprétant toujours les aspects successifs de la même façon.*

Cette simulation confirme aussi l'une des conclusions, apparemment paradoxale, du modèle prédictif de risque qui sera explicité plus loin :

- « Statistiquement », les conducteurs se comportent, de façon très majoritaire, comme des conducteurs « non distraits », les conducteurs « distraits » étant une infime minorité : les mesures de Liang n'ont « vu » qu'une poignée de conducteurs distraits, malgré des mesures sur plusieurs mois.
- Cependant, les conducteurs « non distraits » correspondent à une petite minorité des accidents, car dans leur cas, il est nécessaire qu'il y ait un second incident qui les immobilise dans la zone dangereuse, et qu'ils ne puissent pas s'échapper à temps.
- À l'inverse, les conducteurs « distraits » représentent la quasi-totalité des franchissements tardifs, avec un taux de franchissement indépendant du délai depuis l'activation (à l'effet Stott près), et une probabilité d'accident élevée : Ils représentent une très faible proportion des conducteurs, mais une majorité des accidents.

### 4.3.5 Conclusion sur le comportement des conducteurs routiers à partir du modèle et des données bibliographiques

#### 4.3.5.1 PN à feux et barrières

Trois hypothèses ont été testées quant au comportement des conducteurs :

- Le comportement des conducteurs aux PN est différent de celui des conducteurs routiers à un feu tricolore.
- Le comportement des conducteurs est comparable à celui d'un conducteur « alerté » à un feu tricolore.
- Le comportement des conducteurs est comparable à celui d'un conducteur routier surpris par un obstacle inopiné (conducteur « distrait »).

La seule hypothèse compatible avec les observations est que le comportement de la majorité des conducteurs est le même qu'à un feu tricolore, mais qu'une petite minorité de conducteurs distraits est probablement à l'origine de la majorité des accidents.

*En effet, les conducteurs « distraits » ont un risque beaucoup plus élevé de franchissement tardif du PN, et les distances de visibilité actuellement recommandées ne sont pas totalement adaptées à cette sous-population de conducteurs particulièrement accidentogènes.*

*En zone urbaine, il pourrait être possible de réduire le risque d'accident au PN en améliorant la distance de visibilité et/ou en réduisant la VMA, alors qu'en zone non urbaine, on pourrait, à l'instar de l'Allemagne, réduire systématiquement la VMA aux abords du franchissement du PN.*

Cependant, ce modèle ne donne qu'une seule indication quant aux conducteurs distraits et non distraits : globalement, le comportement des conducteurs est celui de conducteurs alertés, les conducteurs distraits sont vraisemblablement très minoritaires.

Mais comme le risque est beaucoup plus élevé pour un conducteur distrait, cela ne préjuge pas de la répartition des causes d'accidents.

#### 4.3.5.2 PN à feux sans barrières (non utilisés à la SNCF, mais très utilisés pour les tramways)

Les PN à feux sans barrières sont presque absents en France, en Ferroviaire classique. Cependant, ils sont très présents en Tramways urbains. L'analyse des quelques résultats publiés d'observation semblent montrer un comportement un peu différent de celui des PN à feux à barrières :

- La durée de passage après activation des feux semble assez voisine de celle constatée sur les PN à feux et barrières (au moins 10s).
- En l'absence d'un second repère (chute des barrières, passage du feu tricolore du jaune au rouge) la diminution du flux de passage est beaucoup plus constante, et la proportion de passage tardifs est plus élevée. Comme dans beaucoup de pays, la durée d'annonce des PN à feux seuls est significativement plus courte que celle des PN à feux et barrières, ce qui entraine probablement un risque d'accident lié à l'imprudence plus élevé que pour les PN à barrières sans compter que l'absence de barrières rend le PN moins « remarquable » et augmente aussi le risque de cécité d'inattention.

#### 4.3.5.3 PN à Stop ou croix de Saint-André

Le comportement des conducteurs est lié aux stimuli qu'il reçoit de son environnement : On a pu notamment le quantifier dans le cas de PN à feux et de PN à feux sans barrières.

Dans le cas de PN à Stop ou croix de SA, le seul stimulus est la vue ou non d'un train. Mais pour ces PN, comparés à des carrefours ordinaires, il y a deux différences majeures :

- La faible probabilité de rencontrer un train, qui va augmenter le risque de cécité d'inattention
- L'illusion d'optique de Leibowitz, qui va augmenter fortement le risque d'erreur de conduite.

Nous avons vu dans ce chapitre comment se comportaient les conducteurs routiers devant le stimulus d'activation du PN. Le chapitre suivant va être consacré à la suite de l'événement, et à modéliser l'accidentologie dans le cas ou le conducteur a franchi le PN et se retrouve dans la zone de danger.

# Chapitre 5

# Modèles d'accidentologie aux passages a niveau

## Table des matières


5.1 Modèle préliminaire d'accidentologie aux passages à niveau . . . . . 105

5.2 Passer du modèle préliminaire au modèle générique d'accidentologie aux passages à niveau . . . . . 108

5.3 Principes du modèle générique d'accidentologie aux PN . . . . . 109

5.3.1 Mécanismes d'accidents . . . . . 109

5.3.2 Ratio $Cd/Ce$ : ratio « incident dû à la cécité d'inattention/incident dû à l'imprudence » . . . . . 110

5.3.3 Comportement des véhicules captifs à un passage à niveau . . . . 111

5.4 Description qualitative et quantitative du modèle générique d'accidentologie aux PN . . . . . 111

5.4.1 Description qualitative du modèle . . . . . 111

5.4.2 Équations du modèle . . . . . 112

5.4.3 Utilisation du modèle pour « évaluer » le rapport . . . . . 115

5.4.4 Prévalence importante des accidents due à la distraction est-elle crédible ? . . . . . 120

5.5 Validation du modèle sur un échantillon extrême de SAL 2 et sur les SAL 4 français . . . . . 123

5.5.1 Validation du modèle sur des échantillons « extrêmes » de SAL 2 . 123

5.5.2 Validation du modèle en utilisant l'accidentologie des SAL 4 . . . . 126

5.5.3 Efficacité des SAL 4 ou comment représenter en une seule dimension un phénomène pluridimensionnel . . . . . 129

5.5.4 Impacts sur les modes de représentation des résultats . . . . . 132

5.6 Validation du modèle simplifie d'accidentologie aux PN sur les PN a détecteurs d'obstacles au Japon . . . . . 133

5.6.1 Passages à niveau japonais . . . . . 133

5.6.2 Performances de freinage . . . . . 134

5.6.3 Résultat de la simulation des DOPN et comparaison avec le retour d'expérience de 1997 . . . . . 135

5.7 Limites probables de validité du modèle générique d'accidentologie aux PN 139

## 5.1 Modèle préliminaire d'accidentologie aux passages à niveau

Ce modèle a pour objectif de quantifier l'importance des divers paramètres pouvant jouer sur le niveau de risque de collision au PN, ainsi que les interactions entre ces paramètres.

Il comprend :

- Un module « comportement du conducteur routier » analogue au modèle décrit au paragraphe précédent qui, sur la base d'un tirage au sort de la distance du véhicule au moment de l'activation du PN et de l'instant cible visé, détermine, s'il y a déjà une queue (dans le cas des véhicules de rang supérieur à 1), si le véhicule traverse le PN, à quel moment, ou s'il s'immobilise devant le PN (en créant une queue pour le véhicule suivant).
- Un module « ferroviaire » incluant :
  - Le temps de réaction d'un mécanicien ferroviaire à un signal ou au stimulus visuel d'un obstacle sur la voie (pris comme conducteur alerté) selon (KOPPA 2000).
  - Un modèle de freinage du train, basé d'une part sur une répartition annuelle de l'adhérence du rail (mesures publiées par TU Delft) les caractéristiques de trois trains utilisées sur le réseau français (MA 100, AUT 140 1300, V160) et une borne inférieure (freinage d'urgence suivant la SAM F005).
- Un module « accident » qui, en fonction de l'instant de déclenchement de l'accident par rapport au début d'activation.
  - Évalue la proportion de conducteurs distraits et alertés.
  - Tire au sort une vitesse de train (en fonction des répartitions de trains sur la ligne, avec deux options).
    - La vitesse maximale du train sur la ligne dans 5% des cas (train en retard).
    - La vitesse du train sur la ligne incluant la marge de régularité (train à l'heure) dans 95% des cas.
  - Tire au sort un temps de réaction du mécanicien.
  - Tire au sort une adhérence rail roue.
  - Calcule l'instant d'arrivée du train au PN avec les données ci-dessus.
  - Tire au sort une probabilité de redémarrage du véhicule routier.
  - Évalue l'espérance de collision pour l'ensemble des véhicules ayant. franchi le PN pendant l'activation.
  - Évalue l'espérance de collision journalière et annuelle en utilisant une répartition moyenne des trains sur la journée

Ci-dessous, quelques-unes des hypothèses principales prises dans le modèle :

- En figure 51, la distribution de probabilité du temps mis par un véhicule immobilisé dans la zone dangereuse pour s'échapper (le mécanisme d'esquive), utilisée à la fois dans le 1er modèle de Monte-Carlo, mais aussi dans le modèle d'accidentologie PN simplifié définitif décrit au chapitre suivant. Cette distribution a été établie à partir d'un nombre limité d'observations de SNCF Réseau et confirmée par un échange avec JR EAST (Nakajima Yasunori).

— En figure 52, la distribution quotidienne des trains et des véhicules. Elle correspond à la distribution « moyenne » des variations quotidiennes des flux de trains et de véhicules des 13 PN instrumentés dans le cadre du projet MORIPAN. Elle a été réutilisée dans le modèle générique définitif du PN.
— Le taux de conducteurs distraits est évalué, sur la base d'une interprétation des résultats de MORIPAN, comme évoluant en fonction du nombre de trains en $T^{-0,3}$. Ce taux n'a pas été réutilisé dans le modèle générique définitif d'accidentologie aux PN.

Le modèle initial a été utilisé pour faire des premières simulations dont on trouvera un exemple en figure 53.

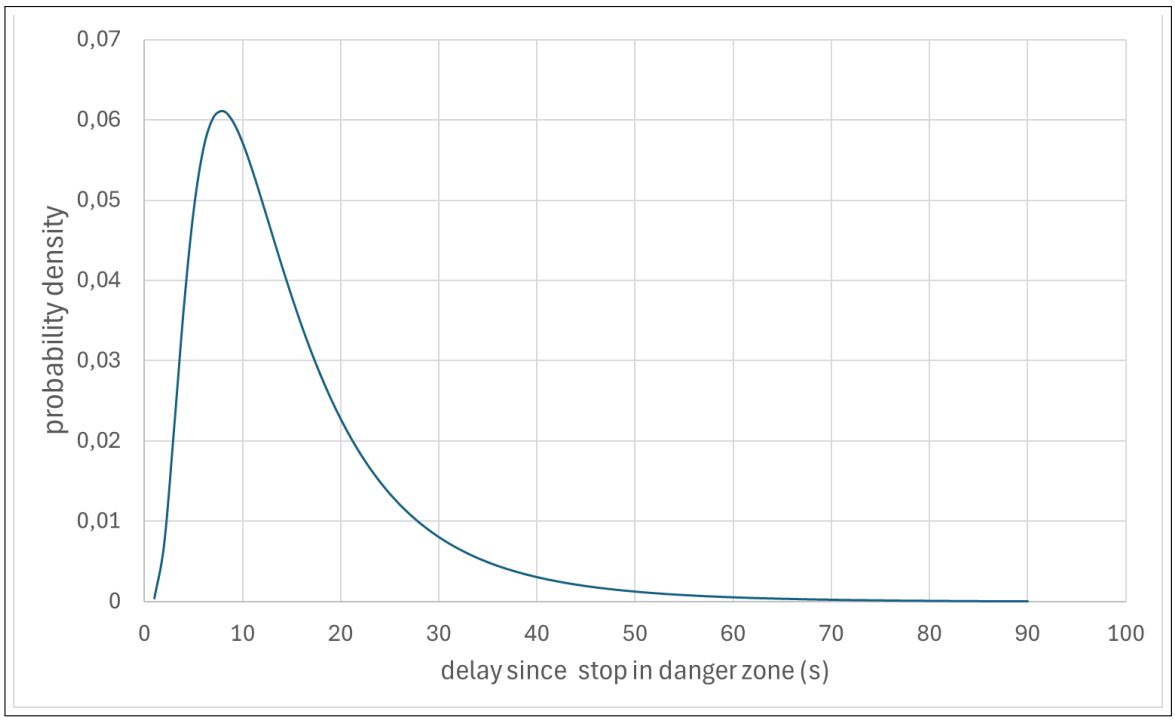



FIGURE 51 – Densité de probabilité de redémarrage d'un véhicule immobilisée dans la zone dangereuse – Synthèse des échanges et des observations de SNCF (essais préliminaires de DOPN 2015/2017) et de JR EAST (Nakajima Yasunori)

Ce modèle n'est pas dépourvu d'intérêt, et on voit sur la figure 53 que les résultats « ressemblent » au retour d'expérience de notre réseau.

Mais il souffre de deux graves inconvénients :
— Un temps de calcul exorbitant, qui empêche de faire des simulations sur un nombre significatif de variantes, de politiques,
— Une répartition conducteurs alertés/distraits basée sur une relation approximative en fonction du nombre de trains.

Ce modèle ne pouvait donc être qu'un modèle exploratoire. Son utilisation pratique, industrielle, est impossible et son utilisation pour une recherche des causes d'accidents aux PN limitée.

Il est donc nécessaire de voir quelles simplifications peuvent réduire le temps de calcul :

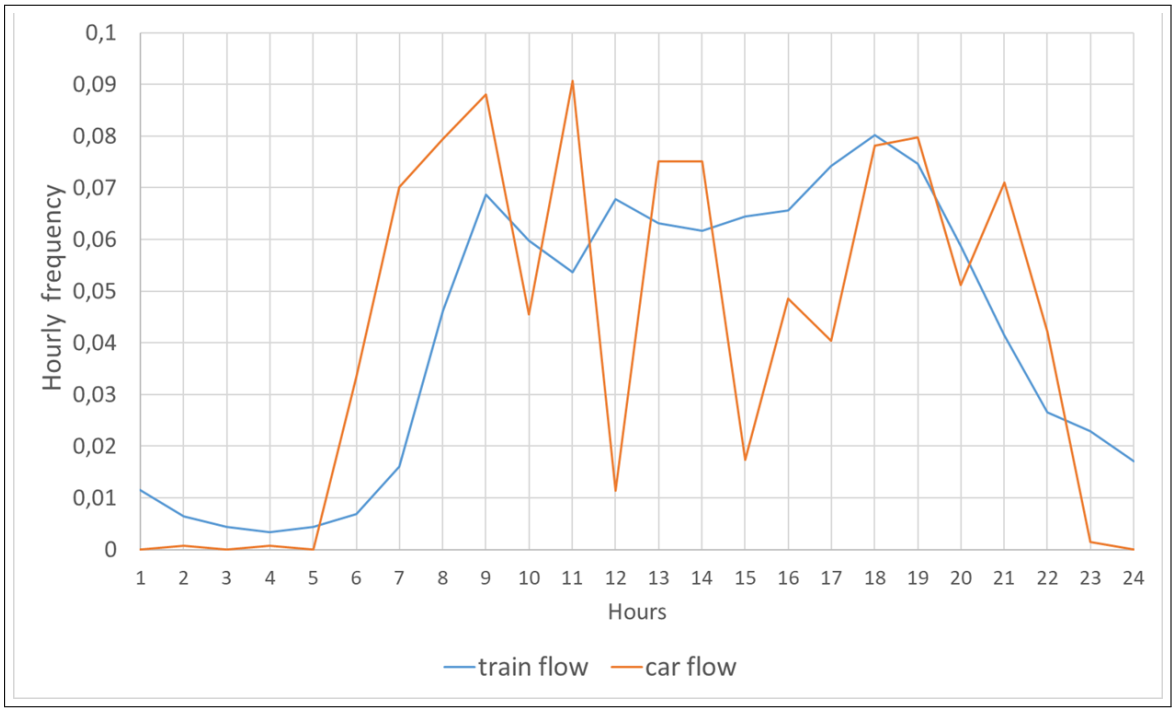



FIGURE 52 – Variation quotidienne des flux de trains et de véhicules, prise dans le modèle préliminaire d'accidentologie aux PN en fonction des heures de la journée et de la fréquentation horaire (distributions évaluées à partir des 13 PN testés par C. Liang dans le cadre de MORIPAN en 2018)

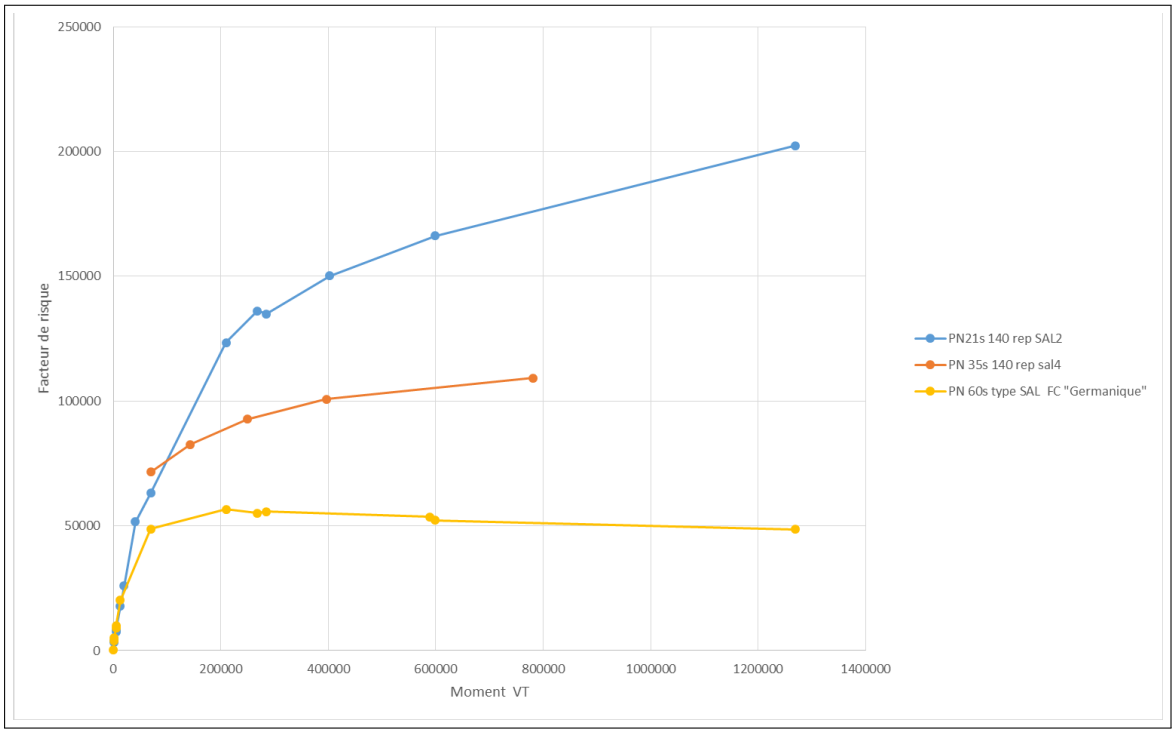



FIGURE 53 – Une des premières simulations du comportement de la population des PN français, avec le modèle de MC préliminaire d'accidentologie aux PN, donnant le facteur de risque de collision en fonction du moment VT et du type de PN sur des populations « représentatives » de PN du réseau SNCF.

— Remplacement du calcul du comportement du conducteur (pour chaque passage de véhicule) par la loi de comportement « idéalisée » tirée des mesures de Radalj (pour 5s) et Liang (pour 7s)
— Remplacement du calcul du freinage par un calcul « simple » suivant le modèle de la SAM F005.

Cette dernière simplification ne modifie pas le résultat pour les PN « classiques » mais peut conduire à une sous-estimation des performances des PN à détecteurs d'obstacles, mais qui pourrait être compensée si on complétait le calcul avec les données et le modèle de la SAM F005 par un calcul avec les performances de freinage « moyennes » et à n écart types.

## 5.2 Passer du modèle préliminaire au modèle générique d'accidentologie aux passages à niveau

L'objectif de ce chapitre est de développer, à partir du modèle précédent, un modèle générique prédictif pour comprendre l'accidentologie des passages à niveau et pouvant être utilisé pour guider le développement de nouveaux concepts de PN :

— En utilisant les observations du comportement des conducteurs (LIANG 2018 ; RADALJ 2025 ; LARUE et al. 2018) pour évaluer une distribution de probabilité d'entrée dans la zone dangereuse, de vitesse de formation d'une queue de véhicules.
— En utilisant des données sur le freinage de la SAM F005, le comportement des mécaniciens, etc et les lois de la mécanique pour déterminer si l'accident aura lieu.
— En utilisant le comportement global de l'ensemble de passages à niveau » ainsi que le modèle pour évaluer ce qui est trop rare pour être mesuré directement (au moins sur les PN à feux et barrières), c'est-à-dire taux d'incidents lié à la cécité d'inattention et à la cécité de changement.

En examinant les résultats du modèle de Monte-Carlo initial, on a pu constater que certains des mécanismes aléatoires jouaient peu sur les résultats d'une comparaison entre deux types de PN : le temps de réaction du mécanicien et le calcul du freinage pouvaient être simplifiés et remplacés par un calcul simple utilisant les paramètres de la SAM F005 (Freinage d'urgence ou freinage de service), le comportement des conducteurs calculé pouvait être remplacé par les résultats des observations de Liang ou de Radalj.

Or, adopter cette simplification entraîne des conséquences importantes :

— Il n'y a plus besoin, pour évaluer le risque correspondant à chaque mécanisme d'accident, de faire un calcul de Monte-Carlo, le résultat peut être obtenu par une intégration numérique type Runge-Kutta ou par la méthode des trapèzes.
— Le temps de calcul est quasiment instantané, la taille des fichiers réduite, et le modèle peut être à priori reproduit en quelques heures par un non-informaticien (à titre de démonstration, le calcul a été implémenté sur un simple tableur, sur un ordinateur portable de performances modestes).

— Cela permet de multiplier les calculs, et notamment d'utiliser le modèle pour obtenir une évaluation du rapport $Cd/Ci$ plus précise que celle utilisée dans le modèle complet préliminaire.

C'est ce modèle générique d'accidentologie aux PN qui est décrit plus complètement dans ce chapitre.

## 5.3 Principes du modèle générique d'accidentologie aux PN

### 5.3.1 Mécanismes d'accidents

Il existe deux principaux mécanismes d'accidents aux passages à niveau :

— Le « mécanisme » d'erreur de jugement :
  — Selon les mesures effectuées par Ci Liang dans sa thèse, les véhicules, les camions, les motos, etc. entrent dans le passage à niveau entre l'apparition des feux clignotants et l'abaissement quasi complet des barrières d'entrée.

    Un autre incident arrive et l'usager de la route sera immobilisé dans la zone dangereuse. Il va essayer de redémarrer...et réussira souvent à sortir, surtout s'il est entré suffisamment tôt dans la zone dangereuse ou si le délai avant l'arrivée du train est important.
— Comme en France le temps clignotant avant de fermer les barrières est très long (7 s contre 4/5 s dans la plupart des pays), ils pensent avoir « le temps » de franchir même lorsque le cycle est assez avancé.
  — Ce mécanisme est, en général d'initiation précoce, mais dans quelques cas, il y a violation délibérée des règles (contournement/ chicane) : l'usager du passage à niveau contourne les barrières. C'est l'une des principales causes d'accidents pour les modes doux.
  — Pour les véhicules à moteur, la « chicane » n'est possible que pour les passages à niveau à demi-barrières. Elle n'a pas été observée lors des essais MORIPAN, et elle semble très rare, sauf dans le cas où les automobilistes sont convaincus que le passage à niveau est en panne (fermeture anormalement longue par exemple) : pour les véhicules motorisés, la chicane est un cas extrême d'erreur de jugement.
— Le mécanisme «cécité d'inattention» :
  — Les conducteurs, en particulier sur les passages à niveau avec peu de trains, sont souvent des habitués. Ils passent toujours aux mêmes heures, parfois ne rencontrent jamais de trains, et «apprennent» inconsciemment que le passage à niveau est toujours ouvert.
  — Nos passages à niveau ne semblent pas avoir été analysés par les autorités organisatrices routières comme des « carrefours », et beaucoup présentent des caractéristiques qui vont favoriser la cécité d'inattention vis-à-vis du PN activé (carrefours proches, tracés difficiles, mauvaise visibilité des signaux pour certains types d'usagers, variations de largeur de voirie, etc).

Dans le modèle, sont utilisés :

— La répartition des véhicules entrant dans le passage à niveau telle que mesurée par Liang Ci (mécanisme 1) : Après 12s, aucun véhicule n'a été détecté entrant dans la zone dangereuse, sur 13 passages à niveau et après 4/5 mois d'observation.
— Une probabilité de cécité involontaire fonction du moment pour les conducteurs distraits (Mécanisme 2).

La chicane volontaire (au sens strict) est très rare pour les passages à niveau bien entretenus, et inexistante pour les passages à niveau à quatre barrières et sera négligée dans l'analyse des accidents de mode motorisés.

### 5.3.2 Ratio $Cd/Ce$ : ratio « incident dû à la cécité d'inattention /incident dû à l'imprudence »

Le ratio « incident dû à la cécité d'inattention/incident dû à l'imprudence » dépend de :

1. L'ergonomie du passage à niveau vu de la route, et en particulier la visibilité du passage à niveau activé [1], mais aussi de la « dangerosité perçue » du passage à niveau (si le conducteur a « appris » inconsciemment qu'il n'y a jamais de train, il peut ne pas remarquer le passage à niveau activé).

   Dans leur analyse récente, BEA-TT a montré l'importance de la visibilité du passage à niveau activé, et surtout la nécessité d'avoir une « bonne » vue du R24 clignotant pendant un temps assez long. L'analyse BEA-TT est une explication partielle des résultats de Ci Liang.
2. Le moment $T \times V$ : une faible probabilité de rencontres véhicule/train signifie un risque plus élevé de cécité d'inattention (« apprentissage » par le conducteur que le PN est « toujours ouvert »).

Une fois l'incident arrivé, cet incident peut ou non se transformer en accident. Cela va dépendre de plusieurs facteurs :

1. Circulation routière : s'il y a beaucoup de circulation, une file d'attente se formera devant le passage à niveau, ce qui empêchera les conducteurs distraits d'entrer dans la zone dangereuse.
2. L'instant où se déroule l'incident : En fonction du temps restant avant l'arrivée du train, un véhicule qui se retrouve dans la zone dangereuse pourra ou non redémarrer et esquiver le train.

Ce ratio n'est pas mesurable directement :
— On n'a pu observer directement que quelques cas d'accidents liés à l'imprudence sur Roissy-en-Brie, dont le moment est très élevé. Sur des PN à moments plus faibles, leur fréquence est trop faible, l'observation nécessiterait d'instrumenter le PN pendant plusieurs centaines d'années.
— La situation est encore plus difficile pour observer le mécanisme lié à la cécité d'inattention : son existence est avérée par l'analyse a posteriori d'accidents et quelques

1. Dans sa thèse, Ci Liang a constaté que certaines configurations étaient plus sujettes aux accidents « looked but not seen / regardés, mais pas vus » : des aménagements routiers complexes avec de nombreuses routes convergeant vers les passages à niveau, des passages à niveau avec des routes parallèles

passages dans MORIPAN correspondant, mais il n'a pas été observé d'accidents ni dans les essais de MORIPAN, ni dans les essais de détecteurs d'obstacles de la SNCF.

Mais l'évolution « moyenne » du risque en fonction de la fréquentation est une mesure indirecte du ratio, dans la mesure où les essais de MORIPAN montrent que le comportement des conducteurs et leur décision de franchissement ne varie pas avec le Moment.

### 5.3.3 Comportement des véhicules captifs à un passage à niveau

Une fois le véhicule dans la zone dangereuse (lorsqu'il n'y a pas de queue et que le conducteur a commis une erreur de jugement), il faut modéliser le comportement des véhicules « prisonniers » au passage à niveau.

En effet, les observations de la SNCF lors des essais de détecteur, d'obstacle, ainsi que celles de JR EAST montrent que la séquence des événements conduisant à un accident est la suivante :

1. Un véhicule pénètre dans le passage à niveau, entre le début de l'activation et l'arrivée du train.
2. Un second événement (un incident comme une remontée de file d'attente, panne ou un événement comme une « prise de conscience » du PN activé par un conducteur distrait qui brise la barrière) provoque l'arrêt du véhicule dans la zone dangereuse.
3. Le véhicule tente de redémarrer. Selon la cause de l'immobilisation, le sang-froid du conducteur, ce redémarrage peut prendre plus ou moins de temps.
4. S'il reste suffisamment de temps, le véhicule parvient à s'échapper.
5. Si le temps avant l'arrivée du train est insuffisant, il y a un accident.

## 5.4 Description qualitative et quantitative du modèle générique d'accidentologie aux PN

### 5.4.1 Description qualitative du modèle

Pour qu'il y ait un accident, plusieurs conditions doivent être satisfaites :

1. Dans le cas d'un incident lié à une erreur de jugement
   (a) Il ne doit pas y avoir de queue au PN et le conducteur doit avoir décidé qu'il avait le temps de franchir le PN en toute sécurité.
   (b) Un second incident fait qu'il s'immobilise dans la zone de danger.
   (c) Le conducteur essaie de redémarrer mais n'a pas le temps avant l'accident.
2. Dans le cas d'un incident dû à la cécité d'inattention /distraction
   (a) Il ne doit pas y avoir de queue au PN.
   (b) Le conducteur ne « remarque » le PN que très tardivement, souvent lorsqu'il percute les barrières ou pénètre la zone dangereuse, et freine d'urgence par réflexe.
   (c) Le conducteur essaie de redémarrer mais n'a pas le temps avant l'accident.

3. Dans le cas d'un PN « traditionnel », l'accident a lieu au moment prévu d'arrivée du train, fonction de l'annonce théorique et de sa vitesse inférieure ou égale, en fonction du type de train, à la vitesse de ligne.
4. Dans le cas d'un PN à détecteur d'obstacle, après le temps de réaction du conducteur, le train freine avec les valeurs de freinage de service de la SAM F005. Dans ce cas, pour qu'il y ait accident, ll faut que le train ne puisse pas s'immobiliser avant le PN ET que le conducteur routier n'ait pas pu redémarrer avant l'accident.

### 5.4.2 Équations du modèle

La probabilité $Pt(u)$ qu'un conducteur choisisse de traverser le passage à niveau est modélisée, en fonction du temps écoulé depuis l'activation, conformément à MORIPAN (pour un clignotement de 7s) ou conformément à Radalj (mesures de Perth pour un clignotement de 5secondes) lorsqu'il n'y a pas de file d'attente, et $P_t(u) = 0$ s'il y a une file d'attente de véhicules devant le PN. La figure 54 représente la distribution de $P_t$ prise dans le modèle.

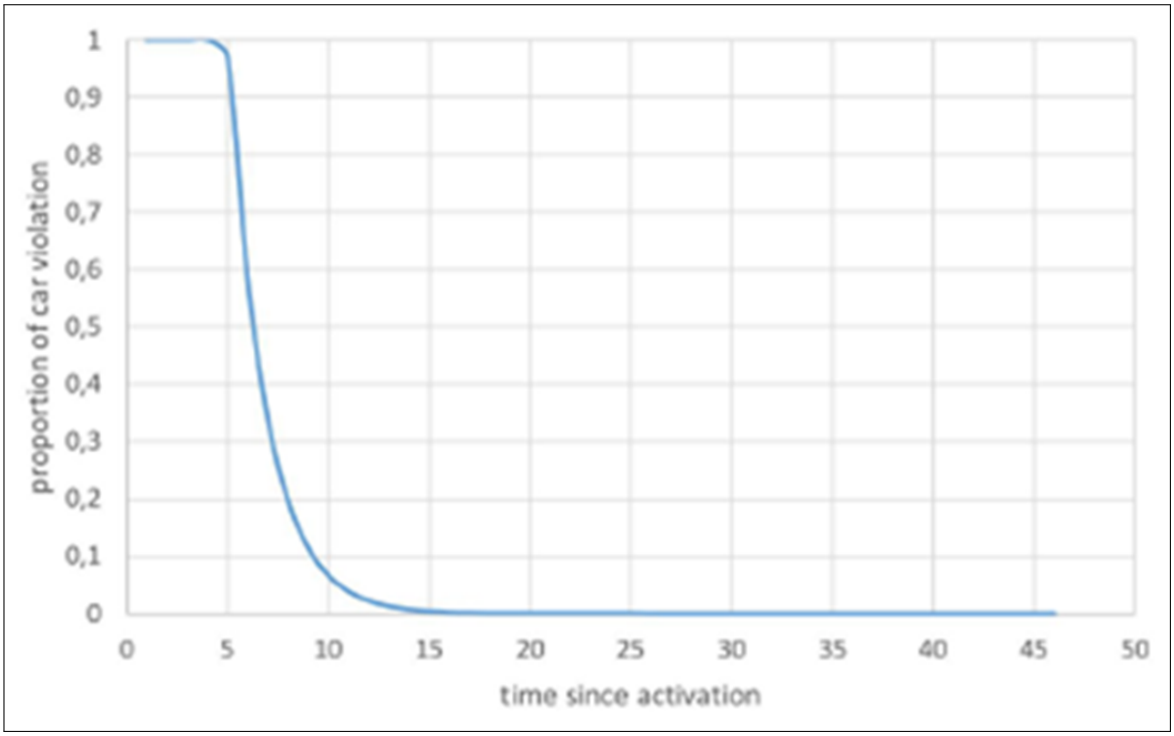



FIGURE 54 – La distribution de probabilité de franchissement utilisée par le modèle pour un clignotement de 7s

La probabilité d'une file d'attente au PN en fonction de d (la durée écoulée depuis l'activation), est modélisée comme suit :

— L'arrivée des véhicules est modélisée par une distribution de Poisson (l'arrivée des véhicules n'est pas corrélée).
— L'espérance qu'un véhicule traverse le PN d'une direction entre $u$ et $u+du$ est donnée par $0,5 \times v(h)$ (le flux de véhicules par s pour une direction) $\times P_t(u)$ car les deux événements sont considérés comme indépendants (Voir la figure 54 pour $P_t(u)$.

— L'espérance qu'aucun véhicule ne s'est arrêté avant le PN à l'instant d est donnée par

$$E(h,d) = \int_o^d 0,5v(h)P_t(u)du$$

Et la probabilité de l'absence de file d'attente à d est

$P_{qn}(h,d) = e^{-\int_o^d 0,5v(h)(P_t(u))du}$ (Loi de Poisson pour n=0).

Si un véhicule s'arrête à $d$ dans la zone de danger, avec un train arrivant dans la zone de danger à $t_i$.

La probabilité que le véhicule échappe à la zone de danger comprise entre $d$ et $t_i$ (le temps d'impact) est $P_r(t_i - d)$ (voir figure 55).

$t_i$ est, soit la fin du délai d'annonce (s'il n'y a pas de détecteur d'obstacles), soit le moment de l'impact (calculé en utilisant généralement les valeurs de la SAM F005, mais d'autres hypothèses sont possibles, plus ou moins conservatrices en fonction de l'objet de l'étude).

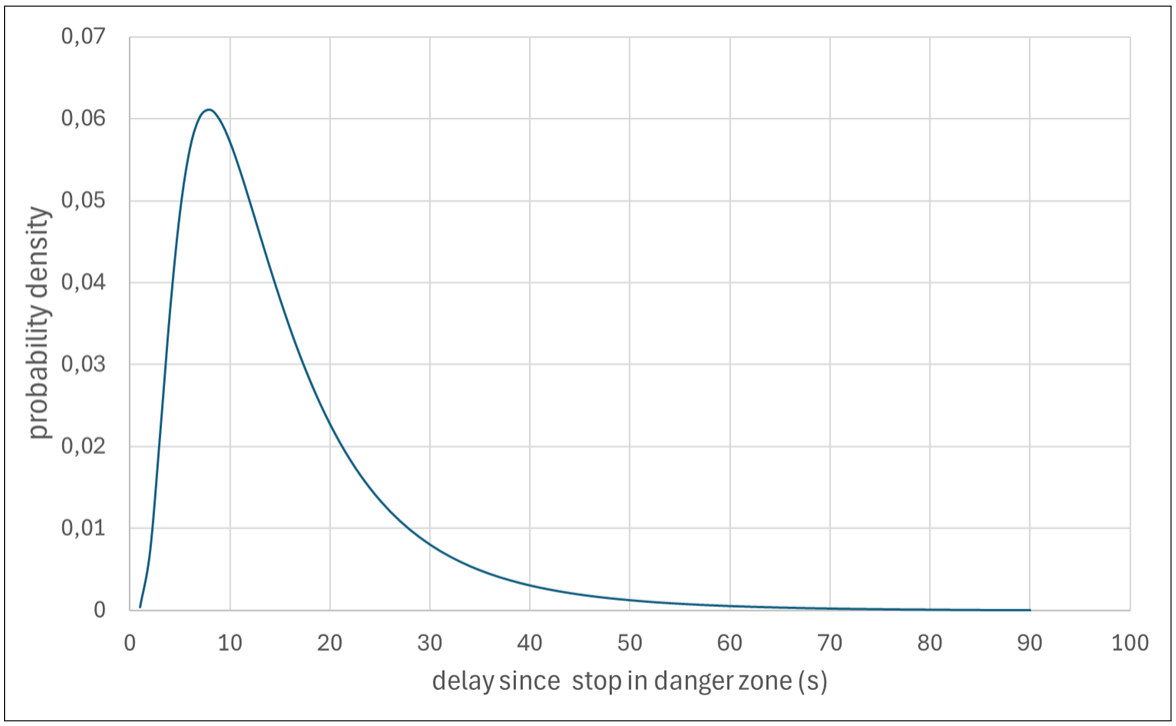



FIGURE 55 – Densité de probabilité associée au mécanisme d'esquive – échanges O. Cazier avec SNCF et JR-CENTRAL (2018)

Pour avoir un accident avec un conducteur alerté, il est nécessaire

— D'avoir une véhicule traversant le PN.

— D'avoir une autre erreur ou erreur de jugement qui entraînera un arrêt dans la zone de danger.

Comme l'avait constaté Ci Liang dans MORIPAN, le taux d'accident est proportionnel au taux d'accident routier général de l'année ($K(year)$) et, une fois cette proportionnalité prise en compte, la probabilité d'une erreur de conduite/jugement $C_e$ est supposée constante.

Dans ce cas, l'espérance horaire d'un accident du conducteur alerté est de :

$e_{1a}(Year, h, T, V) = K(year)C_eT(h)V(h)\int_0^{t_a} P_{nq}(h,u)P_t(u)(1-P_i(t_i-u))du$ (pour les deux sens).

On suppose que la probabilité d'un incident de distraction du conducteur est fonction de $T$ (la circulation des trains pendant la journée) et de $V$ (la circulation des véhicules pendant la journée) : $C_d(T,V)$

Tous ces événements étant considérés comme indépendants, il est possible d'évaluer l'espérance horaire d'un accident dû à la distraction du conducteur lors d'une rencontre avec un véhicule ferroviaire, telle que : $e_{2a}(year, h, T, V) = K(year)C_d(T,V)T(h)V(h)\int_0^{t_a} P_{nq}(h,u)(1-P_i(t_i-u))du$ (pour les deux sens).

Avec la distribution de $T(h)$ et $V(h)$ représentée dans la figure 56.

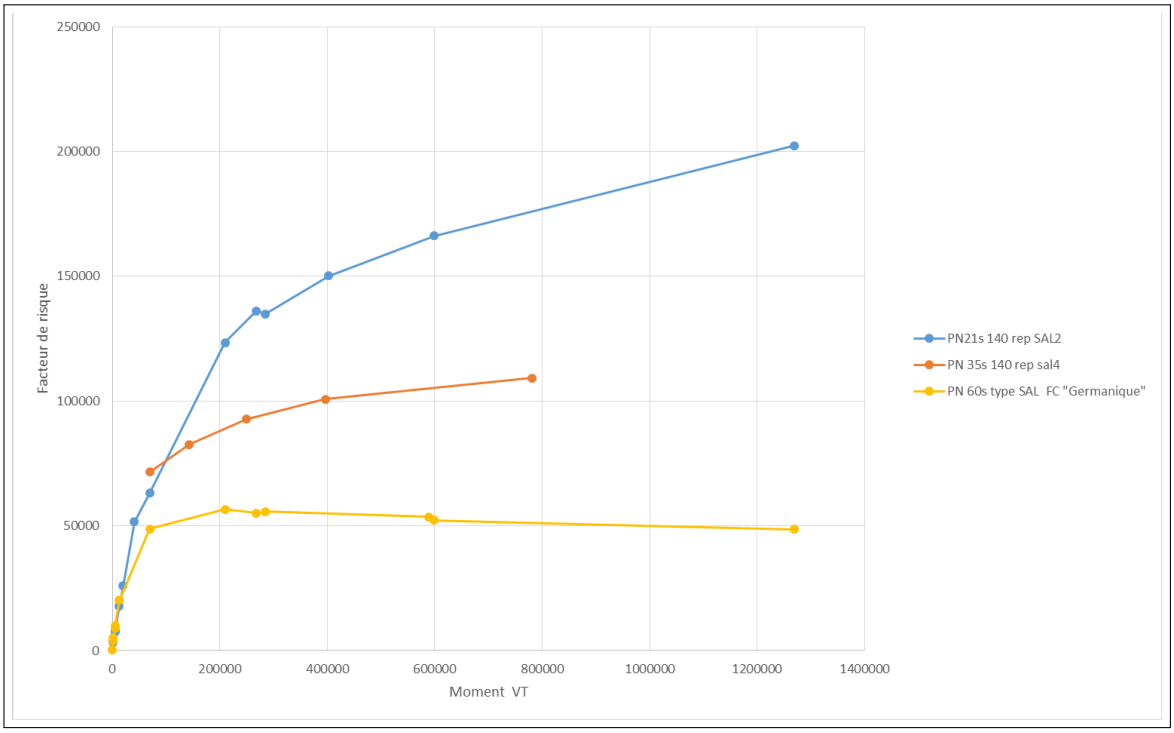



FIGURE 56 – Répartition de $T(h)$ et $V(h)$ utilisée dans le modèle générique d'accidentologie aux PN issu des essais de MORIPAN (2015)

L'espérance quotidienne d'un accident peut alors être modélisée comme suit :

$$\sum_{1}^{24}(e_{1a}(year, h, T, V) + e_{2a}(year, h, T, V))$$

L'espérance annuelle d'un accident à l'année « $year$ » est de 365,25 fois l'espérance journalière.

### 5.4.3 Utilisation du modèle pour « évaluer » le rapport $C_d/C_e$

$C_e$ et $C_d$ ne sont pas connus, ils sont très faibles, ne peuvent être mesurés directement que par de nombreuses années d'observation, sur beaucoup de passages à niveau. Mais il est possible de tirer quelques conclusions sur $C_e$ et $C_d$ dans un environnement de PN « moyen » avec les mesures de MORIPAN.

$C_e$ dépend de la variabilité de la durée d'annonce, notamment lors d'un passage à niveau voisin de gare, mais les mesures de Ci Liang ont montré que cet effet est réel, mais limité.

Il n'a pas été observé ni vu de véhicules contournant les barrières, seulement une légère augmentation des véhicules traversant entre 7 et 12 s et quelques passages attribuables à la distraction (figure 57).

Une autre variable qui pourrait influencer $C_e$ de façon plus importante est la configuration de la route. L'analyse au cours du projet MORIPAN a montré que les différences de largeur du PN et de la route augmentent le risque d'imprudence (manœuvres sur le PN).

$C_d$ est probablement fortement dépendant du moment, en raison d'une « rétroaction négative » des automobilistes : les conducteurs sont généralement des riverains du passage à niveau et des utilisateurs fréquents. Ils traversent souvent le PN à des heures régulières. Si leurs traversées du passage à niveau ne coïncident pas avec un train prévu, ils « apprendront » inconsciemment que le passage à niveau est toujours ouvert, et lorsque ce n'est pas le cas, cela peut prendre quelques secondes pour que le conducteur remarque que quelque chose d'«anormal » se produit et que le passage à niveau est activé et en cours de fermeture.

$C_d$, surtout si l'on tient compte de la complexité du phénomène de cécité d'inattention (cécité d'inattention stricto sensu et cécité au changement), va probablement aussi dépendre de la conception du passage à niveau activé (luminosité de R24, émergence du signal par rapport au fonds lumineux – Feu à éclats ou simple feu clignotant) et le laps de temps pendant lequel le R24 et ses changements d'état seront vus par les utilisateurs du PN dans leur vision centrale. Certaines études suggèrent qu'avec des conducteurs très somnolents ou distraits, une visibilité de 5 à 7 s serait nécessaire pour s'assurer que « presque tous » les conducteurs remarquent que le passage à niveau est fermé ou en cours de fermeture.

Il est tout à fait impossible de mesurer directement $C_d$ et très difficilement $C_e$ : Lors des essais de MORIPAN, sur des centaines de milliers de passages de véhicules, il n'y a eu qu'un très faible pourcentage de passages tardifs, interprétables comme de la distraction. Ces passages tardifs sont probablement rares avec des PN fonctionnant correctement, mais ils sont très dangereux, et on ne peut pas exclure à priori qu'ils soient une proportion significative, voire la majorité des accidents, même si très exceptionnels.

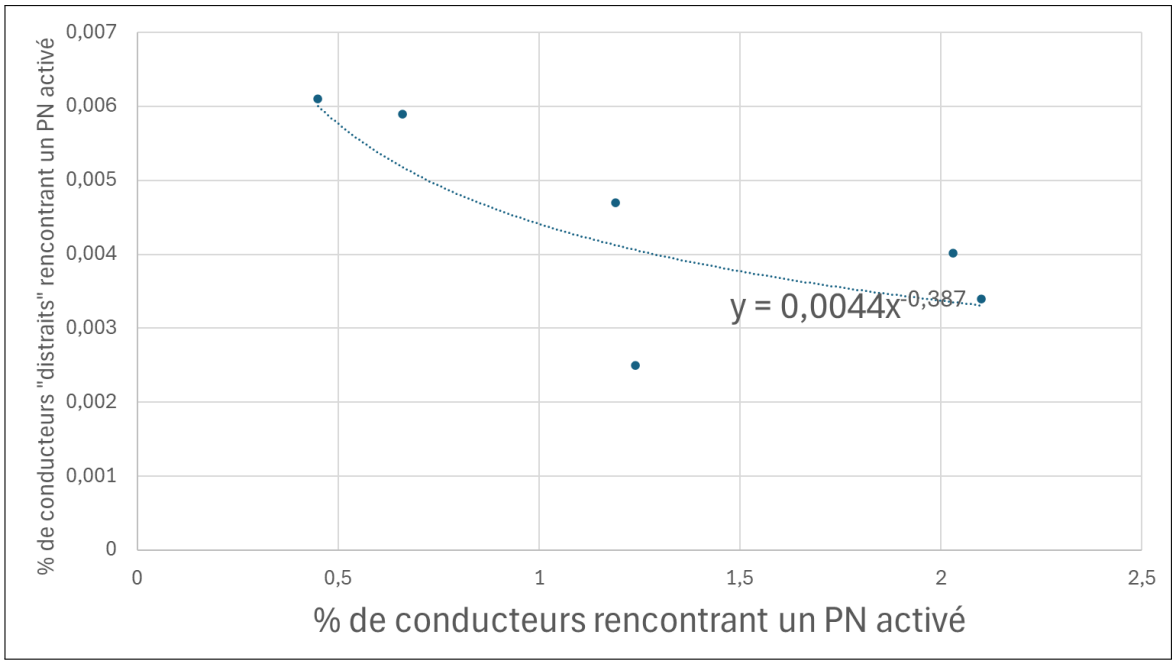



FIGURE 57 – Évaluation directe, à partir des données issues de l'étude MORIPAN, du taux de conducteur distraits : compte tenu du nombre très faible d'événements, la précision est médiocre

La figure 57 montre la tentative de mesurer directement le taux de distraction. Malheureusement, ce taux est très faible et la précision de la mesure insuffisante. On verra cependant plus loin que la mesure est compatible avec les conclusions du modèle.

Pour $C_e$, on n'a pu en observer d'accidents que sur le PN de Roissy-en-Brie, qui combine à la fois un moment extrêmement élevé et une configuration routière complexe qui favorise à la fois l'erreur de conduite et la cécité d'inattention.

Mais il existe une mesure « indirecte » du rapport $C_d/C_e$ puisque la forme de la courbe de risque en fonction du moment dépend fortement de $C_d$, si l'on admet (comme le suggèrent les essais de MORIPAN) que le comportement des conducteurs, et donc $C_e$ dépend peu du moment, alors que $C_d$ en dépend.

On va donc évaluer (indirectement) le rapport $C_d/C_e$ en utilisant un « meilleur ajustement » de la sortie de notre modèle avec les statistiques SNCF sur le risque de passage à niveau.

Pour cela, nous allons utiliser un échantillon des PN français avec des flux de trains et de véhicules représentés figure 58, et calculer pour ce jeu d'essai

$$\sum_{1993}^{2013}\sum_{1}^{24}((e_{1a}(year,h,T,V))$$

et

$$\sum_{1993}^{2013}\sum_{1}^{24}((e_{2a}(year,h,T,V))$$

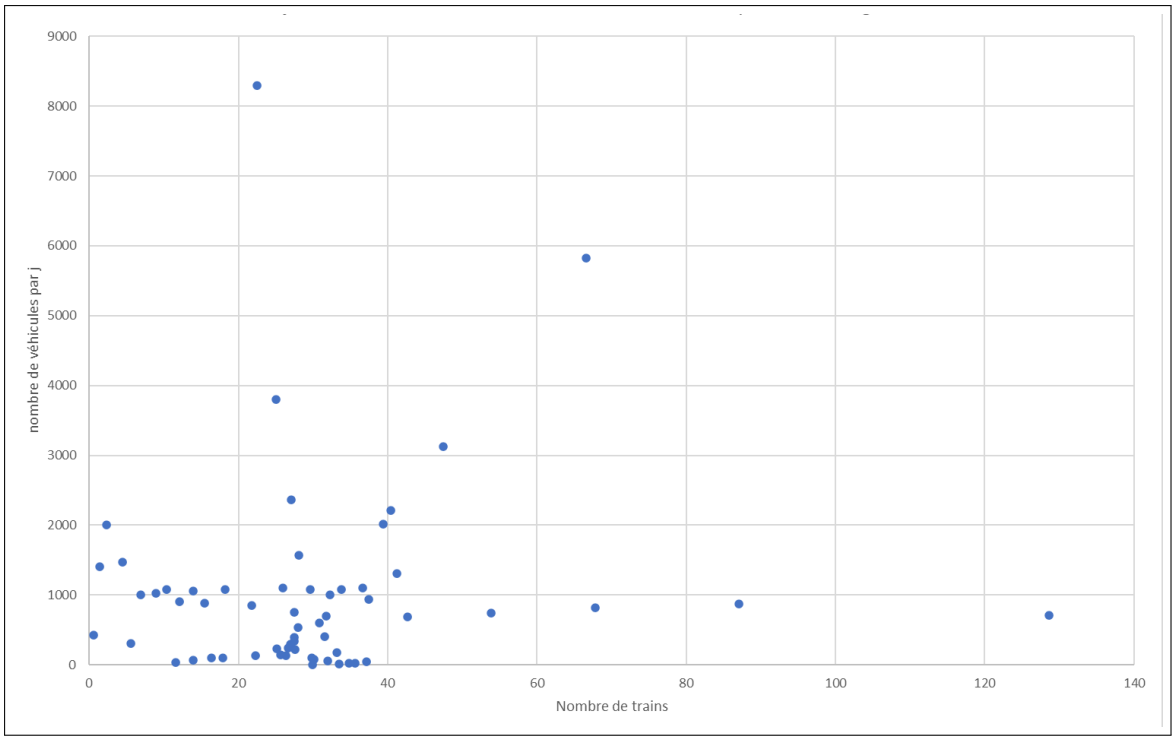



FIGURE 58 – Jeu d'essai de PN SAL 2 utilisé pour le recalage du modèle générique d'accidentologie aux PN

Nous allons ensuite évaluer, pour chaque PN de l'échantillon, la valeur de $C_d(T,V)/C_e = G(T,V)$ et de $C_e$ compatible avec l'accidentologie issue du retour d'expérience et représentée sur la figure 59.

Dans un premier temps, nous avons examiné l'hypothèse $H_1$, prise dans le modèle préliminaire de Monte-Carlo $C_d(T,V)/C_e = G(T)$ (le ratio ne dépend que de $T$), mai, comme on peut le voir dans la figure 60, le résultat était peu satisfaisant.

Comme on peut le voir sur la figure 61, la corrélation la meilleure de $C_d(T,V)/C_e = G(T,V)$ est avec le moment, ce qui est assez logique, puisque l' « apprentissage » par le conducteur routier du risque de rencontrer ou non un train au PN va dépendre du nombre de rencontres véhicules/train, et que la cécité d'inattention va dépendre de l'anticipation par le conducteur routier d'un PN ouvert ou pouvant être activé : S'il y a beaucoup de trains, mais peu de véhicules, l'apprentissage n'a pas lieu.

Un point un peu surprenant : l'exposant est de 0,422, et non 0,5.

Les équations du modèle ne sont donc pas

- Ni invariantes vis-à-vis de l'unité de temps. Cela peut choquer à priori, mais un exposant inférieur à 0,5 peut s'interpréter par un effet d'« oubli » : N rencontres en 10 ans n'ont pas le même effet d'apprentissage que N rencontres en un an.
- Ni symétriques en $T$ et $V$, puisque même si le mécanisme d'apprentissage est symétrique, le rôle des véhicules et des trains n'est pas symétrique, à cause de l'effet Stott. Mais l'effet Stott est négligeable en dessous de 500 v/jour. Pour les petits flux

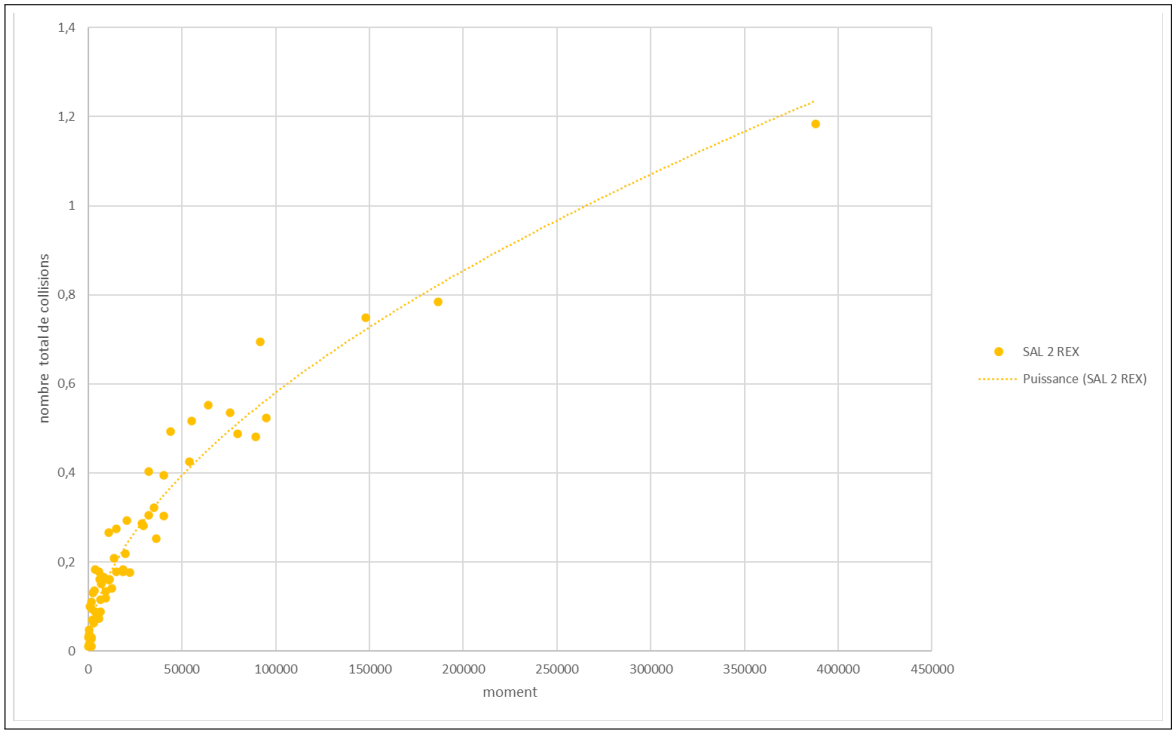



FIGURE 59 – Accidentologie issue du REX SNCF pour le jeu d'essai des PN SAL 2 dans le modèle générique d'accidentologie aux PN

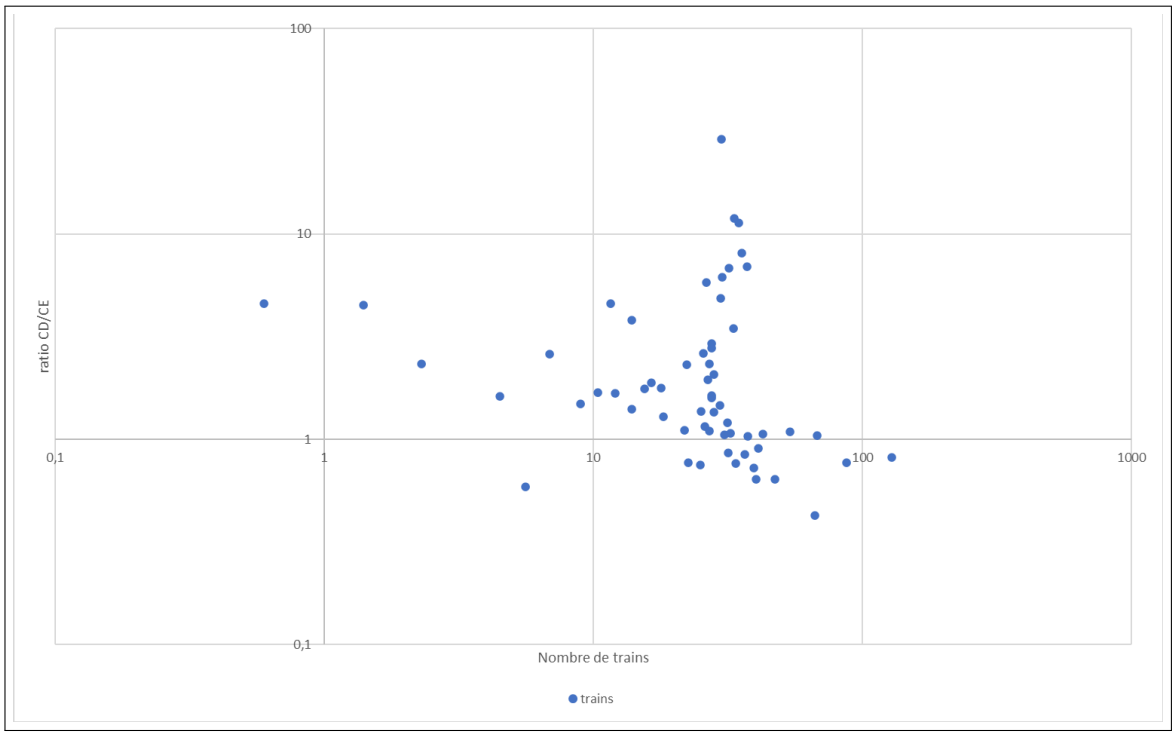



FIGURE 60 – Évaluation du ratio Cd/Ci en fonction du nombre de trains obtenue par recalage du modèle générique d'accidentologie aux PN – (hypothèse $H_1$)

de véhicules, le rôle de $T$ et $V$ est symétrique, mais au-dessus de 500 v/j, il y a brisure de symétrie.

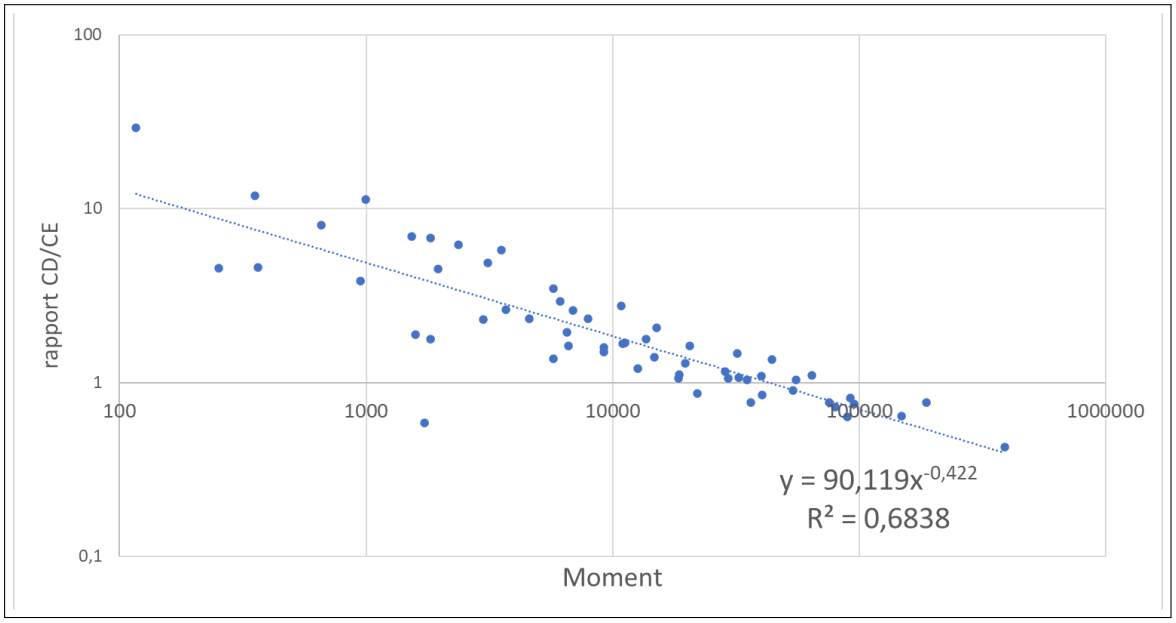



FIGURE 61 – Évaluation du rapport Cd/Ce en fonction duMoment obtenue par recalage du modèle générique d'accidentologie aux PN (hypothèse $H_2$ retenue)

Le ratio $C_d/C_e$ varie très fortement dans la gamme des moments que l'on rencontre sur le réseau ferroviaire français, puisqu'il atteint, pour des moments faibles des valeurs supérieures à 10 et des valeurs inférieures à l'unité au-dessus d'un moment de 50 000.

On voit aussi que l'exposant est assez proche, compte tenu de l'imprécision de la mesure directe de celui déterminé directement figure 57.

Il y a là une première réponse à l'une des questions posées dans l'introduction : Pour la majorité des PN du réseau, les incidents dûs à la distraction sont les plus nombreux. Par contre, en ce qui concerne les accidents, lorsque le moment devient élevé, la part des incidents dûs à la distraction baisse et, si le flux de véhicules est aussi élevé, l'effet Stott va empêcher les intrusions tardives. Dans ce cas, **les incidents dûs à la distraction deviennent minoritaires.**

C'est ce qui explique que, lorsque l'on observe les « gros » PN, parce qu'ils sont ceux sur lesquels on a la chance d'observer un incident dans un délai raisonnable, on voit surtout des incidents dûs à l'erreur de jugement des conducteurs. Par contre, lorsque le moment et le flux de véhicules sont faibles, contrairement aux accidents dûs à l'imprudence qui sont majoritairement en début de cycle (donc avec une probabilité d'esquive relativement élevée, même pour des SAL 2), les accidents dûs à l'inattention sont plus souvent d'initiation tardive, et le ratio accident/incident beaucoup plus élevé, et la cause principale d'accident est la distraction.

On retrouve ici, mais par un raisonnement totalement différent, l'une des conclusions de l'analyse routière : « statistiquement », les conducteurs distraits sont très minoritaires,

mais ils constituent l'essentiel des passages tardifs et, *pour la plupart des PN l'essentiel des accidents.*

### 5.4.4 Prévalence importante des accidents due à la distraction est-elle crédible ?

Tout d'abord, quelque considération importante.

La définition de la distraction n'est pas la même suivant les différents auteurs : certains ne considèrent comme distraction que les cas ou il existe une cause extérieure de distraction « évidente ».(Par exemple, T. Dingus à Virginia Tech (DINGUS et al. 2016)) qui inclut dans son analyse trois causes :

- La distraction, avec une définition très restrictive (uniquement lorsqu'il y a un événement extérieur à la conduite : re-régler la radio, le GPS, répondre au téléphone, se disputer avec ses passagers, regarder la publicité routière).
- L' « impairment » : alcool, drogue, mais aussi conduite sous l'effet d'une émotion violente ou d'une préoccupation importante, dont on sait qu'elles peuvent réduire l'attention et contribuer à la cécité d'inattention,
- L'erreur de conduite, qui peut avoir de nombreuses causes, dont une mauvaise priorisation des risques focalisant l'attention sur un risque mineur. Cf principe de Beccaria.

Cette thèse a privilégié l'approche par les causes, et notamment la distinction entre d'une part l'imprudence /erreur de conduite, et de l'autre la distraction.

Dans notre définition de la distraction, sont inclus :

- Les causes physiques « internes » (micro-sommeil, clignotement d'yeux, etc.) incluse essentiellement dans la cécité au changement.
- Les Causes physiques externes (« eyes off-road ») : attention détournée par une cause non directement liée à la conduite : régler un GPS, changer la station de radio, causer avec ses passagers, répondre au téléphone, regarder les vitrines, etc.
- Les causes mentales externes : on priorise un danger « mineur » qui accapare l'attention, et on ne remarque pas le danger principal : on craint de se perdre et on observe le GPS, on surveille sa jauge d'essence, on s'inquiète d'un enfant jouant au ballon.
- Les causes mentales « internes : « daydreaming », préoccupations professionnelles ou d'ordre personnel déstabilisant le conducteur.

Dans notre modèle, la « distraction » se distingue de l'erreur volontaire dans la mesure où elle se traduit par une absence de réaction ou une réaction « anormalement lente » au stimulus « PN activé ».

Malheureusement, la majeure partie des études « quantitatives » ont retenu une définition restrictive : la distraction due à un événement extérieur à la conduite « visible ».

Une autre difficulté est que la plupart des événements sont « multi-causes » un conducteur alerté qui fait une erreur de jugement quant à sa vitesse par exemple va pouvoir rec-

tifier très vite, un conducteur distrait va persister dans l'erreur plusieurs secondes, ce qui va causer l'accident.

De même, il semble qu'erreur de conduite et distraction sont parfois difficiles à distinguer, la cause de la distraction n'est pas toujours externe, et on rencontre souvent le cas où le conducteur se concentre sur un risque familier, mais peu dangereux au détriment d'un risque plus rare : conducteur à Allinges s'inquiétant d'un risque de nez à nez sur un PN étroit, puis d'un risque de redémarrage en pente et ne remarquant pas le PN activé, conductrice à Millas s'inquiétant du risque de heurt du séparateur de chaussée et ne remarquant pas le PN activé. Les exemples sont légion de ce biais (privilégier un risque fréquent mais mineur à un risque grave mais familier) identifié dès le 17e siècle par Beccaria (Beccaria, 1764).

Il est cependant possible de tenter un rapprochement avec l'étude quantitative la plus extensive (celle de T. Dingus à Virginia Tech) qui classe les causes d'accident comme suit :

| Distracted | Error | Impaired | Prevalence |
|---|---|---|---|
| YES | YES | YES | 3.4% |
| | | NO | 51.1% |
| | NO | YES | 0.1% |
| | | NO | 13.7% |
| NO | YES | YES | 2.7% |
| | | NO | 16.5% |
| | NO | YES | 0.2% |
| | | NO | 12.3% |
| Total | | | 100% |

FIGURE 62 – Driver crash risk factors and prevalence evaluation using naturalistic driving data, Thomas A. Dingus, Feng Guo, Suzie Lee, Jonathan F. Antina, Miguel Pereza, Mindy Buchanan-Kinga, and Jonathan Hankeya Virginia Tech Transportation Institute, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Edited by William J. Horrey, Liberty Mutual Research Institute for Safety, Hopkinton, MA, and accepted by the Editorial Board January 26, 2016 (received for review July 6, 2015)

L'étude de T. Dingus, basée sur l'instrumentation d'un parc de 3 000 véhicules et des conducteurs volontaires, mais portant uniquement sur des accidents de la route hors PN, donne cependant des éléments très intéressants :

- Malgré une définition très restrictive de la distraction, près de 70% des accidents seraient liés à une distraction « externe »
- Si l'on exclut les accidents causés par des tiers sans contribution du conducteur (cas général aux PN) on a près de 80% des accidents avec une cause de distraction extérieure d'après T. Dingus

TABLE 8 – Causes (distraction extérieure ou autre) d'accident routier d'après Dingus

| Distraction extérieure | erreur | "impaired" | % |
|---|---|---|---|
| **Yes** | Yes | Yes | 3,87% |
| | | No | 58,20% |
| | No | Yes | 0,11% |
| | | No | 15,60% |
| **No** | Yes | Yes | 3,08% |
| | | No | 18,79% |
| | No | Yes | 0,23% |
| | | No | |
| **Total distraction extérieure** | | | 77,79% |
| **Total autre** | | | 22,21% |

Le reste (22%) incluant aussi toutes les causes de distractions non extérieures, notamment le cas où le conducteur est distrait par un risque de conduite familier mais secondaire.

Il existe aussi de très bonnes raisons pour penser que, dans le cas des passages à niveau, la distraction (au sens large) est beaucoup plus « dominante » dans les causes d'accident routiers « ordinaires ».

— Le modèle routier du $4.2, qui implique que pour un conducteur « alerté », le risque de pénétration dans la zone dangereuse et de ne pouvoir dégager avant l'arrivée du train est très faible. Avec les caractéristiques des PN français (barrières fermées à 14s, train arrivant au plus tôt 11 s après fermeture des barrières d'entrées (et en pratique plutôt 15s), pas de barrières de sortie) il faut 1,2 s à 30 km/h pour dégager la zone dangereuse : *À un PN, on a plus de 10 fois la marge de sécurité en cas de franchissement tardif (par rapport à un feu routier) ou la marge est minimale et l'accident (hors « suicide ») n'est possible qu'avec un second incident venant empêcher l'esquive.*
— La conception du PN : même si l'on peut critiquer la durée du pré-clignotement, le PN avec feux et barrières est beaucoup plus sécure qu'un feu tricolore, du moins avec les durées d'annonces courtes de nos SAL 2 et pour les SAL 4 : les conducteurs visent effectivement l'arrêt au moment du début de fermeture des barrières et non vis-à-vis de l'arrivée du train, **principe de Beccaria : même si les barrières cassent, il est utile qu'elles rayent la carrosserie car cela dissuade les passages trop tardifs.**
— L'absence de différence entre SAL 2 et SAL 4 (voir plus loin) confirme la faible importance, dans les accidents, de la « vraie » chicane.

Au vu de toutes ces raisons, il semble raisonnable de penser que prédominance massive de la distraction (sauf PN à très forte fréquentation routière, et telle qu'évaluée par le modèle) est vraisemblable.

## 5.5 Validation du modèle sur un échantillon extrême de SAL 2 et sur les SAL 4 français

### 5.5.1 Validation du modèle sur des échantillons « extrêmes » de SAL 2

Le modèle a été « calibré » sur un échantillon représentatif des PN SAL 2 du réseau, qui ne comprenait qu'un nombre limité de PN avec des flux de véhicules, de trains ou de durées d'annonces extrêmes.

Pour vérifier qu'il demeure valide pour ces PN « extrêmes », il a été utilisé :
- Un 1er échantillon constitué du dernier décile des PN avec la plus grande fréquentation véhicule.
- Un 2e échantillon constitué du dernier décile des PN avec la plus grande fréquentation ferroviaire.

Les deux échantillons ne sont pas disjoints, car le dernier centile des moments est commun, mais d'une part les flux véhicules du 1er échantillon sont plus élevés que ceux du second échantillon et, d'autre part, le 1er échantillon est constitué, à moment égal, des PN où l'effet Stott est le plus significatif, alors que le second a un effet « Stott » plus faible.

Mais on peut les rendre disjoints en éliminant de l'échantillon l'intersection de ces deux ensembles.

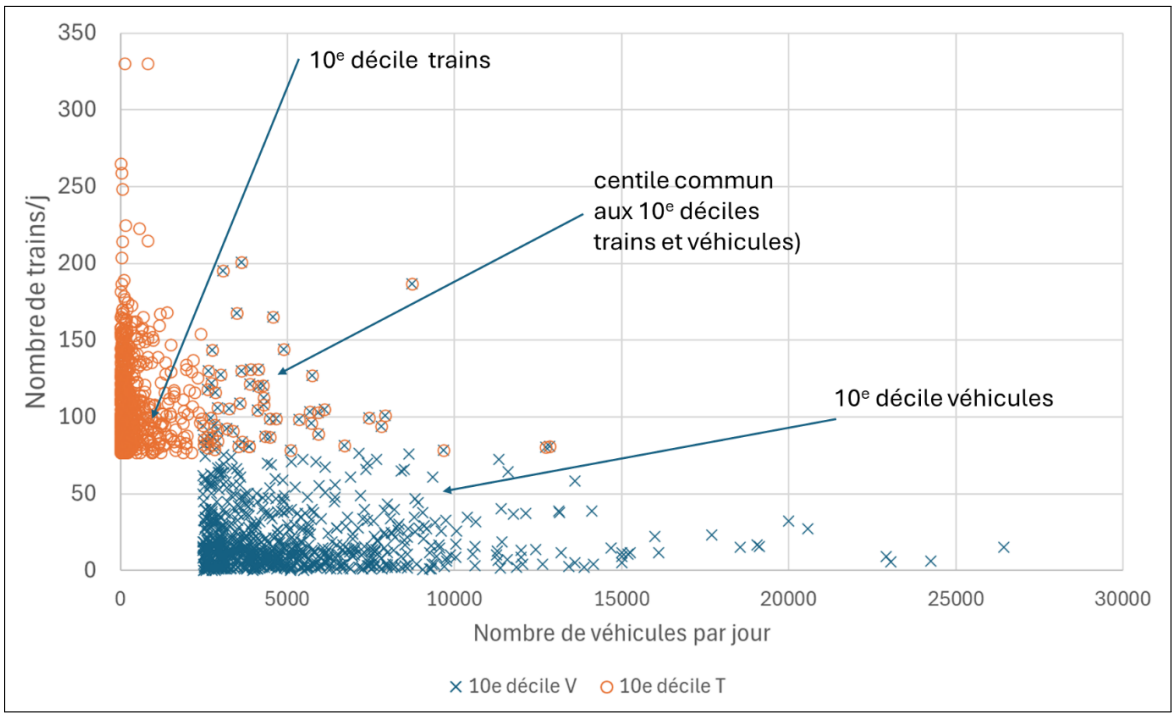



FIGURE 63 – Représentation des déciles extrêmes de $T$ et $V$ pour les SAL 2 (O. Cazier à partir des données 1993/2013 de MORIPAN)

Le graphe 63 représente les couples $V$ (en abscisse) et $T$ (en ordonnée) correspondant au dernier décile de nombre de véhicules jour et de trains/ jour pour les SAL 2.

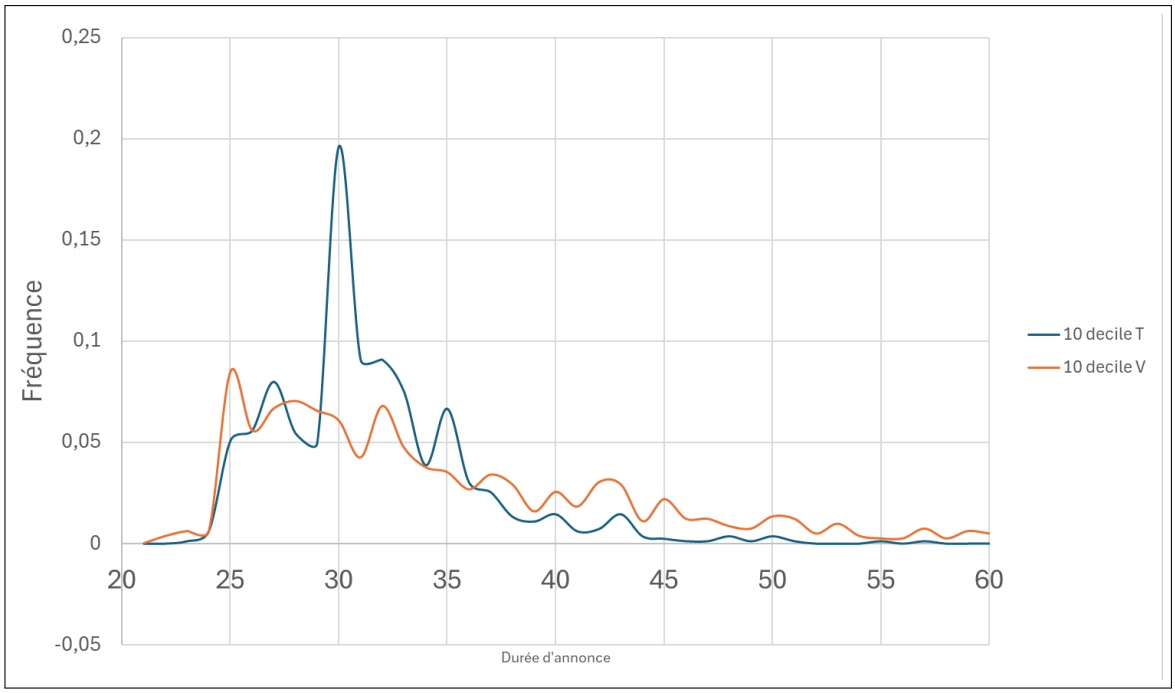



FIGURE 64 – Répartition des durées d'annonces pour les deux échantillons extrêmes de SAL 2 (O. Cazier à partir des données 1993/2013 de MORIPAN)

Le graphique (figure 64) représente la fréquence des durées d'annonce des SAL 2 entre 21 et 60 s. Contrairement aux flux de $T$ et V, la différence n'est pas suffisante pour tester l'impact de la durée d'annonce.

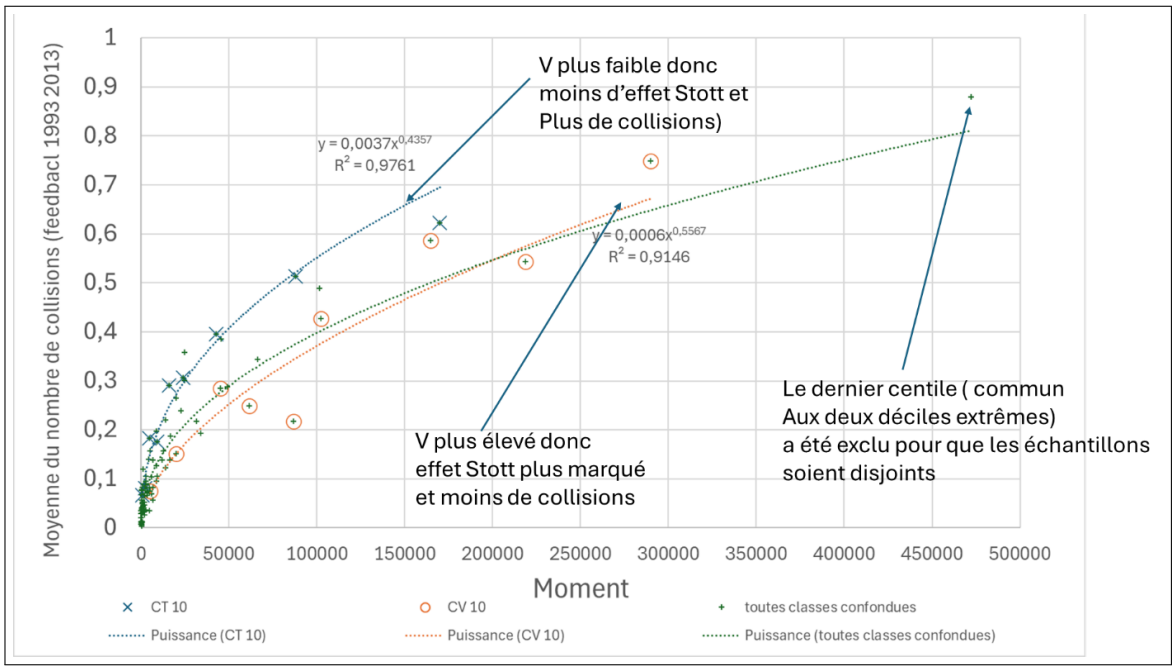



FIGURE 65 – Effet Stott sur les deux échantillons extrêmes de SAL 2 – Data MORIPAN + simulation modèle générique d'accidentologie aux PN.

Sur ce graphique figure 65, avec le « moment » $T \times V$ en abscisse et la moyenne du nombre de collisions entre 1993 et 2013 en ordonnée, on voit que, malgré un délai d'an-

nonce moyen plus court que chez nos voisins européens et peu différent entre les deux échantillons, l'effet « Stott » est malgré tout sensible : si l'on regarde la moyenne des collisions (estimateur de l'espérance) pour les deux échantillons, on voit tout d'abord que pour l'échantillon avec $V$ élevés, on a moins de collisions que pour l'échantillon à $V$ faible (les moments étant comparables).

Cela conforte fortement l'interprétation de Stott : Plus, il y a de véhicules à moment donné, moins il y a de collisions

On voit aussi que les deux échantillons sont bien fortement biaisés par rapport à la population générale et disjoints et que les estimateurs des espérances de collisions sont différents et différents de la population générale des SAL 2.

Cependant, si on regarde la prévision du modèle et qu'on la compare à l'estimation de l'espérance issue du feedback 1993-2013 des SAL 2, on voit sur la figure 66 que le biais induit par l'effet Stott est bien pris en compte par le modèle générique d'accidentologie aux PN 25% d'écart à moment égal vers M=15000, et de l'ordre de 1% de divergence entre les prévisions sur le dernier décile véhicules et le 1er décile véhicules.

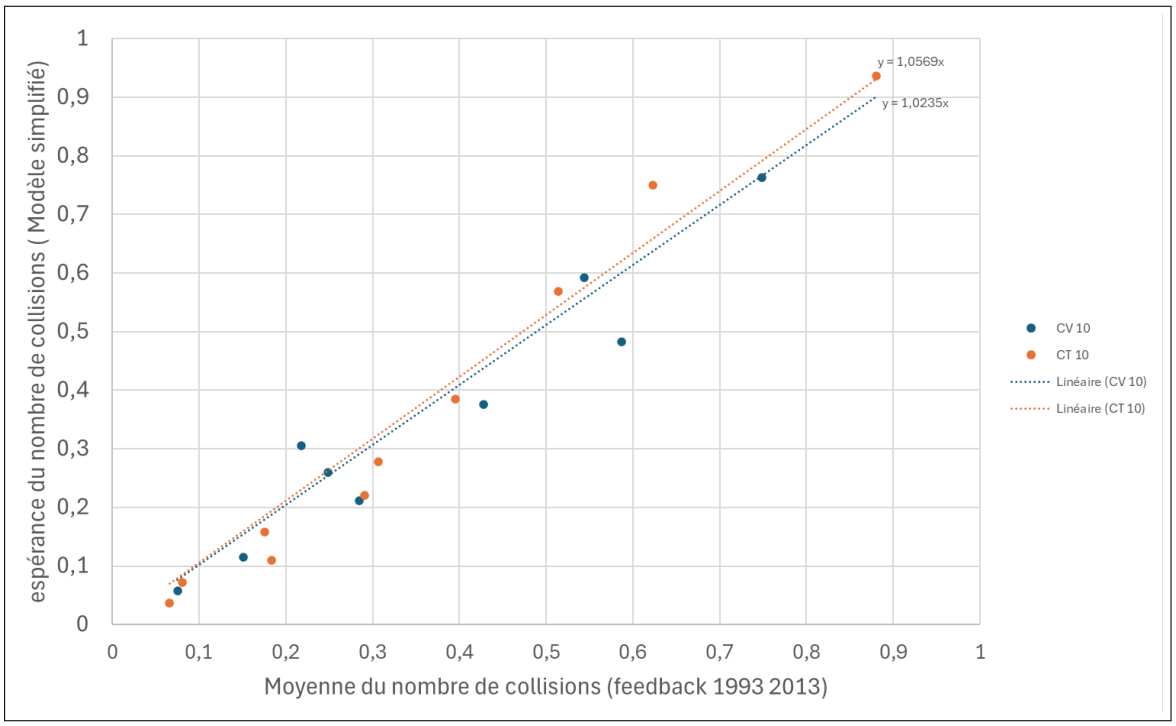



FIGURE 66 – Moyenne des collisions vs espérance évaluée par le modèle générique d'accidentologie aux PN pour des échantillons extrêmes de SAL 2

L'estimateur de l'espérance (figure 66) issu du modèle tient « correctement » compte de l'effet Stott (lié à $V$ et A).

Pour les déciles avec les flux les plus faibles, le même exercice n'est pas possible, compte tenu d'un taux d'accident trop faible qui ne permet pas une évaluation correcte de l'espé-

rance avec un REX de 20 ans seulement (le taux d'accident est inférieur à un par millénaire).

### 5.5.2 Validation du modèle en utilisant l'accidentologie des SAL 4

Cependant, l'accidentologie des SAL 4, pendant la même période, n'a pas été utilisée ni pour la mesure de CD/CE, ni pour le recalage (mesure de CE) : on peut donc tester la validité du modèle en l'utilisant pour évaluer l'accidentologie des SAL 4, sachant qu'aucune hypothèse complémentaire n'a été introduite en dehors de celles du modèle initial.

Les PN SAL 4 instrumentés dans le cadre de MORIPAN n'ayant pas montré de comportement des conducteurs sensiblement différents de ceux des SAL 2, les SAL 4 ont été modélisés en considérant que les seules différences SAL 2 25 s et SAL 4 35 s étaient liées aux durées d'annonces significativement plus longues qu'aux SAL 2 et, plus précisément :

- Au niveau de l'effet Stott : la queue de véhicules se forme pendant une durée plus longue.
- Au niveau de l'esquive d'un véhicule immobilisé, qui dispose de plus de temps pour s'échapper.

La figure 67 représente la comparaison entre le REX et la prévision du modèle sur les SAL 2 (utilisés pour le recalage) et pour les SAL 4 (utilisés comme jeu de données de contrôle) : *on peut constater que la prévision du modèle est dans les deux cas, en accord avec l'expérience, alors que le jeu de contrôle non seulement n'a pas été utilisé pour le recalage, mais présente de très différentes caractéristiques de moment et de durée d'annonces.*

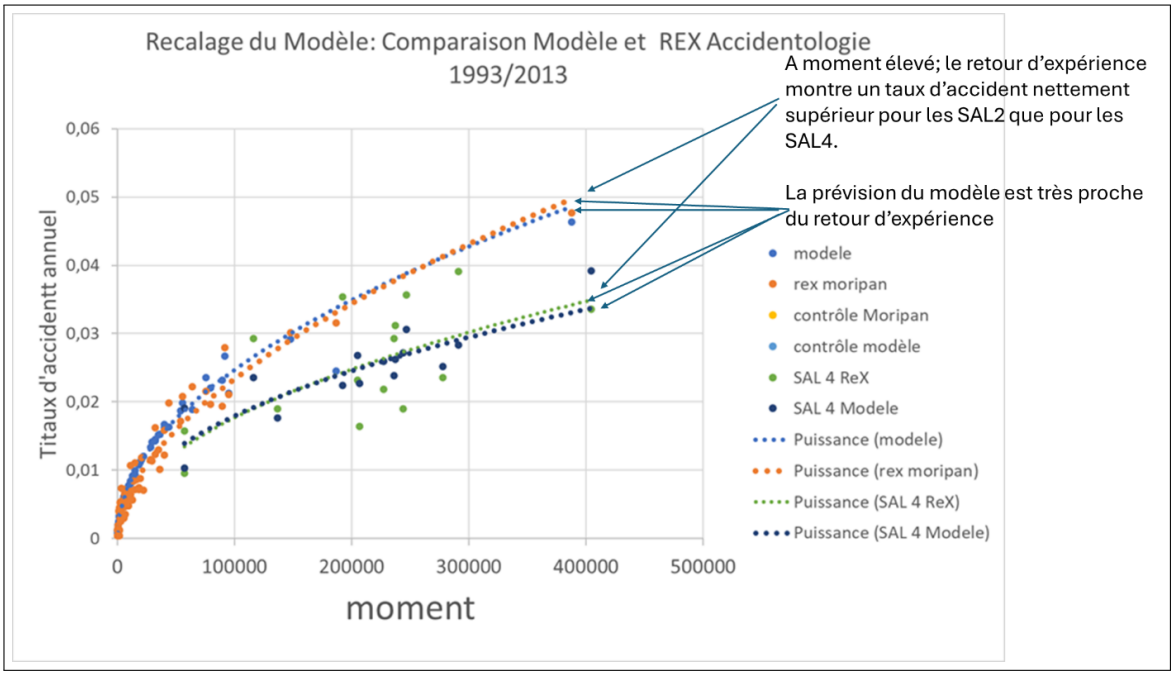



FIGURE 67 – Comparaison entre le REX accidentologie et le modèle générique d'accidentologie aux PN, en fonction du « moment » SAL 2 et SAL 4

Sur la figure suivante (figure 68), on constate qu'en « moyenne », la prévision pour les SAL 4 est équivalente à celle pour les SAL 2, mais avec une dispersion plus grande pour les

SAL 4, ce qui a été constaté au moment de MORIPAN : en fonction du moment, la dispersion était deux fois plus élevée en fonction d'une loi puissance du moment pour les SAL 4 que pour les SAL 2, ce qui s'explique par un effectif plus faible des classes utilisées pour évaluer l'espérance des accidents de SAL 4.

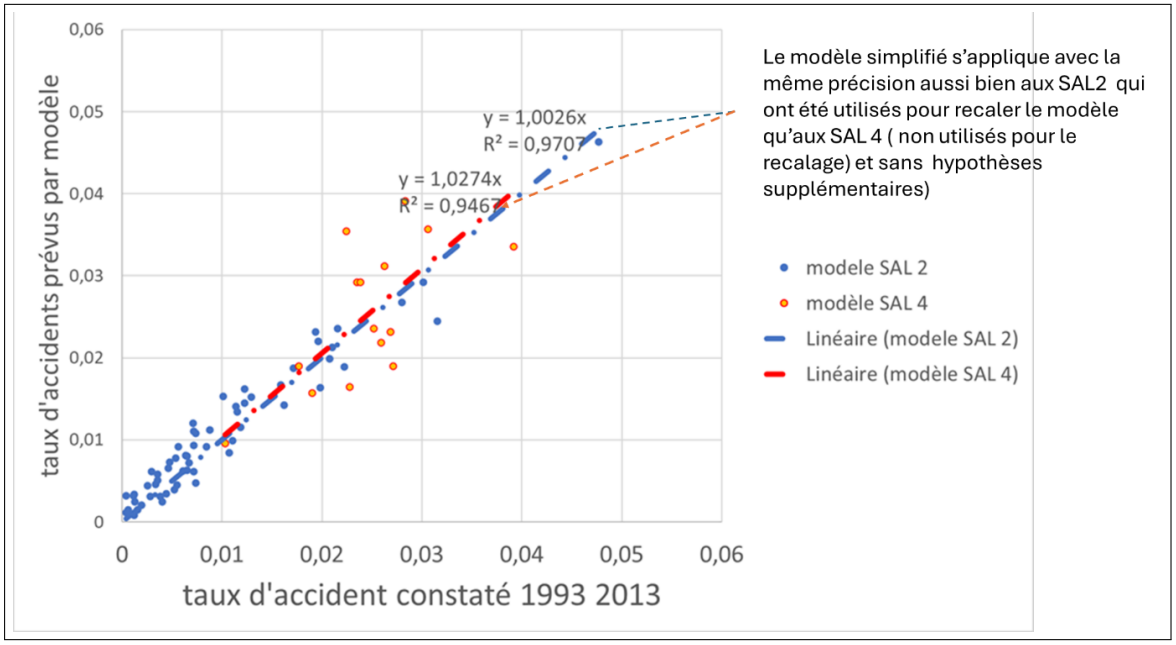



FIGURE 68 – Qualité de la corrélation entre le REX d'accidentologie 1993/2013 et le modèle générique d'accidentologie pour les PN SAL 2 et SAL 4

La dispersion est encore un peu plus grande pour les SAL 4, si on représente l'accidentologie en fonction du moment (figure 67), mais dans ce cas, il peut avoir deux explications supplémentaires :

- La première est une « rupture de symétrie » entre $T$ et $V$ (voir figure 69).
- La seconde est liée à la population de SAL 4, qui est différente de celle des SAL 2, avec des effectifs plus réduits, des moments plus élevés, dus en général à des flux de véhicules beaucoup plus élevés, et des durées d'annonces beaucoup plus longues, donc un effet Stott beaucoup plus important que pour les SAL 2 .

*La représentation de l'influence de la fréquentation par le seul moment est insuffisant pour les véhicules élevés, donc pour la plupart des SAL 4*

**La différence SAL 2 vs SAL 4 n'est pas due aux barrières de sortie, mais elle est due à l'effet Stott.**

Pour des valeurs relativement faibles de $V$, et donc du moment, le comportement du PN est symétrique en fonction de $T$ et de $V$.

Mais lorsque $V$ dépasse l'ordre de grandeur de 500 v/jour, l'effet Stott cesse d'être totalement négligeable, et l'on observe une « brisure de symétrie » : le taux d'accident ne dépend plus du moment, mais de $T$ et $V$ (figure 69, avec en abscisse le moment, et en ordonnée le taux de collision pour les PN correspondant aux valeurs mini, maxi et médiane de chaque centile de V)

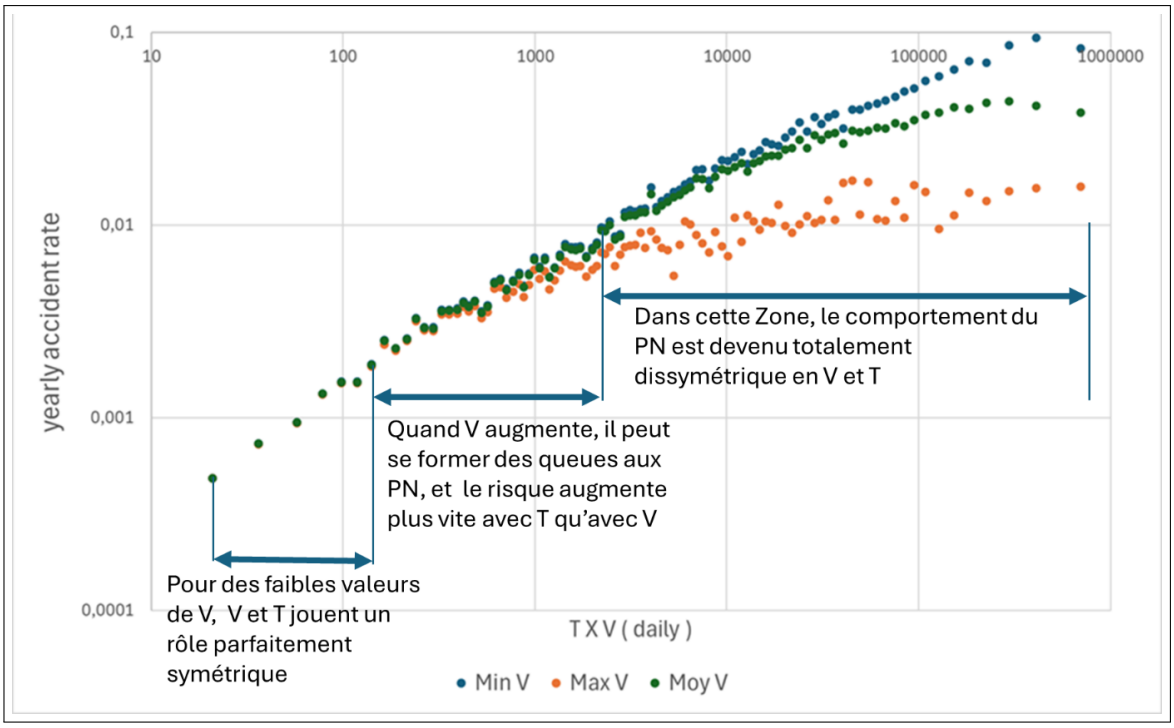



FIGURE 69 – Le moment est-il le bon paramètre ? Lorsque $V$ est élevé, l'effet Stott provoque une brisure de symétrie entre $T$ et $V$ (modèle générique d'accidentologie aux PN)

En revanche, le « ratio » d'accidents, entre SAL 4 et SAL 2 à caractéristiques équivalentes, ne dépend que du flux de véhicules (cf. figure 70).

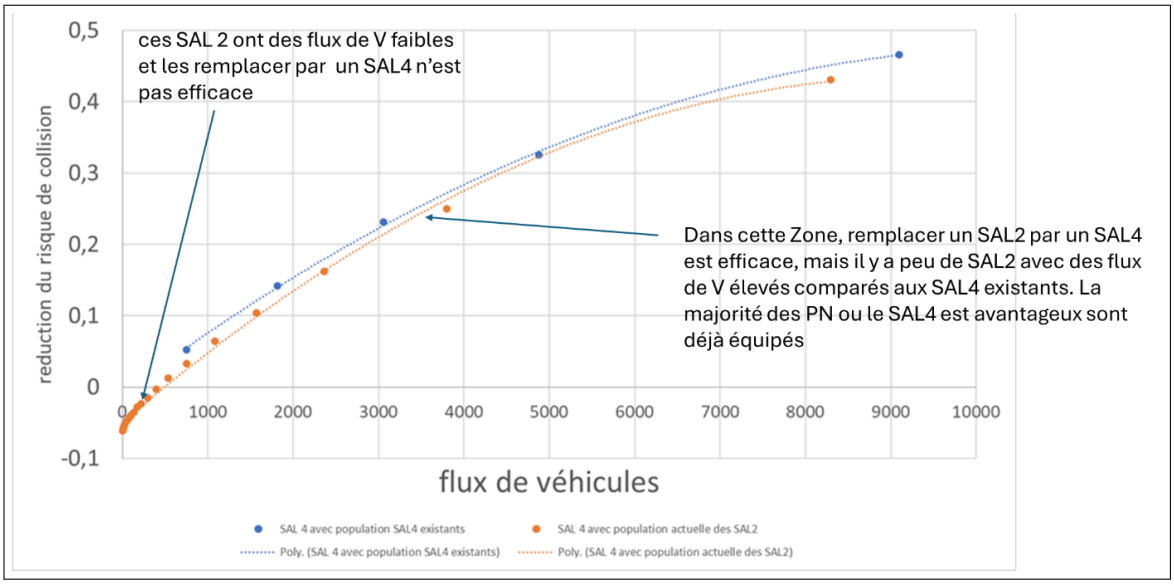



FIGURE 70 – Efficacité de réduction de l'accidentologie du SAL 4 par rapport au SAL 2 de référence en fonction du flux de véhicules (modèle générique d'accidentologie aux PN)

En effet, la réduction du nombre d'accidents obtenue par le passage en SAL 4 dépend très peu de $T$ et est quasi identique sur les SAL 4 existants et les SAL 2, même si les distributions de $T$ et $V$ sont très différentes la représentation en réduction relative est pertinente,

mais comme ces distributions sont différentes, *les réductions globales sont très différentes*[2] : Sur la population de PN existante, les remplacer par des SAL 4 ne gagnerait pratiquement rien alors que sur la population de SAL 4 existante, le gain par rapport au SAL 2 de référence est de 27%.

### 5.5.3 Efficacité des SAL 4 ou comment représenter en une seule dimension un phénomène pluridimensionnel

Le niveau de risque d'un PN est dû à de nombreux facteurs : $T$, V, moment, durée d'annonce, durée de clignotement, environnement routier, et le résultat ne peut pas être présenté de façon simple sans que l'on risque d'introduire des « biais de présentation » qui pourraient conduire à des conclusions hâtives et erronées.

*Aussi, avant d'aller plus loin et d'utiliser le modèle générique pour évaluer le risque d'accident sur un certain nombre de configurations ou de conceptions de PN possibles, il faut d'abord se pencher sur les présentations possibles des résultats, et les biais visuels qu'elles peuvent introduire.*

Traditionnellement, les résultats des évaluations d'accidents sur les PN sont représentés en fonction du moment. MORIPAN avait déjà montré que, au moins pour les SAL 2 classiques français, le moment n'est pas le paramètre le mieux corrélé à l'accidentologie, notamment parce que la dépendance du taux de collision était non pas en $(V \times T)^{\beta}$ mais en $V^{\alpha} \times T^{\beta}$ avec $\alpha + \beta \approx 1$(pour les SAL 2 avec annonces très courtes) ce qui approximait l'effet Stott.

D'après notre modèle générique, les accidents dépendent essentiellement de quatre paramètres liés au PN (sans compter la dépendance à la configuration géométrique que l'on verra plus loin).

- Le nombre de trains, qui joue sur le taux de cécité d'inattention.
- Le flux de véhicules, qui joue sur le taux de cécité d'inattention et sur l'effet Stott.
- La durée de clignotement, qui joue sur l'effet Stott.
- La durée d'annonce qui joue sur le nombre de véhicules interférant avec le PN et sur l'effet Stott.

Une représentation « exacte » serait donc au moins en 4 dimensions, ce qui est impossible.

Ce qui est possible, en revanche, est soit de représenter le risque absolu, ou le risque relatif par rapport à un type de PN de référence, en fonction par exemple du moment, ou de V, avec la durée d'annonce ou le nombre de trains fixés.

Ces représentations ont cependant un inconvénient : elles laissent de côté un paramètre important, la distribution de la population existante de PN.

Pour illustrer ce point, il est possible de comparer le risque relatif de collision en reprenant l'exemple :

2. Pour simplifier, on a admis que tous les trains circulant sur le RFN étaient des AUT 140 1300

— D'un SAL 4 35 s 7 s clignotement par rapport à un SAL 2 25 s 7 s clignotement en fonction du flux de véhicules.
— D'une population de SAL 4 35 s 7 s en remplacement d'une population de SAL 2 25 s avec les mêmes caractéristiques $V$, $T$, A que les PN à SAL actuels.
— D'une population de SAL 4 avec une annonce de 35 s (ou l'annonce actuelle si celle-ci est supérieure) en remplacement de la population de SAL actuelle, avec les mêmes distributions de $T$ et $V$.

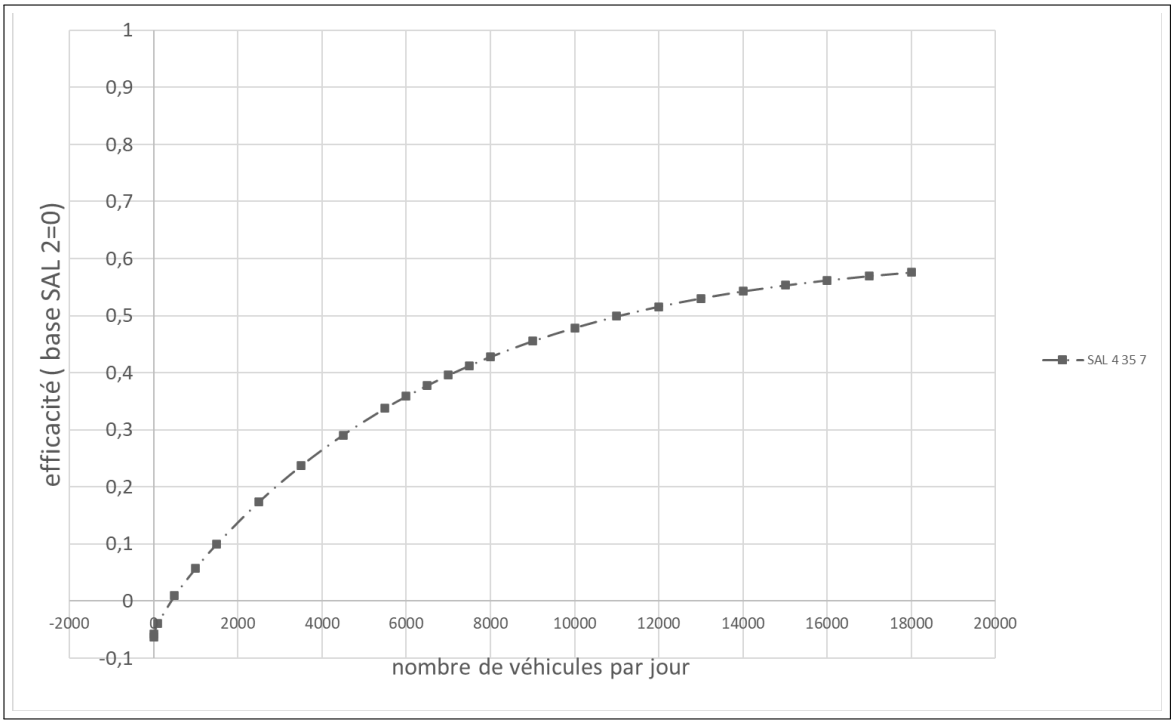



FIGURE 71 – Effet d'un remplacement d'un SAL 2 25 s 7 s par un SAL 4 35 s 7s - Modèle générique

La figure 71 représente la réduction du risque de collision dans le cas « théorique » ou l'on substitue un SAL 4 « nominal » à 35s d'annonce à un SAL 2 nominal à 25s d'annonce.

Elle suggère que la généralisation des SAL 4 pourrait être une bonne idée, sauf pour de très faibles flux, mais si on prend en compte l'hétérogénéité des populations réelles, la conclusion peut être différente.

Si l'on tient compte de la population des PN (figure 72) où les PN à faible flux sont majoritaires, la substitution d'un SAL 2 paraît déjà moins efficace.

Mais il se trouve que, dans la population des PN du réseau, beaucoup de PN avec de fort flux de véhicules sont déjà équipés en SAL 4, dont certains avec des annonces de 45s ou plus. La prise en compte des annonces « réelles » et des SAL 4 déjà existants accentue encore le phénomène (figure 73) et la proposition paraît inefficace.

La comparaison des biais d'interprétation des résultats de la simulation est assez significative :

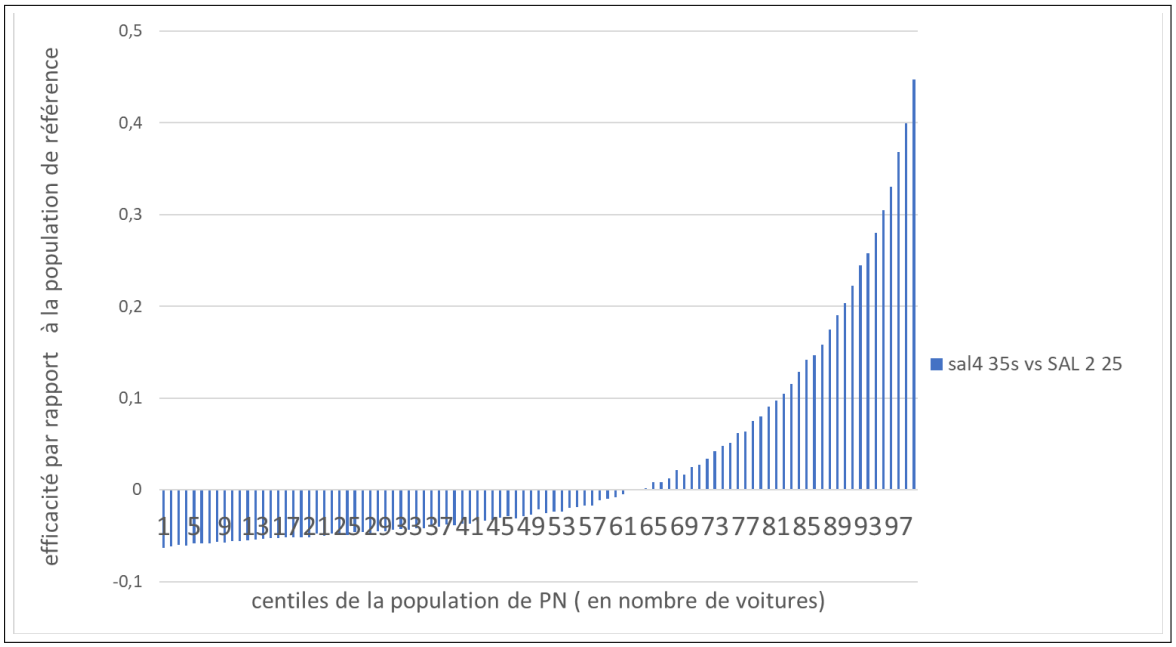



FIGURE 72 – Efficacité du SAL 4 35s par rapport au SAL 2 25s en fonction du flux de véhicules – Modèle générique d'accidentologie aux PN Référence PN actuels avec moments actuels et annonce 25s

FIGURE 73 – Efficacité de 100% SAL 4 35s en substitution de la population actuelle - Modèle générique d'accidentologie aux PN

— Dans la gamme de flux de véhicules que l'on rencontre sur le RFN, le SAL 4 semble nettement moins accidentogène que le SAL 2 (figure 71) si l'on adopte une représentation en fonction du moment ou du flux de véhicule, qui donne plus d'importance aux moments élevés.
— En revanche, si le regarde le gain par centiles, on s'aperçoit que, par rapport au SAL 2 « nominal » à annonce 25s, le SAL 4 « nominal » à annonce 35s n'apporte de gain que sur les 33 % les plus chargés en véhicule des PN du réseau (figure 72) parce que la majorité des PN français a des flux de véhicules faibles. Cette représentation évite le biais lié à l'hétérogénéité des flux de véhicules et des moments, mais ne permet pas de juger l'impact sur l'existant.
— La 3e comparaison (figure 73) avec l'équipement actuel en PN à SAL du RFN comme population de référence donne encore un autre résultat : Généraliser le SAL 4 à 35s sur tous les PN existants apporterait un gain très faible de sécurité, tout simplement parce que la plupart des sites ou le SAL 4 est pertinent en sont déjà équipés, dont certains en SAL 4 45s plus efficaces ! Cette représentation donne une image de l'impact sur l'existant, mais est parfois difficile à interpréter, voire trompeuse compte tenu de l'hétérogénéité extrême de la population de référence. Et elle aussi biaisée : à l'inverse de la représentation traditionnelle en fonction du moment, elle réduit l'importance des PN les plus chargés, qui sont les plus accidentogènes.

*On voit donc que le type de représentation choisi n'est pas neutre, et qu'il peut induire un biais de compréhension chez le lecteur. Mais aucun mode de représentation n'est parfait : il faut simplement que le lecteur ait conscience des biais et des limitations de chaque type.*

### 5.5.4 Impacts sur les modes de représentation des résultats

Dans la suite de la thèse, il faut porter une attention particulière sur ce point, en partant des principes suivants :

— La représentation du risque de collision en fonction du moment ne tient pas compte de la forte influence de l'environnement routier, ni de la brisure de symétrie V, $T$ au-dessus de quelques centaines de véhicules/jour. Elle a cependant l'avantage de permettre des comparaisons « historiques » avec les études précédentes. Représentée en Log/log, elle accentue l'importance des PN à faible fréquentation, majoritaires sur le réseau et montre l'influence de la rupture de symétrie de Stott.
— La représentation du risque de collision en fonction des trois paramètres $V$, $T$, Ann n'est pas possible en deux dimensions, mais peut être représentée sous forme de faisceaux de courbes en fonction de $M$ (ou de $V$) pour une série de valeurs de $T$ et de Ann. Elle ne tient pas compte de l'influence de l'environnement routier, et peut donner une fausse impression quant à l'efficacité globale d'un système, compte tenu de la distribution très inhomogène de nos PN en $T$, $V$ et Ann.
— La représentation en « risque relatif par rapport à un système ou à une population de référence » présente l'avantage d'éliminer l'influence de $T$, et, dans le cas de comparaisons portant sur deux systèmes étrangers, des facteurs culturels et de conception routière. Elle a par contre l'inconvénient, comme toute comparaison relative, de ne

pas porter sur le paramètre désiré (le taux de collision) et d'avoir une interprétation dépendant de la référence :

- Avec une référence à un système donné (par exemple le SAL 2 standard à 7s de clignotement et 25s d'annonce), elle permet une comparaison « exacte » de diverses variantes entre elles, mais ne donne pas immédiatement d'informations quant à l'efficacité sur la population de PN française.
- Avec une référence à la population de SAL existante, elle permet essentiellement de déterminer quel serait le domaine d'application d'une solution innovante.

Ce sont ces considérations qui guideront le choix de présentation des résultats.

## 5.6 Validation du modèle simplifie d'accidentologie aux PN sur les PN a détecteurs d'obstacles au Japon

### 5.6.1 Passages à niveau japonais

Les réseaux japonais, et notamment JR East, mais aussi JR West et de nombreux réseaux privés de moindre importance utilisent, depuis les années 80, des détecteurs d'obstacles sur leurs passages à niveau.

On peut appliquer le modèle précédent pour voir s'il est capable de prédire correctement l'évolution de l'accidentologie des passages à niveau japonais à la suite de l'introduction des détecteurs d'obstacles.

Mais pour cela, il y a quelques obstacles à surmonter :

- Le premier est d'évaluer correctement l'accidentologie en l'absence de détecteur d'obstacle. Or, même si le retour d'expérience publié par JR East en 1997 est très complet et très exhaustif, il ne décrit pas parfaitement l'existant de 1995/1996.
- Le second est que l'effet global des détecteurs d'obstacles va dépendre :
  - Des performances des trains, et notamment de leurs performances de freinage, or les trains japonais ont des performances de freinage excellentes : le critère d'admission du train fret le moins performant sur le réseau est voisin de ceux de nos automoteurs RER les plus performants.
  - Du « profil des moments », d'autant plus que les résultats du retour d'expérience de JR East sont présentés en fonction du nombre de trains, qui n'est pas le paramètre pertinent pour les décrire.

Ce type d'installation équipe encore un certain nombre de PN au Japon.

Ces équipements étaient les plus courants à l'époque du retour d'expérience formalisé par JNR.

Ils sont en cours de remplacement par des détecteurs lidar 3D, analogues à ceux testés par la Sncf à Roissy-en-Brie (homologation en cours).

Malheureusement, l'information du profil de moments de la population de PN équipés de Dopn en 1997 n'est pas disponible.

FIGURE 74 – Passage à niveau à deux barrières, sur une ligne secondaire (ligne de Gotemba, JRE) équipé de feux, deux barrières et d'un détecteur d'obstacles à faisceaux MW entrecroisés (photo O. Cazier, 2015)

Actuellement, les annonces utilisées pour les détecteurs d'obstacles au Japon sont de 45s.

La répartition des durées d'annonces des PN équipés de détecteurs en 1995 n'est pas connue. La simulation a pris 35s pour les PN sans détecteurs (l'annonce de 31s est le minimum réglementaire, 35s est la valeur usuelle) et 45s pour les PN équipés de détecteurs.

Le lecteur intéressé trouvera en annexe le texte complet des règlements ferroviaires japonais concernant les passages à niveau (traduction officielle, en Anglais, version 2018).

### 5.6.2 Performances de freinage

Les règlements ferroviaires japonais ne prescrivent qu'une distance de freinage minimale unique, soit 600 m à 130 km/h.

Cette performance de freinage est très élevée, légèrement meilleure que celle de nos RER (AUT 140 900) et s'applique à tous trains, y compris fret.

FIGURE 75 – Détecteur d'obstacles à faisceaux MW entrecroisés, installé sur PN à deux barrières et conducteur inconscient manœuvrant sur le PN (photo O. Cazier 2013, PN en sortie de la gare de Narai, ligne Chuo, JR Central)

### 5.6.3 Résultat de la simulation des DOPN et comparaison avec le retour d'expérience de 1997

Le profil de moments du réseau japonais n'est pas connu, ni pour les PN dépourvus de détecteurs, ni pour les PN avec détecteurs.

Faute de mieux, le profil RFN a été utilisé, en supposant que les échantillons de PN avec et sans détecteurs utilisés pour l'évaluation de l'efficacité, en fonction du nombre de trains, n'aient pas été biaisés en ce qui concerne leur répartition du nombre de véhicules (ce qui est probable tant que le trafic ferroviaire n'est pas trop important).

Le PN de référence sera assimilé à un SAL 4 35s et début de chute des barrières après 4s, le PN Avec DOPN à un SAL 4 45s avec détecteur, 10s neutralisées (correspondant au temps de fermeture complète de la barrière d'entrée) puis détection avec un temps de réaction de 1s.

Avec les hypothèses ci-dessus, on peut tracer l'évaluation de l'efficacité des DOPN sur le réseau de JRE, en fonction du nombre de trains, paramètre utilisé en 1997, mais qui induit une incertitude complémentaire liée au profil de moments.

FIGURE 76 – Détecteur d'obstacle de dernière génération (Lidar 3D IHI, très proche de ceux en phase finale d'homologation par SNCF) sur la ligne du Tokkaido «classique», entre Tokyo et Yokohama (photo O. Cazier, 2013)

FIGURE 77 – PN de type SAL 4 équipé de détecteurs d'obstacles de dernière génération, ligne Tokkaido classique, entre Tokyo et Yokohama, 2015 (photo O. Cazier)

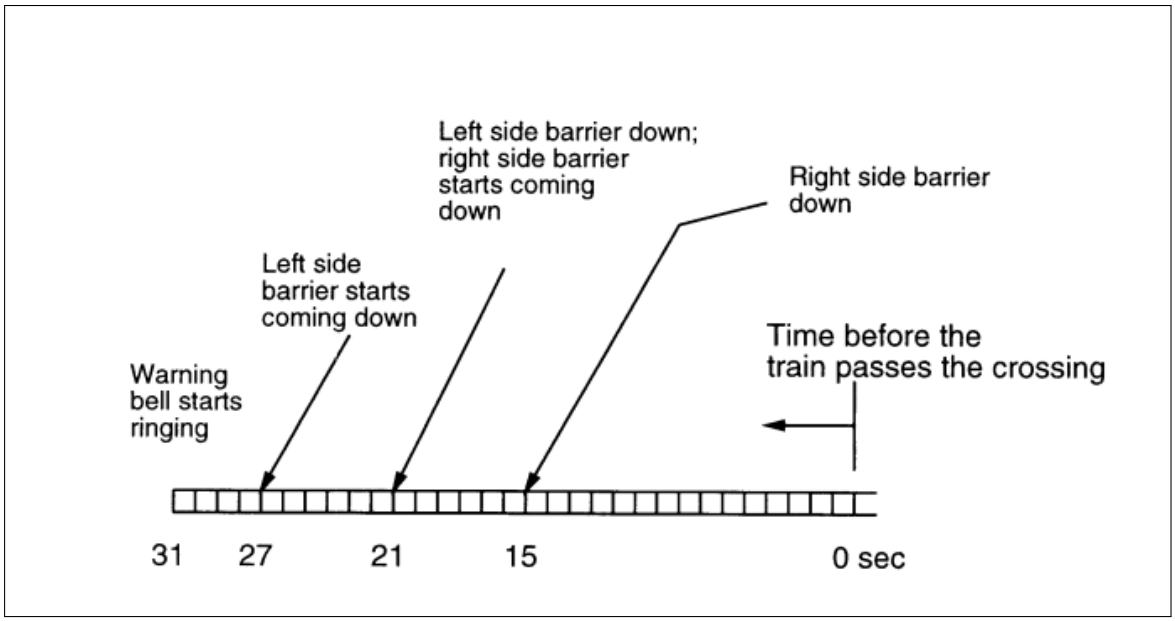



FIGURE 78 – Séquence d'un passage à niveau japonais en 1995 (Andranao et Maitland, 1998)

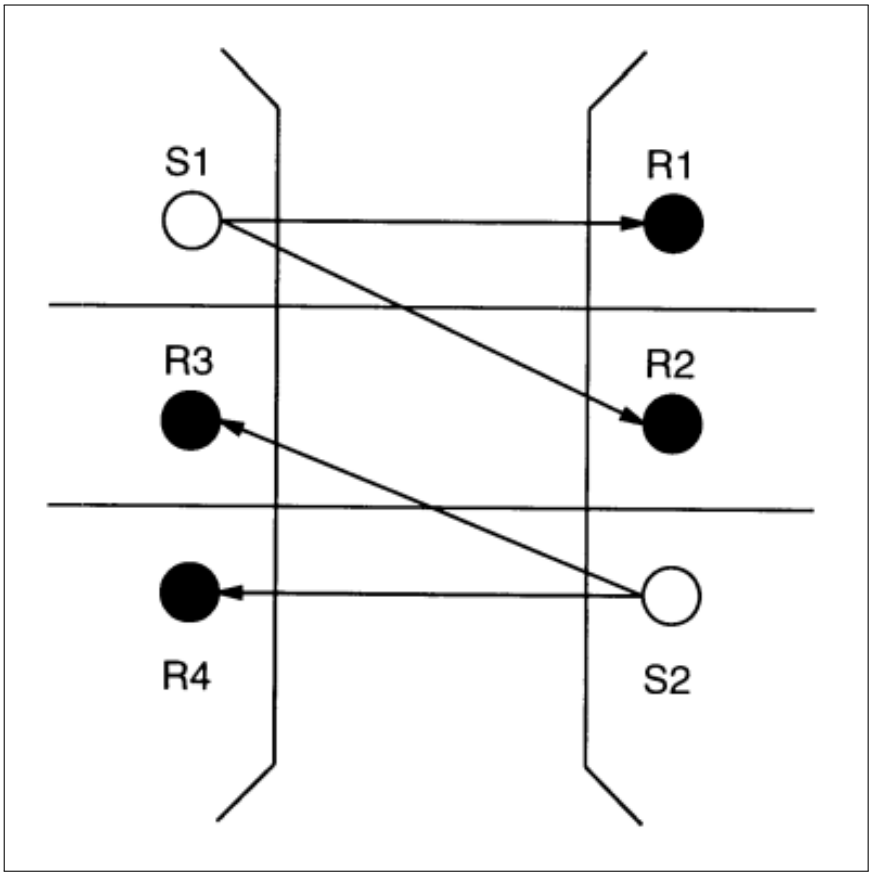



FIGURE 79 – Installation typique de faisceaux détecteurs sur une ligne à double voie, Andranao et Maitland, 1998

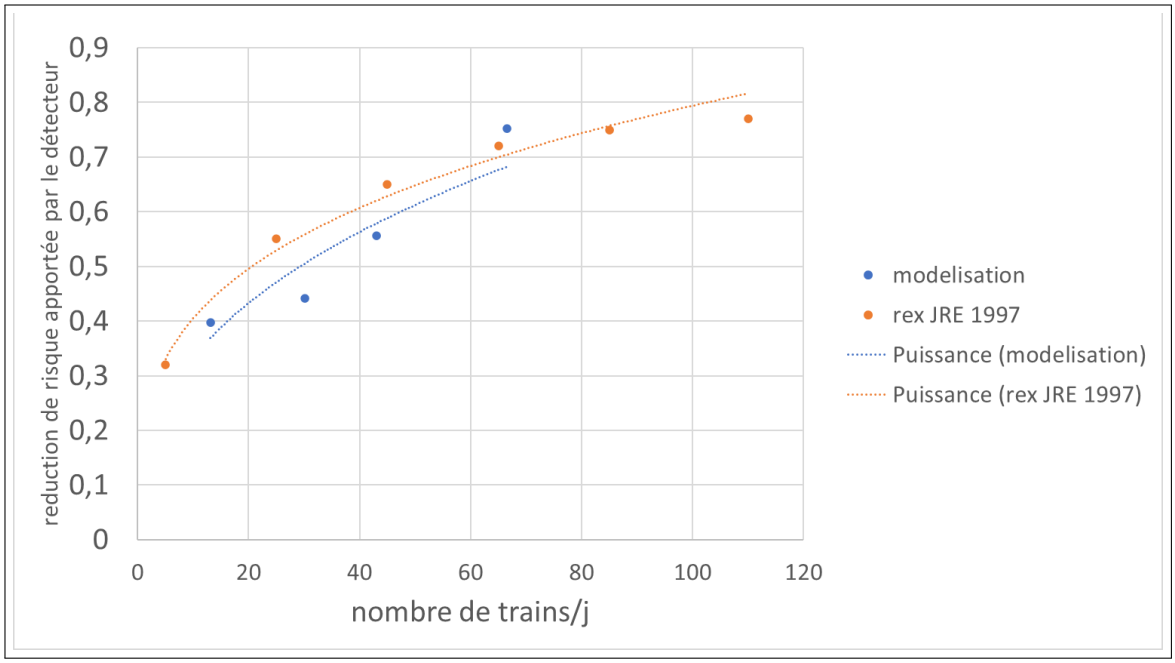



FIGURE 80 – Évaluation de l'efficacité des détecteurs d'obstacles au Japon et comparaison avec le REX de 1997 (Andranao et Maitland). O. Cazier, 2023

Malgré toutes les incertitudes, les courbes de régression obtenues pour le retour d'expérience d'une part, la simulation d'autre part sont proches.

Concernant l'efficacité « moyenne » de 88% annoncée dans le rapport, celle-ci est probablement due au fait qu'au Japon comme en Suède, on équipe en priorité de DOPN les PN les plus préoccupants, et en général ce sont des PN à moment très élevé et fréquentation routière élevée, sur lesquels l'efficacité du DOPN est voisine de 100%.

Pour des PN moins fréquentés, et pour une population hétérogène, on verra plus loin que la simulation donne une évolution de l'efficacité des DOPN en France analogue à celle issue du retour d'expérience japonais, mais un peu inférieure à cause de l'impact du freinage.

## 5.7 Limites probables de validité du modèle générique d'accidentologie aux PN

Les prévisions du modèle ont été examinées pour deux types de passage à niveau (Les SAL 4 et les Passages à niveau Japonais équipés de DOPN « primitifs ») qui n'ont pas été utilisés pour le recalage, et qui présentent des ergonomies routières certes différentes, mais basées sur les même principes (PN à feux et barrières).

Dans les deux cas, la prévision du modèle est identique (SAL 4) ou proche du retour d'expérience terrain (JRE).

*Il est donc raisonnable de penser que, tant que l'ergonomie routière du PN reste basée sur les mêmes principes (système à feux et barrières, à trois états : Ouvert, Activé clignotant, Fermé), le comportement des conducteurs change peu et que le modèle prévoit donc le bon ordre de grandeur de l'écart d'accidentologie à un PN de référence, quel que soit le pays et la culture.*

Un autre argument en faveur de cette conclusion est d'ailleurs donné par les autres retours d'expérience des détecteurs d'obstacles (français 68/80, Suède 2004) et par le retour d'expérience des PN allemands à quatre demi-Barrières qui sont équipés de détection d'obstacles soit Radars/lidars, soit agent de circulation avec caméra : quel que soit le pays, les résultats obtenus sont cohérents avec une réduction de 80 à 100% de l'accidentologie pour les PN à forte fréquentation.

Par contre, on ne peut pas, pour l'instant, conclure que le modèle, sous la forme décrite ci-dessus, permette d'approcher l'accidentologie de systèmes basés sur des principes différents : le comportement des conducteurs, sur des PN à barrières et feux, dépend fortement de l'anticipation du mouvement des barrières, et est très différent de celui des conducteurs face à un passage à niveau à feu seul ou à croix de Saint-André, le risque de cécité d'inattention va aussi être différent (différences de remarquabilité du PN activé, moments faibles de ces passages en ferroviaire classique).

# Chapitre 6

# Exemple n°1 d'utilisation du modèle simplifié : Influence de la durée d'annonce et des performances du train sur le risque de collision

## Table des matières


6.1 Influence des performances de freinage du train . . . . . 142

6.2 Influence de la vitesse du train . . . . . 142

6.3 Influence de la durée d'annonce et des 2/4 barrières . . . . . 144

## 6.1 Influence des performances de freinage du train

Lors de l'étude du modèle préliminaire d'accidentologie aux PN, avec le développement d'un modèle de Monte-Carlo, un des paramètres était une distance de visibilité (variable, prise par défaut à 150 m) du passage à niveau par le conducteur du train, avec comme hypothèses :

— Un conducteur « alerté »
— Un FU (freinage d'urgence) du train.

L'influence sur le nombre de collisions était non significative. Cela restait d'ailleurs vrai si on considérait que le conducteur du train était vigilant vis-à-vis du risque Passage à niveau.

Dans le modèle générique d'accidentologie, on considère que le train ne freine pas (on considère que le conducteur est un détecteur d'obstacle dont le temps de réaction est infini), ce qui explique que, ni les performances de freinage du train (en l'absence de DOPN), ni la vitesse du train n'ont d'influence directe.

## 6.2 Influence de la vitesse du train

En revanche, la vitesse du train a une influence indirecte lorsque la vitesse maximale du train est inférieure à la vitesse de la ligne, ce qui revient à allonger la durée d'annonce, avec :

— Une durée plus longue d'interférence avec la circulation routière et davantage de véhicules interagissant avec le PN.
— Une queue plus longue en fin de cycle.

Globalement, le risque de collision avec un train plus lent que la vitesse de ligne est le même que si l'on avait allongé la durée d'annonce : un train de fret MA100 sur une ligne à 140 a, aux limites du modèle près (pas de prise en compte de la FU) le même risque de collision, à moment égal et nombre de véhicules routier égal, qu'un autorail V140 sur un SAL 4 35s (figure 81 en fonction du moment, pour comparaison résultats antérieurs, et figure 82 en axes logarithmiques plus lisible).

La figure 82 fournit aussi une explication, au moins partielle, à la dispersion constatée des taux d'accidents à moment élevé : non seulement la brisure de symétrie $T, V$ évoquée plus haut, mais aussi la répartition des trains va induire, pour les moments élevés, une forte dispersion lorsque le moment (ou plutôt le flux de véhicules) est élevé, du moins quand le moment devient supérieur à 1000/j (figure 83).

On voit cependant que, pour les moments faibles (moins de 1000) le moment approxime bien le taux de collisions, tandis que l'influence du nombre de véhicules et de la durée d'annonce devient sensible quand $V$ augmente.

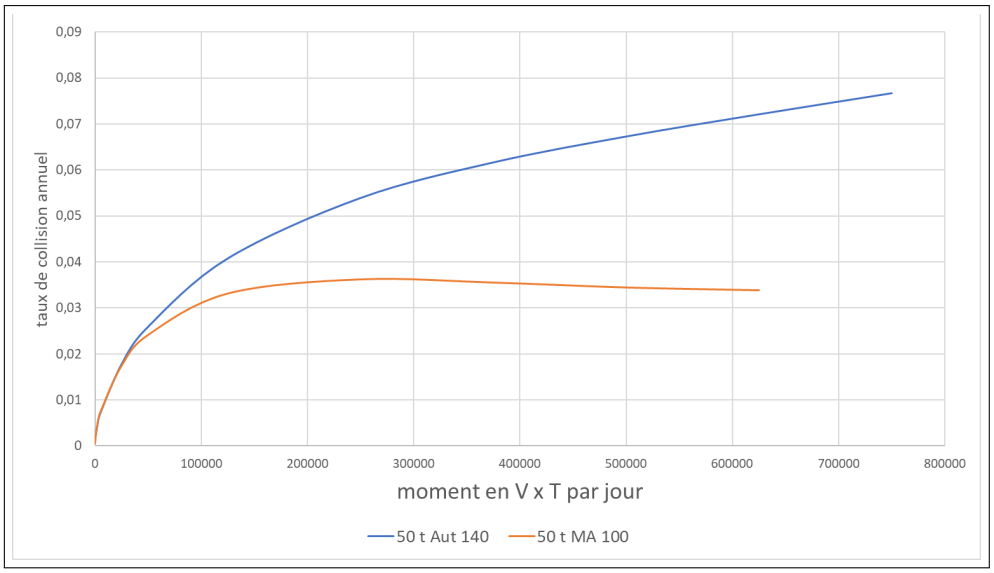



FIGURE 81 – Taux de collision annuel en fonction du moment Pour 50 t/j, ligne V140, Aut 140 et MA 100 – Modèle générique d'accidentologie aux PN -

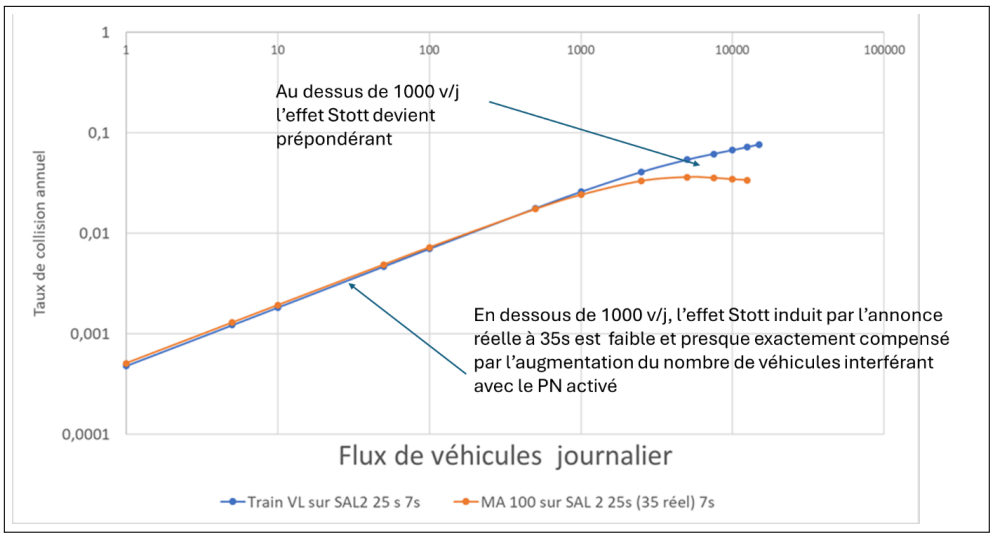



FIGURE 82 – Taux de collision annuel (log log) pour Aut 140 et MA 100 sur SAL 2 classique, Ligne V140 – Modèle générique d'accidentologie aux PN

De même, le risque est légèrement différent sur une ligne à VL 160 « théorique » à cause du délai d'annonce « nominal » de 30s au lieu de 25s, mais aussi, pour les trains à vitesse inférieure à VL, à cause de délais d'annonce « effectifs » qui peuvent devenir longs (même s'ils restent dans la pratique européenne).

Dans le cas d'une ligne V160 avec des trains à VL, 140 et 100 km/h, l'impact des délais d'annonce réels est encore plus important pour le MA100 (sur une ligne V160 avec une annonce de 30s nominale pour les trains à VL, la durée d'annonce effective est de 48s pour un MA 100, d'où un effet Stott important) Et une accidentologie qui ne va plus dépendre principalement du moment, mais de $T$ et V, pour les valeurs de $V$ supérieures

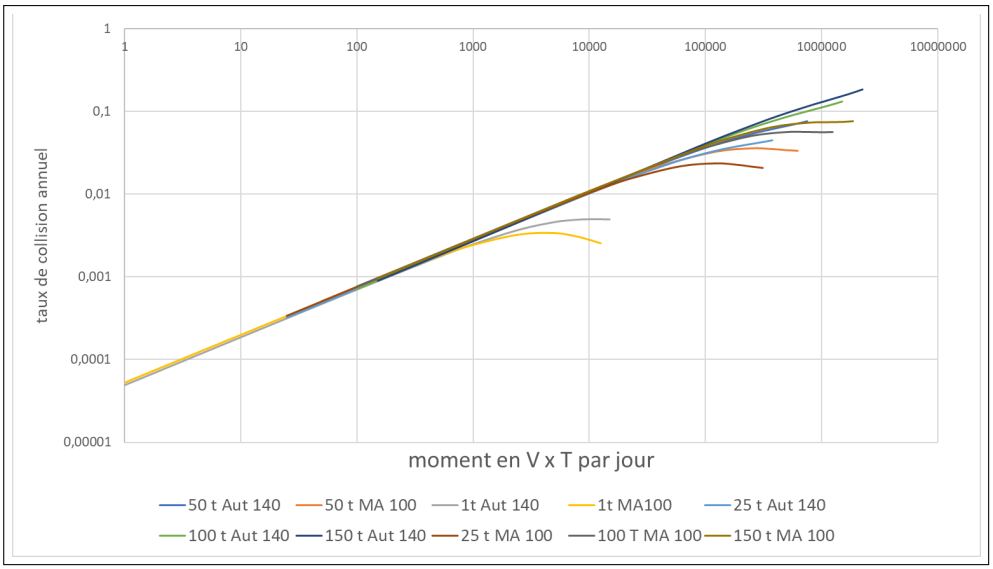



FIGURE 83 – Les performances du train interviennent peu dans le risque de collision (pas du tout dans le modèle générique) sauf si la vitesse inférieure du train modifie la durée nominale d'annonce – Modèle générique d'accidentologie aux PN.

à 1000 v/jour : la brisure de symétrie citée précédemment est très nette et dépend de la durée d'annonce et du flux de véhicule (cf. Figure 84).

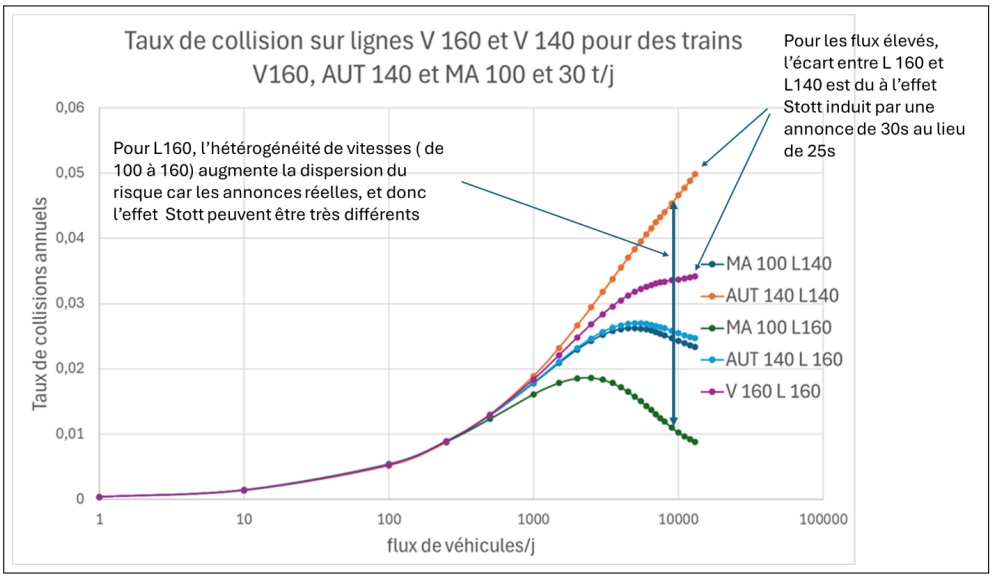



FIGURE 84 – Risque de collision annuel pour les différents types de train qu'on peut rencontrer sur une ligne V 160 et comparaison L 140 - Modèle générique d'accidentologie aux PN

## 6.3 Influence de la durée d'annonce et des 2/4 barrières

Les figures 83 à 86 permettent cependant de mieux comprendre certaines caractéristiques de nos PN qui étaient jusqu'à présent « mystérieuses » :

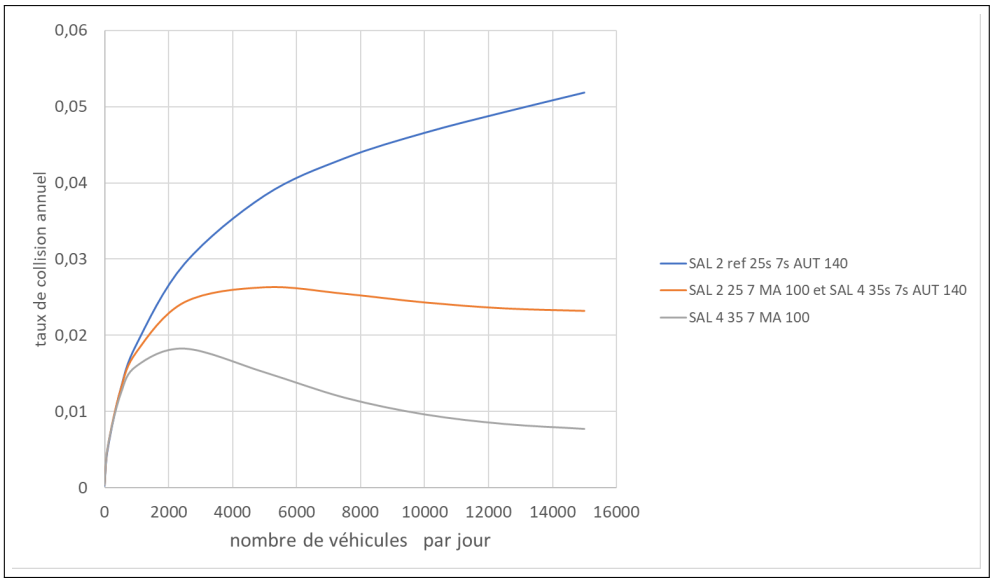



FIGURE 85 – Influence de la durée d'annonce sur le taux de collision – Modèle générique d'accidentologie aux PN

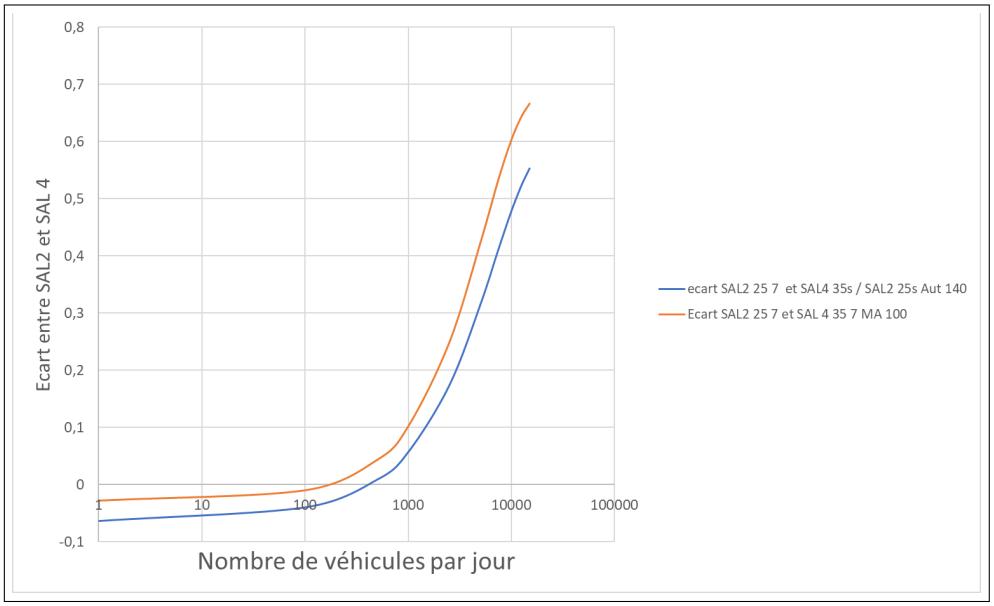



FIGURE 86 – Écart entre SAL 2 25s 7s et SAL 4 35s 7s – Modèle générique d'accidentologie aux PN

- Le taux de collisions d'un SAL 4 est quasiment identique, voire plus élevé qu'un SAL 2 à bas moment, mais à haut moment, il est nettement plus faible et cela s'explique par la différence de durée d'annonce.
- À moment élevé et annonce, l'influence de Ann, $V$ est importante, ce qui explique en partie la dispersion des résultats du retour d'expérience.

# Chapitre 7

# Exemple n°2 d'utilisation du modèle simplifié : Optimisation du passage à niveau « classique » à deux ou quatre demi-barrières

## Table des matières


7.1 Importance d'un travail sur l'environnement routier . . . . . 149

7.2 Optimisation de la durée de descente des barrières . . . . . 150

7.2.1 Travaux routiers : les conducteurs adaptent leur comportement à la durée du feu jaune . . . . . 150

7.2.2 Ce qu'on peut déduire des travaux de sécurité routière. . . . . 151

7.2.3 Effet d'une réduction (modeste) de la durée du clignotement avant barrières . . . . . 151

7.3 Optimisation de la durée d'annonce avec maintien ou réduction du délai de clignotement avant baisse des barrières . . . . . 153

7.3.1 Passages à niveau à deux demi-barrières et annonces courtes de 25s 153

7.3.2 Tolérance à 21s pour les annonces des SAL 2 . . . . . 157

7.4 Pourquoi observe -t -on des « chicanes »? . . . . . 159

7.4.1 Un cas d'école, l'accident d'Allinges (2 juin 2008) . . . . . 159

7.4.2 Le biais d'échantillon . . . . . 161

7.5 Optimisation « à la marge » des passages à niveau classiques . . . . . 163

7.6 D'autres pistes d'optimisation des PN : lutter contre la cécité d'inattention 165

7.6.1 Feux fixes ou feux clignotants ? . . . . . 166

7.6.2 Feux à éclats et R24 multiples ? . . . . . 168

7.6.3 Visibilité des barrières, barrières hautes ou multiples, barrières à haute visibilité (Y compris radars/lidars frontaux, etc.) . . . . . 169

7.6.4 La nécessaire adaptation aux ADAS (Advanced Driver assistance systems) . . . . . 170

7.6.5 Efficacité de ces dispositions . . . . . 171

## 7.1 Importance d'un travail sur l'environnement routier

Lorsque, comme l'a fait Ci Liang dans sa thèse (LIANG 2018), on recherche une corrélation entre la fréquentation routière et ferroviaire, mais sans prendre en compte l'environnement routier, on obtient une loi binomiale négative, qui ressemble beaucoup à une loi de Poisson, mais avec une sur-dispersion.

Une interprétation « classique » de cette sur-dispersion est de considérer, que, dans la population étudiée, est elle-même distribuée selon un processus aléatoire.

Malheureusement, dans le cadre de sa thèse, il n'a été possible d'intégrer que 10 ans de retour d'expérience, et de plus, les lois binomiales négatives obtenues n'étaient pas « parfaites », probablement parce que la corrélation utilisée en $T^{\alpha}V^{1-\alpha}$ ne représentait pas parfaitement l'effet Stott, et que la corrélation utilisée n'intégrait pas le paramètre annonce, alors que la modélisation a montré qu'il était la principale raison du comportement différent des SAL 2 et des SAL 4.

On verra plus loin qu'en recherchant une corrélation inspirée du modèle, ces inconvénients disparaissent, et que l'on peut utiliser la loi binomiale négative obtenue pour évaluer l'importance des paramètres non pris en compte, c'est-à-dire l'environnement routier et l'hétérogénéité des trafics.

*Formulé autrement, cela veut dire que, sur un passage à niveau pris au « hasard », on a une chance sur deux qu'en améliorant son ergonomie routière et en la ramenant à l'ergonomie « courante », de réduire l'accidentologie de 40% et une chance sur 10 de la réduire de 80%.*

La première question à se poser, quand on examine un passage à niveau, est celle de la qualité de son environnement routier, et notamment :

- La présence de voiries parallèles et de carrefours proches avec sas courts entre carrefour et passage à niveau.
- La présence de gares ou de points d'arrêts à proximité du passage à niveau.
- Les risques d'un environnement complexe pouvant,
  - Détourner l'attention du PN : autres risques mineurs comme difficultés de giration, séparateur de chaussée, etc.
  - Ou encourager l'erreur de conduite : surlargeur ou sous largeur de voirie au passage à niveau, dos d'âne, caténaire à moins de 6 m, et/ou nombre de véhicules hauts importants.
- Le risque de cécité au changement : voirie parallèle avec vision de courte durée des R24 en zone centrale.
- Le risque d'un environnement trop simple engendrant une perte de vigilance : longue ligne droite ou faible courbe, passage à niveau souvent non électrifié, voie ferrée masquée par la végétation, etc.

*Une mention particulière sur laquelle il faut attirer l'attention des gestionnaires routiers : le danger extrême posé par des travaux routiers avec alternat, à proximité d'un SAL 2.*

Il existe des façons de lutter contre tous ces risques, la suite de cette thèse en mentionnera quelques-uns, mais il faut d'abord regarder les optimisations du PN lui-même.

## 7.2 Optimisation de la durée de descente des barrières

### 7.2.1 Travaux routiers : les conducteurs adaptent leur comportement à la durée du feu jaune

Les routiers ont fait de nombreuses études, depuis les années 70, pour optimiser la durée du feu jaune et recommander une durée raisonnable de celui-ci.

L'effet de la durée du feu jaune sur le comportement des conducteurs est bien connu ; le conducteur s'adapte.

L'exemple qui suit (figure 87) est tiré de (VAN DER HORST 1988), mais les études postérieures ont donné des résultats analogues : quand on augmente la durée du jaune clignotant, on observe une modification des comportements routiers, mais celle-ci s'estompe rapidement, et un an après la modification, on est revenu, à peu de choses près, au comportement antérieur avec une seconde de jaune complémentaire.

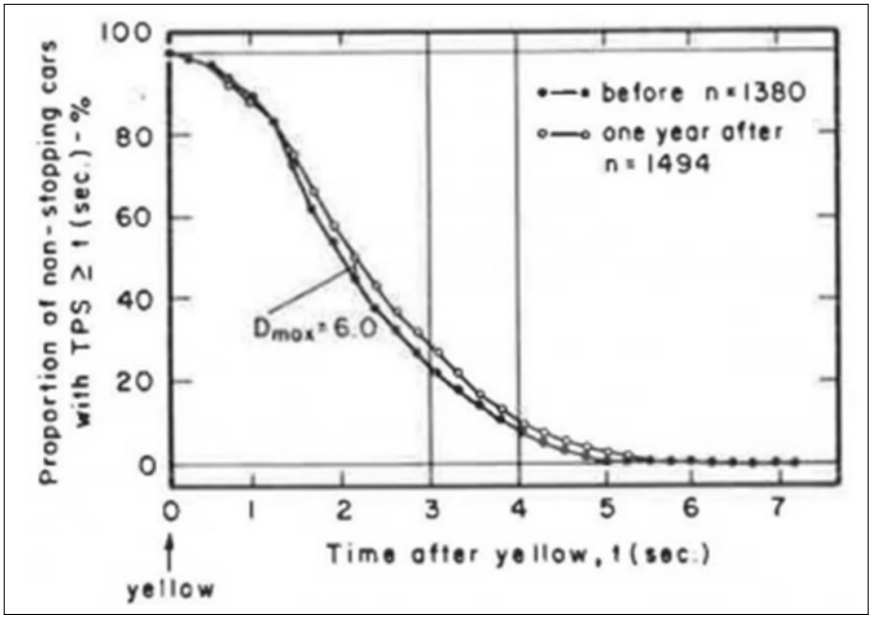



FIGURE 87 – Comportement des conducteurs au feu jaune, d'après (VAN DER HORST 1988)

Il y a toutefois une différence entre le comportement aux feux routiers et le comportement aux PN à feux et barrières, du moins en France : la durée du feu jaune, entre 3s et 4s dans l'exemple cité, est très courte par rapport aux performances de freinage, alors que la durée de clignotement avant chute des barrières, à 7s, est en gros 2s plus longue que la durée nécessaire pour arrêter à 3 $\sigma$.

### 7.2.2 Ce qu'on peut déduire des travaux de sécurité routière.

Dans la plupart des pays, la durée avant chute des barrières est de 5s, un peu supérieure à la durée des jaunes routiers (entre 3 et 5s, modulés en fonction de la vitesse des véhicules routiers).

C'était notamment le cas des essais de (RADALJ 2025) à Perth et on constate, en comparant avec (LIANG 2018), qu'il y a eu aussi une adaptation du comportement du conducteur routier.

L'hypothèse retenue est donc dans le cas d'une signalisation à « 3 états » (Feu tricolore ou PN à feux et barrières) :

- Lorsque la durée du deuxième état reste inférieure à la durée nécessaire pour arrêter les véhicules (temps nécessaire + 3 $\sigma$), modifier la durée du deuxième état n'a pas d'effet durable sur le comportement du conducteur.
- Lorsque la durée du deuxième état (ou du moins du rouge clignotant PN) est supérieure à la durée nécessaire pour arrêter les véhicules, le comportement des conducteurs s'adapte, et ils retardent la décision de freiner d'une durée équivalente à la marge sur le freinage.

Cette hypothèse est totalement cohérente avec les observations de (LIANG 2018), et suggère que, si l'on ramenait le clignotement à 5s au lieu de 7s, à annonce constante,

- Les véhicules routiers arrêteraient 2s plus tôt et disposeraient d'une marge supplémentaire de 2s pour redémarrer en cas d'incident les immobilisant sur le PN.
- À flux routier constant, la queue de véhicules (qui protège contre les intrusions des conducteurs distraits) se formerait 2s plus tôt, ce qui réduirait légèrement le risque de cécité d'inattention.
- L'impact sur les bris de barrières serait limité dans la durée, compte tenu de l'adaptation du comportement des conducteurs routiers.
- Par contre, il se pourrait (mais c'est difficilement quantifiable) :
  - Que davantage de conducteurs distraits ne remarquent pas le PN., ou, plus exactement, que des conducteurs distraits par un autre stimulus, n'aient pas le temps de reporter leur attention sur le danger PN
  - Que cependant, la réduction de la marge pourrait inciter certains conducteurs à « faire davantage attention » au PN, perçu comme plus dangereux, et donc réduire le risque de distraction.

### 7.2.3 Effet d'une réduction (modeste) de la durée du clignotement avant barrières

En simulant cette modification avec le modèle décrit précédemment, sans prendre en compte un effet positif ou négatif de cette réduction sur le risque distraction, il a été constaté une réduction modeste du risque de collision. Le calcul a été fait sur une ligne à V140, parcourue par des autorails V 140 1300 à V140 et des MA 100 à 100, soit une configuration assez courante sur des lignes TER.

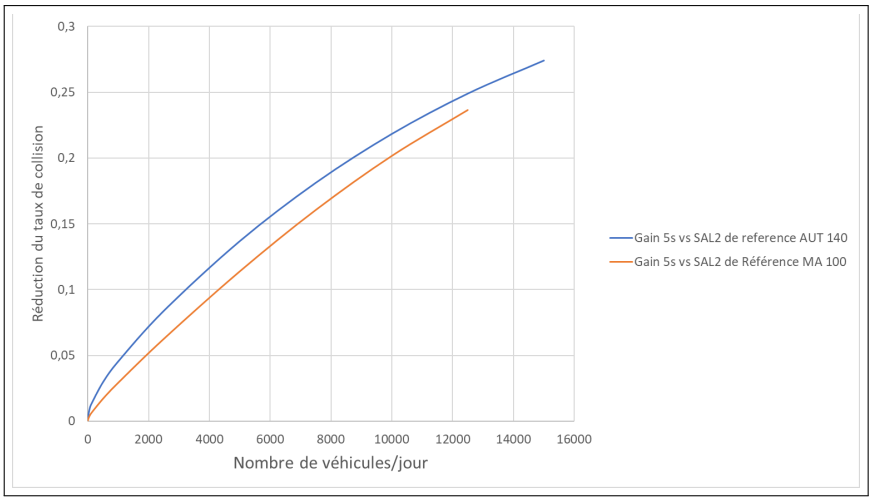



FIGURE 88 – Effet d'un raccourcissement de la durée de clignotement à 5s au lieu de 7s à annonce constante de 25s. Modèle générique d'accidentologie aux PN – O. Cazier

L'impact est effectivement positif (88) sur le risque de collision, pour les deux raisons citées précédemment.

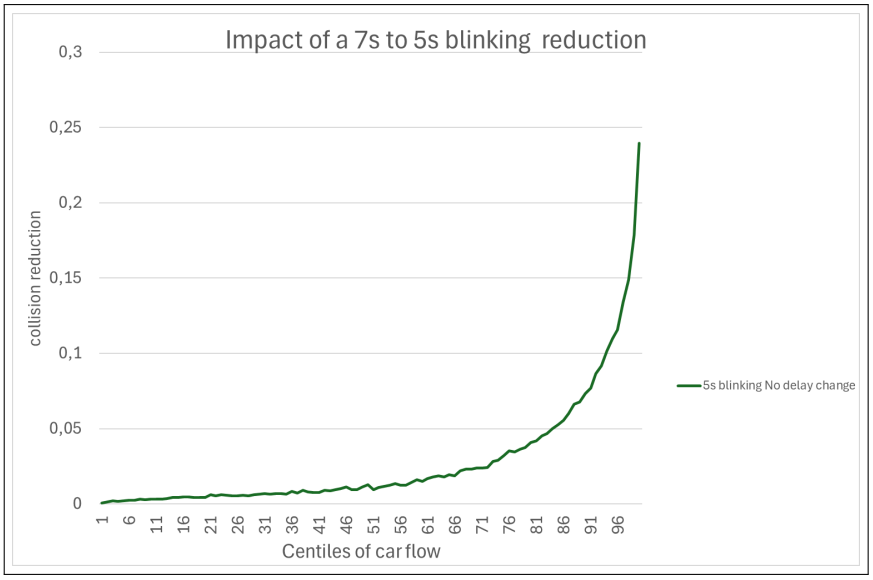



FIGURE 89 – Impact d'une réduction à 5s du clignotement. Modèle générique d'accidentologie aux PN

Sur la population des PN du RFN (89), dont le moment moyen est faible, la réduction obtenue est modeste (de l'ordre de 5% en moyenne) et n'est vraiment significative ($>$ 10%) que sur le dernier décile.

Mais la modification est peu intrusive, et pourrait être faite progressivement, lorsqu'on fait la maintenance des PN. En même temps qu'on déclenche un retour d'expérience pour vérifier que l'effet sur le taux de distraction est négligeable.

## 7.3 Optimisation de la durée d'annonce avec maintien ou réduction du délai de clignotement avant baisse des barrières

### 7.3.1 Passages à niveau à deux demi-barrières et annonces courtes de 25s

En France, la durée d'annonce des passages à niveau à deux demi-barrières est plus courte, à ma connaissance, que dans n'importe quel pays (25s quand la plupart des autres pays pratiquent 30s).

La durée d'annonce de nos passages à niveau à quatre demi-barrières est, elle aussi, dans la limite basse (seuls certains PN EGDM aux USA ont des annonces plus courtes).

On vient de voir plus haut qu'anticiper la chute des barrières à 5s au lieu de 7s (comme pratiqué dans la plupart des pays) augmente l'effet Stott et réduit probablement le risque de collision, au moins si la fréquentation routière est significative.

On peut penser qu'allonger la durée d'annonce peut avoir là aussi l'avantage d'augmenter l'effet Stott, et donc réduire le risque.

Pour confirmer cette intuition, on a simulé le SAL 2 « AHB Européen » (Figure 90) avec une annonce de 30s et un délai avant chute des barrières de 5s et comparé au SAL 2 classique à 25s et, sur une ligne à VL140 parcourue par des trains de type AUT 140 1300 ou MA 100.

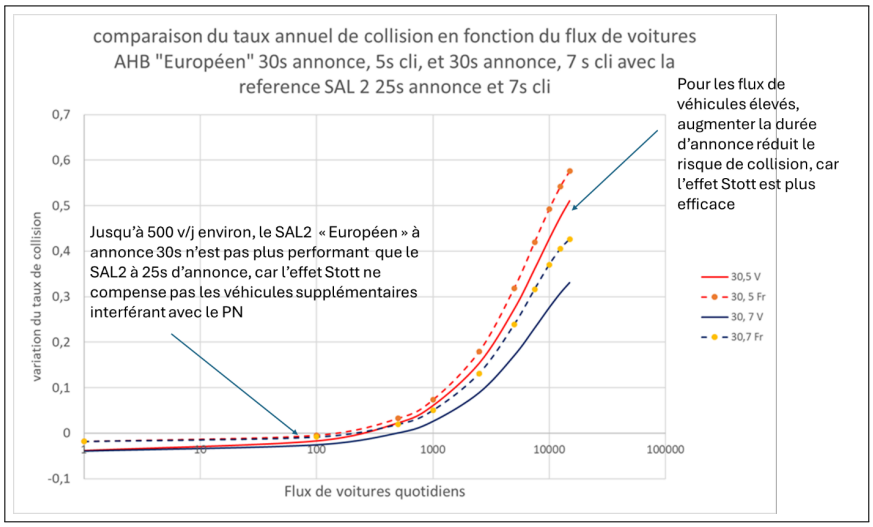



FIGURE 90 – Comparaison SAL 2 «classique» français et AHB «européen». Modèle générique d'accidentologie aux PN

Comme on le voit sur la figure 90, l'effet est plus complexe qu'on ne l'imagine habituellement :

— Pour des flux de véhicules très faibles (moins de 500 V/j) l'effet Stott est trop faible pour compenser le nombre de véhicules supplémentaires interagissant avec le PN pendant 30s au lieu de 25.

— Pour des flux de véhicules plus élevés, l'effet Stott compense l'augmentation de la durée d'exposition au risque, et le nombre de collisions est inférieur à celui du PN SAL 2 classique 25s et 7s.
— L'AHB européen 30,5 est aussi légèrement plus performant que le SAL 2 classique 160 km/h 30,7 mais la différence (due à l'effet Stott) est peu significative, sauf sur les flux de véhicules très élevés.

Il est possible aussi, en gardant le clignotement à 7s, de regarder l'impact du temps d'annonce sur le taux de collision (figure 91), par rapport au PN de référence SAL 2 25s 7.

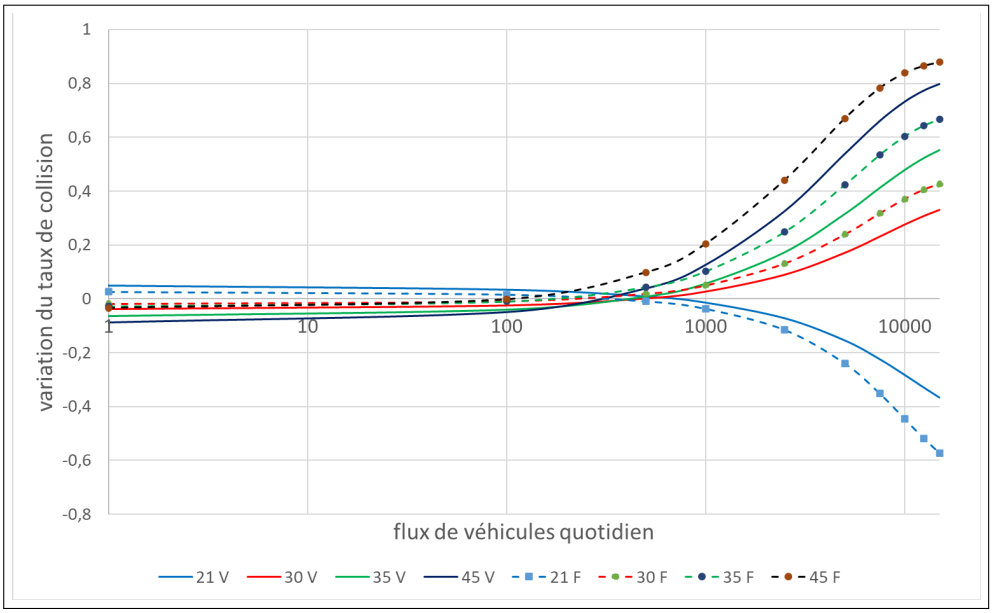



FIGURE 91 – Évolution du risque de collision sur ligne V140 parcourue par AUT 140 1300 et MA 100 en fonction du flux de véhicules pour des durées d'annonces de 21,30, 35 et 45s par rapport au SAL 2 de référence 25 7s. Modèle générique d'accidentologie aux PN

Comme la différence est essentiellement liée à l'effet Stott, pour des flux de véhicules inférieurs à 500 V /j, la différence est faible.

Cependant, comme on l'avait déjà constaté sur le SAL 4, allonger la durée d'annonces, pour les tout petits flux de véhicules n'est pas forcément une bonne idée : pour des flux inférieurs à quelques centaines de véhicules par jour, l'effet Stott est très faible, et ne compense pas l'augmentation du nombre de véhicules (proportionnelle à la durée d'annonce) qui interfère avec le PN activé.

En conclusion :
— En France, il existe deux durées d'annonces pour les passages à niveau à deux ½ barrières :
  — 25s pour les vitesses ferroviaires inférieures ou égales à 140 km/h.
  — 30s pour les vitesses ferroviaires supérieures à 140 km/h.
— La justification, sur le plan de la sécurité, de ce choix, est non connue, et les explications données parfois contradictoires :

- « Réduire le plus possible la durée d'annonce réduirait le risque imprudence » est un discours fréquent.
- En revanche, si on augmente la durée d'annonce lorsque la vitesse ferroviaire augmente, donc quand la gravité et par conséquence la criticité des accidents augmente, n'a de sens que si augmenter la durée d'annonce réduit le risque.

Pour évaluer l'intérêt d'une politique plus rationnelle, il est possible d'évaluer l'impact (figure 92), sur la population actuelle du RFN (même distribution de $T$ et $V$, annonces actuelles réelles, lignes V 140 et trains AUT 140 1300) de la proposition suivante :

- Réduire le clignotement à 5s.
- Conserver le clignotement à 7s et
  - Conserver les annonces actuelles en dessous de 500 v/j.
  - Au-dessus de 500 v/j, annonce minimale à 30 (SAL 2) ou 45 (SAL 4).
- Réduire le clignotement à 5s et
  - Conserver les annonces actuelles en dessous de 500 v/j.
  - Au-dessus de 500 v/j, annonce minimale à 30 (SAL 2) ou 45 (SAL 4).

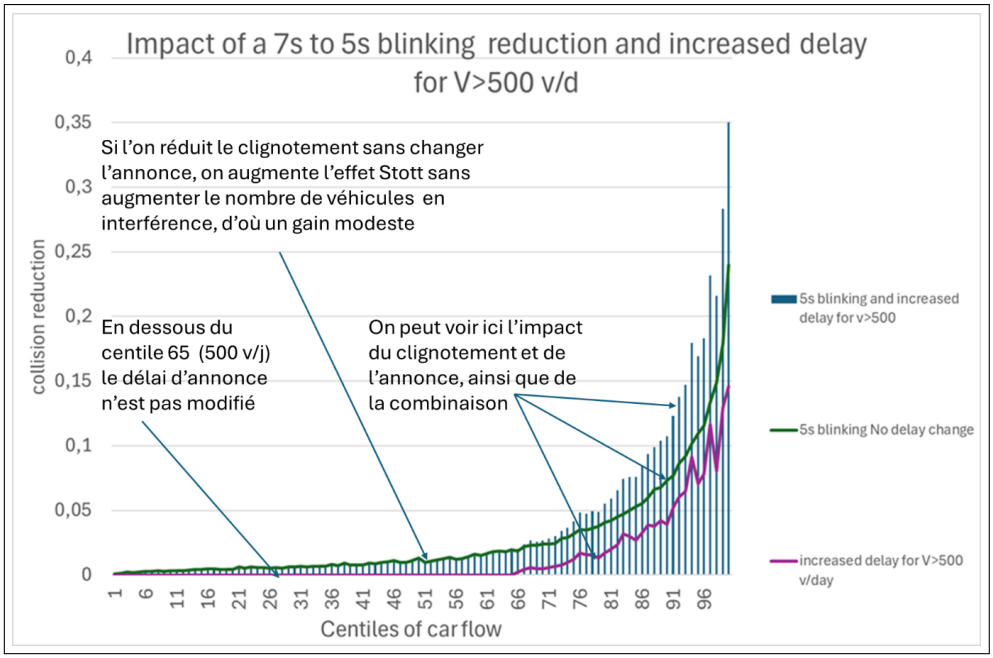



FIGURE 92 – Influence d'une optimisation de la durée d'annonce et du clignotement sur l'accidentologie des PN du RFN. Modèle générique d'accidentologie aux PN

L'impact de la proposition (réduire le clignotement et augmenter le délai minimal d'annonce pour v > 500/j) sur les PN du réseau SNCF est significative sur le dernier décile (20% figure 92) mais relativement modeste sur l'ensemble (réduction de 8% figure 93), car une partie non négligeable des PN chargés en véhicules ont déjà des annonces supérieures à 30s ou 35s. En effet, les exigences d'annonces actuelles du RFN sont des minima, l'annonce « moyenne » est un peu inférieure à 32s et beaucoup de PN chargés en véhicules sont des SAL 4 à 35s ou 45s.

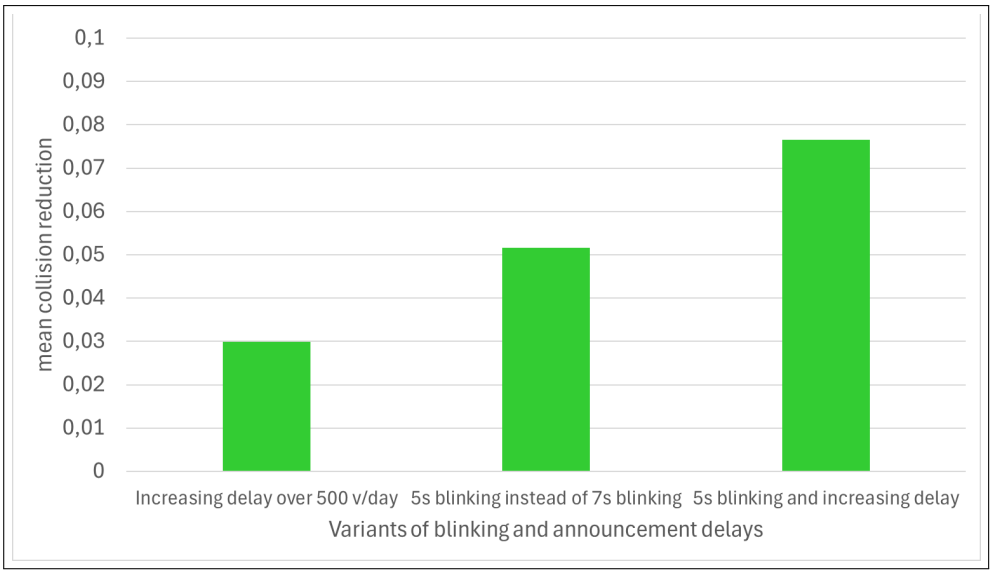



FIGURE 93 – Impact global sur l'accidentologie du RFN d'une modification de l'annonce. Modèle générique d'accidentologie aux PN

La plus grande partie (5%) de cette amélioration vient de la réduction du clignotement à annonce conservée, modification peu intrusive et qui semble efficace quelle que soit la fréquentation du PN.

À noter cependant qu'elle pourrait influer de deux façons contradictoires sur la distraction :

— La durée d'observation du cli étant plus courte, il est possible que des conducteurs distraits, qui auraient remarqué le PN activé lors d'une observation de 7s ne le remarquent pas lors d'une observation de 5s.
— À l'inverse, la réduction de la durée de clignotement, donc de la marge, peut rendre le PN « subjectivement plus dangereux » et réduire le risque que le conducteur ne le remarque pas.

Cependant, les Rex japonais et européen suggèrent que ces deux points sont, soit négligeables, soit se compensent pour des durées d'annonces et de clignotement « raisonnables ».

L'optimisation de l'annonce n'améliore que de 3% car pour les flux élevés, beaucoup de PN sont déjà à des annonces supérieures à 30s.

*Le modèle d'accidentologie simplifié aux PN suggère donc, plutôt que de moduler la durée d'annonce en fonction de la vitesse de ligne (ce qui n'a pas de fondement rationnel), de la moduler pour les installations futures en fonction du flux de véhicules :*

— *En dessous de 500 véhicules par jour, quelle que soit la vitesse de ligne, conserver la durée d'annonce actuelle dont l'influence est faible.*
— *Au-dessus de cette valeur, et quelle que soit la vitesse de ligne, viser une durée d'annonce minimale plus longue (30s pour les SAL 2, 45s pour les SAL 4) avec jupes et calfeutrement pour*

*les SAL 4 (4 demi-barrières, jupes sous barrières, barrières d'étanchéité autour des moteurs) si la fréquentation mode doux est significative* [1]

### 7.3.2 Tolérance à 21s pour les annonces des SAL 2

Il y a aussi, en France, une tolérance à 21s comme délai d'annonce minimal pour les PN à deux ½ barrières jusqu'à 140 km/h.

Là aussi, l'effet de cette tolérance est complexe (figure 91 et figure 95) : pour de tout petits flux de véhicules, en l'absence d'effet Stott et avec une énorme majorité d'accidents dus à la distraction, raccourcir l'annonce réduit le nombre de véhicules interférant avec le PN activé, et donc le risque de collision ;

Mais dès que le nombre de véhicules/j dépasse quelques centaines, le risque de collision devient significativement supérieur à celui d'un SAL 2 classique à annonce 25s : la tolérance sur les annonces très courtes est à éviter quand les flux de véhicules sont trop élevés, sauf si l'on réduit le pré-clignotement de 7s à 5s en gardant l'annonce à 21s, car dans ce cas, le niveau de protection accordé par l'effet Stott est voisin.

Cependant, en pratique, le nombre de PN avec une annonce inférieure à 25s est limité, et beaucoup d'entre eux sont des PN avec un faible flux de véhicules : supprimer cette tolérance se traduirait par une réduction du risque de 0,06%...non significative vu la précision du calcul.

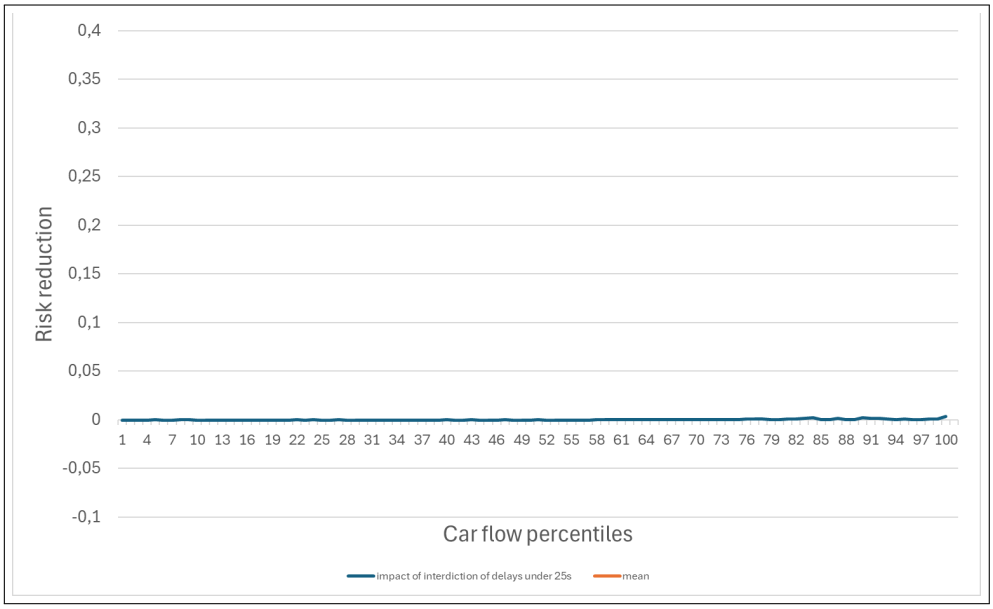



FIGURE 94 – Impact de l'interdiction des délais d'annonce inférieurs à 25s sur les PN actuels du réseau SNCF. Modèle générique d'accidentologie aux PN

Comme on peut le voir sur la figure 94, l'impact d'une interdiction des délais d'annonce inférieurs à 25s sur la totalité du réseau est négligeable car

1. On verra plus loin que des types de PN alternatifs (DOPN de type allemands ou japonais, EGDM) pourraient aussi être pertinents.

— Pour les faibles flux de véhicules, le modèle donne un écart peu significatif entre 21s et 25s
— La plupart de ces PN ont des flux faibles.

Il pourrait cependant être utile de formaliser un flux de véhicules maximal pour cette tolérance. La figure 95 suggère de limiter à 500 v/j la possibilité de dérogation, ou de l'accompagner d'une réduction obligatoire à 5s de la durée de clignotement préalable (figure 96)

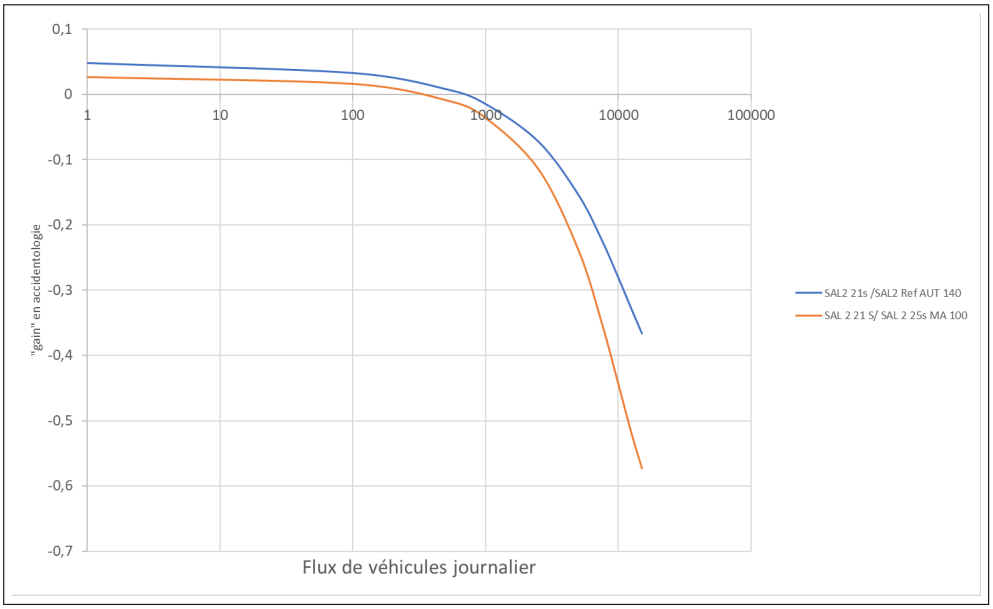



FIGURE 95 – La tolérance à 21s est à utiliser avec prudence quand le flux de véhicules dépasse quelques centaines. Modèle générique d'accidentologie aux PN

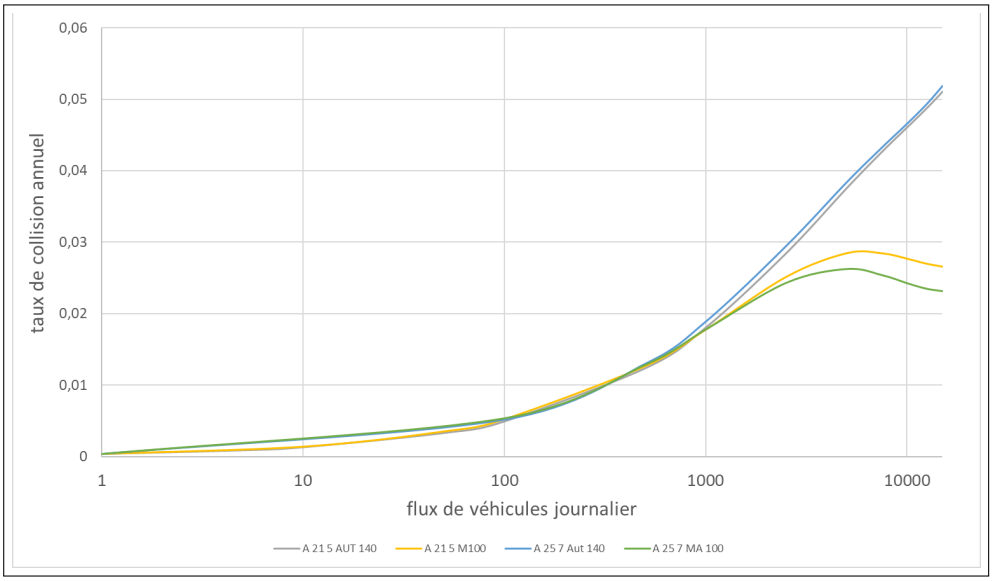



FIGURE 96 – Si l'on réduit à la fois le pré clignotement de 7 à 5s et l'annonce de 25 à 21s, on retrouve un risque de collision très voisin du SAL 2 Standard 25 7, y compris à flux de véhicules élevé. Modèle générique d'accidentologie aux PN

*La tolérance d'annonce à 21s sur les SAL 2 n'amène pas, pour les flux de véhicules faibles, d'augmentation significative des accidents.*

*Quand le flux de véhicule est élevé, passer de 25s à 21s dégrade fortement la sécurité, sauf si l'on compense l'effet Stott en réduisant le clignotement de 7s à 5s, mais en pratique, ce cas ne semble pas se rencontrer sur le réseau SNCF car la tolérance à 21s n'est utilisée que sur des PN à moment faible en pratique.*

## 7.4 Pourquoi observe-t-on des « chicanes » alors qu'apparemment, la plupart des accidents sont dus à la cécité d'inattention ou à la cécité au changement?

Cette observation peut en fait s'expliquer par plusieurs biais :
- Un biais d'« expertise »
- Un biais d'échantillon
- Et par la difficulté d'observation des accidents de PN : fréquence rare, témoins peu nombreux et peu fiables ; létalité importante, difficulté à remonter à la cause première

### 7.4.1 Un cas d'école, l'accident d'Allinges (2 juin 2008)

Pour l'accident d'Allinges, on dispose, compte tenu de sa gravité et de sa médiatisation, d'une analyse très complète par le BEA-TT. Voici quelles étaient les conclusions du BEA-TT :

(Extrait du rapport du BEA-TT Allinges)

*«La cause immédiate de cet accident est l'immobilisation de l'autocar sur le passage à niveau, alors que l'arrière engageait encore la voie ferrée. La cause de cette immobilisation, qui n'a pu être établie précisément, a pu combiner des problèmes mécaniques (injection, boite de vitesse) et des facteurs humains (panique du chauffeur, mauvaise manœuvre).*

*Deux facteurs, liés à la configuration et au mode de fonctionnement du passage à niveau, ont également joué un rôle dans cet accident :*

*la géométrie difficile de la traversée routière, rendant le franchissement du passage à niveau long et délicat pour les véhicules lourds obligés de rouler très lentement ;*

*la marge de sécurité étroite offerte par le délai d'annonce des trains (d'une part avant l'abaissement des demi-barrières et d'autre part avant l'arrivée du train) pour un véhicule s'engageant au moment du déclenchement des signaux d'annonce.*

*L'état mécanique de l'autocar et le manque de pratique de ce véhicule par son chauffeur ont également pu jouer un rôle dans cet accident. »*

Regardons un peu « quantitativement » ces deux derniers points :

La distance entre barrières est de 6,55m.

La longueur de l'autobus faisait 11,99m.

Pour échapper complètement au PN, il fallait donc que l'autobus avance de 17,54 m.

La barrière d'entrée s'étant fermée 7s avant le choc d'après le Siam, il aurait suffi que le car avance de 4,75 m pendant ces 7s pour que l'arrière du Bus échappe à la zone dangereuse, et donc à l'accident, soit une vitesse de 2,44 km/h (d'après le Bea-TT, la vitesse moyenne du bus dans la séquence de franchissement du PN aurait été de 2,87 km/h, et de 0,6 km/h pendant les 13,5s entre dégagement de la barrière et choc).

Or, les tests de franchissement faits par le BEA-TT avaient montré qu'un car analogue pouvait traverser le PN à une vitesse de 4 km/h soit un temps de dégagement de 16s.

*En franchissant le PN à la vitesse réduite, mais « normale » de 4 km/h, l'autocar pouvait donc, sans accident, et un délai d'annonce réel de 26s s'engager sur le PN jusqu'à 10s après début du clignotement.*

Les deux problèmes à résoudre pour Allinges semblent donc être :

— Pourquoi l'autocar s'est-il engagé sur le PN après 4s de clignotement ?
— Pourquoi sa vitesse de franchissement était aussi basse, et pourquoi la vitesse de franchissement moyenne, pendant les 13 dernières secondes, barrières totalement fermées, a été inférieure à celle d'un homme au pas ?

Revenons au rapport du Bea-TT (Rapport Allinges) :

BEA-TT (Rapport Allinges)

*« Le chauffeur de l'autocar a déclaré qu'en descendant vers le passage à niveau, il avait vu un véhicule de type 4x4, venant en sens inverse, s'engager sur le PN. Il s'est donc arrêté avant la courbe à droite menant au passage à niveau pour laisser passer ce véhicule. Il a ensuite vu un deuxième véhicule venant en sens inverse, mais, ce dernier a pris l'embranchement vers la zone d'activité et ne s'est donc pas dirigé vers le PN. Le passage à niveau étant libre, il y a alors engagé son autocar. Il affirme que le feu de signalisation était éteint lorsqu'il s'est engagé et qu'il n'a pas entendu de sonnerie à ce moment.*

*Il n'a pas vu les barrières se baisser, mais les enfants ont signalé tout à coup que la barrière située sur la gauche descendait. L'ayant vérifié dans son rétroviseur de gauche, il a alors tenté d'accélérer, mais l'autocar « ne voulait plus avancer».»*

Et les conducteurs des autres véhicules témoins de l'accident :

(Extrait rapport Bea-TT Allinges)

*« Cinq véhicules se sont arrêtés au passage à niveau derrière l'autocar et ont assisté à l'accident. Deux des conducteurs (situés en troisième et cinquième position derrière l'autocar) ont déclaré que l'autocar s'était engagé après le déclenchement des feux ; les autres conducteurs ne se prononcent pas. Un seul a entendu la sonnerie, mais n'est pas en mesure de dire si l'autocar était déjà engagé à ce moment. »*

Le mécanisme de l'accident, telle qu'il semble le plus vraisemblable, pourrait être le suivant :

— Le conducteur, distrait par l'arrivée de véhicules en sens inverse, concentre son attention sur ceux-ci, et ne remarque pas l'activation du PN : il redémarre donc et s'engage sur le PN alors qu'il clignote depuis au moins 4s.
— Lorsque les véhicules en sens inverse ont dégagé, il concentre son attention sur les difficultés de franchissement du PN et conserve une vitesse extrêmement prudente,

de l'ordre de 2,5 km/h pour gérer les difficultés de giration et avoir une réserve de puissance pour gérer la pente, d'autant plus que l'autobus lui est peu familier et que ses performances sont substandards.
— Lorsque les enfants lui font remarquer (vers 15,5s après déclenchement) que la barrière de sortie est descendue et frotte sur le toit de son car *(il semble ne pas avoir remarqué la descente de la barrière d'entrée, d'après son témoignage qui n'en fait pas état, ni celle de la barrière de sortie qui lui a été signalée par les enfants)*, il s'est probablement arrêté ou quasiment arrêté pour vérifier l'information (sa vitesse moyenne devient 0,6 km/h au lieu de 2,5 km/h, ce qui est cohérent avec un fort ralentissement, voire un arrêt, suivi d'un redémarrage difficile).
— Ayant pris conscience du danger, et dans son affolement devant un danger non anticipé, avec un autocar non familier et de performances substandard, il n'a pas pu ré-accélérer et dégager à temps de la zone dangereuse.

Plusieurs faits importants ressortent de l'analyse :
— Tout d'abord, c'est *après 15,5s d'activation au moins, voire 17s (pour tenir compte du temps de réaction des enfants et du conducteur)* que le conducteur a pris conscience que le PN était activé : on est, à Allinges, encore plus qu'à Millas ou à Port-Sainte-Foy, dans un cas extrême de cécité d'inattention.
— La très mauvaise configuration du PN a aussi fortement joué, mais de deux façons :
  — En préoccupant le conducteur, elle a contribué à rendre « invisible » le PN pendant plus de 12s.
  — Elle a aussi entrainé le choix d'une vitesse excessivement lente par l'autocar.

Au vu de ce rapport et du temps mis par le conducteur à « remarquer » que le PN était activé, on peut s'interroger sur les raisons qui font qu'avant Millas, la cécité d'inattention était quasiment absente des causes identifiées d'accident au PN, alors qu'elle a été identifiée depuis longtemps comme une des causes majeures d'accident routier.

La raison en est probablement le biais d'expert : beaucoup d'experts ferroviaires « savaient » que les causes principales d'accident de PN étaient la « chicane » et la panne mécanique, la cécité d'inattention n'en faisait pas partie, et n'était pas recherchée, même lorsqu'elle est évidente comme à Allinges.

### 7.4.2 Le biais d'échantillon

La valeur médiane du flux de véhicules des PN en France est de 200/j.

La valeur médiane du flux de véhicules des PN ayant eu un accident au moins, entre 1993 et 2013, est de 800/j.

Avec ces valeurs de flux, l'effet Stott ne protège pas des intrusions tardives et la cécité d'inattention est, de façon écrasante, la cause dominante de l'accident.

Mais ces PN ne dominent l'accidentologie que parce qu'ils sont très nombreux : *les PN « préoccupants », les plus accidentogènes, ont des moments et des flux de véhicules élevés. Sur ces PN,*

*les conducteurs anticipent le danger PN, l'effet Stott est important et l'erreur de conduite est aussi importante, voire plus, que la cécité d'inattention.*

Or, ce sont ces PN préoccupants que l'on observe, que l'on étudie et dans le cas de ces PN à flux élevé, la cécité d'inattention est « moins dominante » que sur les PN les moins fréquentés.

Dans le modèle générique, l'hypothèse que les taux d'incidents dus à l'imprudence, ne dépendent pas du moment, comme suggéré par Ci Liang (Liang, 2018) a été retenue, contrairement aux incidents dus à la cécité d'inattention.

Le modèle décrit donc un PN situé dans un environnement routier « moyen », et permet d'évaluer, à partir de $C_d/C_i$ (calculé en fonction du REX d'accidentologie de la SNCF), de l'esquive et de l'effet Stott calculés par le modèle, un rapport $A_d/A_i$, le rapport entre les accidents dus à la distraction et les accidents dus à l'imprudence.

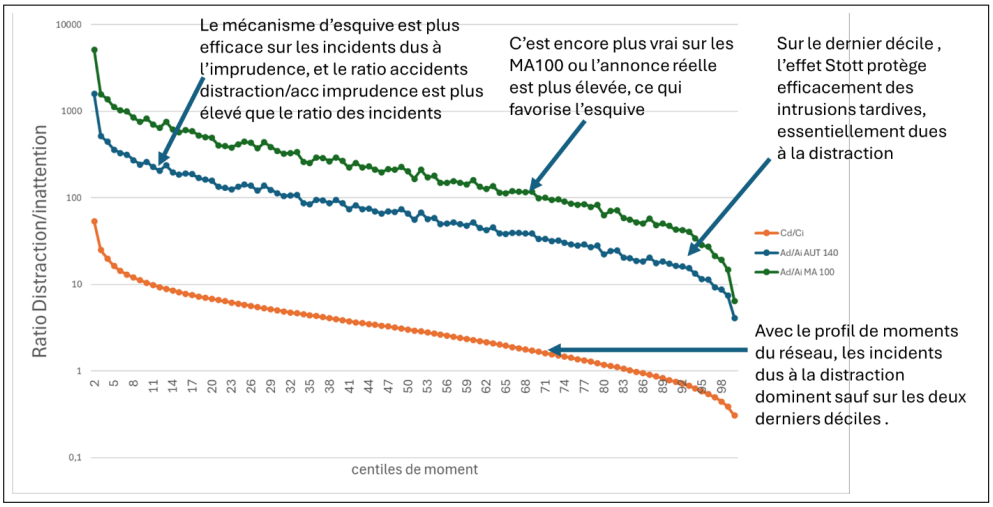



FIGURE 97 – Ratio $A_d/A_i$ entre accidents dus à la cécité d'inattention et à l'imprudence, sur une ligne VL 140, des trains AUT 140 ou MA 100 et une population de PN représentative des PN à SAL du réseau et comparaison avec le ratio des incidents CD/CI. Modèle générique d'accidentologie aux PN

Ce rapport va dépendre fortement de la vitesse effective du train (qui va induire une durée d'annonce effective plus ou moins longue) comme on peut le voir sur la figure 97.

Si l'on compare les trains MA 100 et Aut 140, on voit qu'il est significativement plus élevé pour les MA 100 : l'annonce plus longue permet une esquive plus efficace, ce qui réduit davantage le risque d'accident quand l'initiation est précoce. Or, les incidents dus à l'imprudence sont en général plus précoces que ceux dus à la distraction.

Enfin, l'inflexion des courbes dans le dernier quartile est due à l'effet Stott, qui réduit la probabilité d'accidents tardifs, essentiellement dus à la cécité d'inattention.

Cette simulation confirme l'analyse du biais d'interprétation : la pratique est d'observer de préférence les PN à moments les plus élevés, parce qu'ils sont les plus accidentogènes, et l'on voit des incidents dus à l'imprudence ou à l'erreur de conduite, mais lorsqu'on ana-

lyse un accident, il a souvent lieu sur un PN à moment plus faible, et la cécité d'inattention domine et fait partie du mécanisme d'accident.

## 7.5 Optimisation « à la marge » des passages à niveau classiques

Dans ce chapitre, on a évalué l'influence de la durée de clignotement et de la durée d'annonce totale.

Concernant la durée de clignotement (à durée d'annonce totale constante), le modèle indique que la valeur de 5s, pratiquée dans la plupart des pays européens, serait préférable aux 7s pratiquées en France, et ce, d'autant plus que le flux de véhicules est élevé. Cependant, on peut craindre que, si l'on réduit de 7 à 5s, une partie des conducteurs distraits, qui se « rattrapent » avec 7s et prennent conscience du danger, ne le fassent plus avec 5s.

À l'inverse, on pourrait imaginer qu'en passant de 5 à 7s à annonce totale égale (et donc en augmentant le risque apparent), des conducteurs qui « négligent » le danger PN au profit d'un danger moins grave, mais plus fréquent, feraient davantage attention au risque PN.

Ce que l'on sait des REX de pays comme le Japon ou le monde germanique semble cependant indiquer que le ratio entre distraction et imprudence est voisin du notre : le changement de durée de clignotement n'est pas immédiatement visible.

Mais la réduction du taux de collision prévue par le modèle est modeste, et limitée aux PN à flux de véhicules élevés sur lesquels l'effet Stott est non négligeable : une expérimentation « brutale » désireuse de valider l'effet d'une réduction de la durée de clignotement nécessiterait, pour être significative, d'équiper la plupart de ces PN et de les observer plusieurs années, ce qui paraît, malgré la modestie du coût de la transformation d'un PN, peu réaliste.

Une alternative pourrait être d'instrumenter quelques PN et vérifier que le comportement des conducteurs s'aligne, une fois les habitudes prises, sur celui mesuré par T. Radalj à Perth, car le faible coût de la mesure, le risque très limité (augmentation, probablement temporaire des bris de barrière) en font une mesure très intéressante en termes de rapport cout/efficience.

On pourrait aussi envisager des ergonomies conducteurs plus complexes, avec un aspect supplémentaire (ouvert/inactif, activé/pré-annonce, activé/annonce fermeture, fermeture).

Avec une durée de clignotement de 5s, le conducteur se comporte à un PN de façon très proche d'un feu tricolore, et le gain sera probablement inexistant. Pour 7s, cela semble possible, mais plus complexe et pas nécessairement plus performant que de réduire à 5s le temps de clignotement. Il ne faut pas non plus oublier que l'ergonomie des PN doit

répondre aux conventions internationales sur le code de la route, qui limitent fortement le champ des possibles.

Concernant la durée d'annonce, allonger ou diminuer la durée d'annonce à trois effets :

— Elle joue sur le nombre de véhicules interférant avec le PN activé.
— Elle joue sur la probabilité d'un véhicule arrêté dans la zone dangereuse de redémarrer et de s'échapper.
— Elle joue sur l'effet Stott, donc sur la probabilité d'une queue qui va interférer avec les véhicules susceptibles de pénétrer dans la zone dangereuse en fin de cycle.

Les deux premiers effets se compensent en grande partie pour les flux routiers faibles, avec un effet Stott négligeable, ce qui explique le comportement « identique » des SAL 2 et SAL 4 pour les flux de véhicules faibles.

À l'inverse, pour des flux de véhicules élevés, le délai d'initiation des accidents change comme le montre notre évaluation de la probabilité conditionnelle du délai d'initiation d'un accident (cf. figure 98), en fonction du flux de véhicules, pour des annonces de 25 et 35s. À noter que si les SAL 4 subissent peu de « chicanes », ce n'est pas parce qu'ils ont quatre barrières, mais parce qu'ils ont 35 ou 45s de temps d'annonce, le temps devient suffisant pour beaucoup de véhicules pris par un incident en début de cycle de s'échapper, et que leur flux de véhicule crée des queues protectrices qui empêchent les accidents d'initiation tardive.

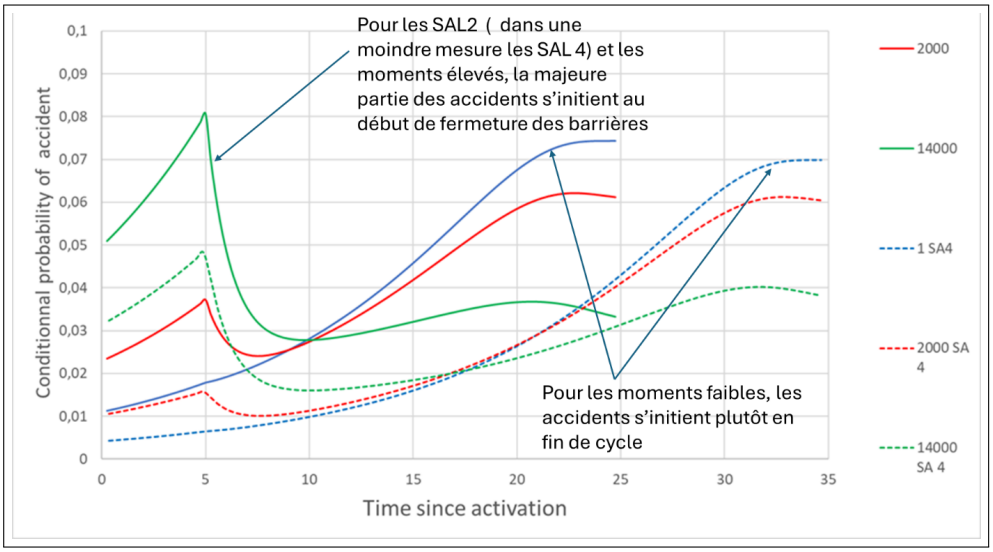



FIGURE 98 – Probabilité conditionnelle du début d'initialisation d'un accident à un PN, en fonction du flux de véhicules et de la durée d'annonce. Modèle générique d'accidentologie aux PN

Comme le montre la figure 98, la séquence d'initialisation d'un accident est très différente entre SAL 2 et SAL 4 : les SAL 2 présentent effectivement un risque élevé au moment de la fermeture des barrières (d'où les observations de « chicanes » fréquentes en cas d'accident) mais ce pic est dû à :

— La fréquence relativement élevée de passages de véhicules peu après 7s.

— La chute d'efficacité du mécanisme d'esquive (plus assez de temps pour s'échapper).

Et non à l'absence de barrières de sortie, comme on peut le voir sur la figure 98.

*Avec les types de PN utilisés actuellement, la politique actuelle d'équipement du RFN est peu éloignée de l'optimum. Elle pourrait encore être améliorée en adoptant de façon plus systématique :*

— *Un clignotement de 5s au lieu de 7s*
— *Conserver les annonces actuelles pour les PN à faibles flux de véhicules (moins de 500 v/j)*
— *Adopter des annonces longues (comme les annonces actuelles à $V > 140$ km/h) pour les PN à flux de véhicules plus élevés*
— *Des PN à quatre barrières et jupes (calfeutrement de la voie et jupes sous barrières, voire même warning box diffusant un message d'alerte en cas d'intrusion de mode doux en cas de flux de modes doux élevés).*

*Cependant, ces améliorations resteraient marginales avec une réduction inférieure à 8%. Pour obtenir des gains plus importants, il reste deux autres pistes :*

1. *L'amélioration de l'ergonomie routière (à la fois en travaillant le plan de circulation et l'aspect remarquabilité du PN).*
2. *L'introduction de nouveaux types de PN (Normalement fermés/ouvert à la demande, DOPN, EGDM).*

## 7.6 D'autres pistes d'optimisation des PN : lutter contre la cécité d'inattention

D'où viennent les différences de taux d'accidents aux PN entre les différents pays Européens et le Japon ? on peut énoncer quelques hypothèses :

— Tout d'abord, le taux d'accident est très différent entre les PN avec barrières, les PN sans barrières, voire sans feux et les PN avec feux, barrières, détecteur d'obstacles et franchissement conditionnel. Et la proportion entre ces différents types est très variable en Europe.
— La cécité d'inattention est le mode dominant d'accident, mais elle peut varier fortement en fonction de l'environnement routier : un environnement complexe, avec plusieurs risques « en concurrence », notamment des risques moins graves, mais plus fréquents que le risque PN peut augmenter fortement le risque. Or, la répartition de responsabilité des PN entre route et fer est très variable en Europe, et plus la route est impliquée, plus l'aspect « routier » des PN va être pris en compte.

Dans la suite de la thèse, on verra que les détecteurs d'obstacles permettent de réduire de l'ordre de 20 à 40 % le risque lié à la cécité d'inattention, et que, moyennant des annonces suffisamment longues, de quasiment 100% du risque d'imprudence /erreur de conduite.

De l'autre côté, les passages à niveau passifs, à croix de Saint-André présentent à la fois un risque d'imprudence/erreur de conduite très élevé (à cause de l'illusion de Leibowitz) et

une très faible «remarquabilité» (pas de feux clignotants, pas de barrières mobiles entrant dans le champ visuel central du conducteur), favorisant la cécité d'inattention.

Une grande partie des différences de taux d'accidents en Europe peut s'expliquer par cette répartition. Notamment, le cas du Royaume-Uni, qui a à la fois de nombreux PN gardés, des PN « user worked Crossings » et peu ou pas de PN à croix de Saint-André, ou l'Allemagne, avec une proportion importante de PN gardés.

Cela n'explique pas tout cependant, et notamment pas le cas des pays scandinaves, avec un taux d'accident relativement faible, malgré un taux important de PN non gardés ou peu équipés.

Mais la cécité d'inattention, comme on a pu le voir plus haut, est un problème complexe, avec plusieurs mécanismes en synergie :

- La cécité au changement.
- La pression sociale : sévérité des sanctions, volume d'information sur la sécurité auprès du public, qui semble augmenter l'attention aux dangers.
- L'environnement complexe, qui fait qu'on porte son attention sur un autre point. ou l'environnement trop simple, qui éteint la méfiance et réduit l'attention au danger.
- L'anticipation que le PN n'est « jamais fermé », qui allonge fortement le temps de réaction au danger.

*Dans le cas des pays scandinaves, la pression sociale est très élevée, avec des sanctions vis-à-vis du non-respect de la réglementation routière très sévères, ce qui semble renforcer l'attention vis-à-vis des dangers routiers, y compris les PN, et dissuader certains conducteurs fatigués ou intoxiqués de prendre la route. Il ne faut donc pas oublier les solutions non techniques : une amende proportionnelle au revenu comme en Norvège, semble réduire fortement le risque aux PN et le risque routier en général.*

### 7.6.1 Feux fixes ou feux clignotants ?

Dans les années 90, nos collègues allemands ont remplacé, sur leurs passages à niveau, les feux clignotants par des feux bicolores fixes. L'idée était que les conducteurs routiers sont peu familiers avec les feux clignotants, et qu'ils les respectaient donc moins que les feux tricolores routiers.

Il ne semble pas y avoir eu non plus d'évaluation scientifique de l'affirmation « les feux fixes sont mieux respectés que les feux clignotants » : en réalité, comme on l'a vu plus haut, la réponse du conducteur semble identique, à l'adaptation à la durée et à la fréquence d'activation du feu jaune ou clignotant près. Il semblerait d'ailleurs que l'étude originale (ERKE et WIMBER 1980) n'était pas très conclusive.

De même, la comparaison de l'accidentologie aux PN allemands ne montre pas de discontinuité ni même de changement dans la période considérée.

On verra aussi plus loin que les statistiques d'accidents des assureurs allemands sont aussi cohérentes avec une différence d'efficacité négligeable entre feux fixes et clignotants.

Cependant, si l'on a eu la malchance de cligner des yeux ou de regarder ailleurs au moment du changement du feu, le risque est plus grand de ne pas le remarquer qu'avec un feu clignotant.

La seule étude comparative sur feux clignotants/feux à éclats (figure 99) a été faite en Australie et publiée par des chercheurs de Monash University (Lenné et al. 2011).

Elle porte malheureusement sur un tout petit nombre de conducteurs et sur des tests sur simulateurs (donc un échantillon non représentatif des utilisateurs de passage à niveau), mais elle pointe vers un respect plus grand des feux clignotants que des feux routiers fixes, ce qui serait cohérent avec la littérature ergonomique.

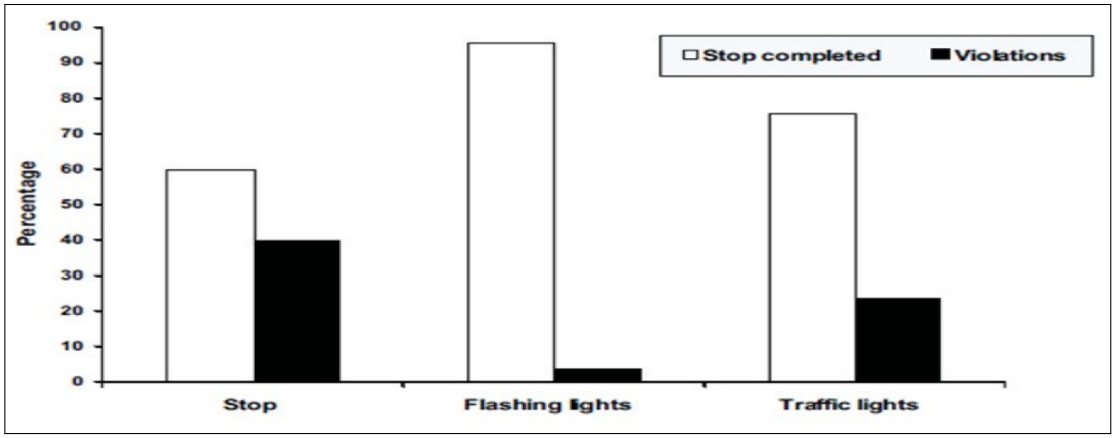



Figure 99 – (Lenné et al. 2011) « Driver behaviour at rail level crossings »

Toutes ces constatations sont cohérentes avec notre modélisation, car le conducteur routier est effectivement moins familier avec le PN qu'avec le feu tricolore, et assimile le PN « à 3 aspects » à un feu tricolore, en adaptant son comportement aux durées de cycles différentes. Remplacer « simplement » les feux clignotants par des feux bicolores fixes a très peu de chances de modifier cette interprétation, mais pourrait augmenter le risque de cécité au changement (même si l'expérience allemande, ou du moins notre interprétation du REX des assureurs semble monter que l'effet est faible), contrairement à l'étude de (Lenné et al. 2011).

Cependant, il y a des cas où installer des feux tricolores peut être judicieux, en les utilisant comme des feux « normaux » de protection des carrefours (pour que le rythme de changement soit suffisamment régulier pour ne pas favoriser la cécité d'inattention), mais en les synchronisant avec les fermetures du passage à niveau (pour qu'ils réduisent le risque de franchissement intempestif par un conducteur n'ayant pas remarqué le PN activé).

C'est notamment le cas lorsqu'il y a des voiries parallèles, avec faible visibilité ou sans visibilité en vision centrale des R24, sur des lignes ferroviaires à trafic faible et modéré, et où, rencontrer un feu tricolore régulièrement au rouge, protégerait à la fois le croisement avec la route perpendiculaire menant au passage à niveau, et réduirait le risque de cécité d'inattention.

*Mais il faut que ces feux tricolores aient une logique vis-à-vis des carrefours, sinon ils ne seront pas respectés.*

En résumé :

— Les feux clignotants (qui sont moins sensibles au risque de cécité de changement) semblent en général à préférer aux feux bicolores fixes, même si l'on manque de données concluantes.
— Il pourrait parfois être utile d'utiliser des feux tricolores en complément des feux de PN, notamment lorsqu'il y a un ou des carrefours proches du passage à niveau, que le moment correspondant à ces véhicules provenant des voiries parallèles est faible, donc avec un gros risque de cécité d'inattention « par apprentissage de PN toujours ouvert » : ce qu'on perd en cécité de changement est probablement plus faible que le gain en cécité d'inattention proprement dit (l'exemple allemand sous-entend que la cécité de changement est minoritaire par rapport aux autres causes de cécité d'inattention).
— *Cependant, il faut que cette installation ait un minimum de justification routière, notamment de régulation et de protection des flux entre les rues parallèles et la rue perpendiculaire qui conduit au passage à niveau, et que les feux routiers soient synchronisés avec le PN pour que les feux soient respectés.*

### 7.6.2 Feux à éclats et R24 multiples ?

On a remarqué plus haut que, même dans le cas où la cécité d'inattention était causée par une focalisation sur un autre point que le passage à niveau, il était possible de « rattraper » le problème si le signal de changement apparaissait dans la zone d'attention.

En pratique, cela pourrait se traduire par deux recommandations :

— *Simplifier au maximum l'environnement du passage à niveau* , en éliminant, sécurisant, simplifiant tout ce qui peut attirer l'attention du conducteur autre que le passage à niveau : éviter les tourne-à-gauche, les séparateurs de chaussée (cf. Millas. De plus, ils sont là pour éviter des chicanes de modes motorisés que l'on n'a jamais observé en fonctionnement normal du passage à niveau), concevoir les plans de circulation pour éviter les conflits, limiter les publicités. Cela vaut aussi pour les distractions temporaires : Événements festifs à proximité du PN, travaux à proximité du PN (Il vaut mieux fermer le passage à niveau que d'exploiter en Alternat la route à proximité du PN).
— *Mettre, comme au Japon (figure 100) suffisamment de signaux lumineux (et/ou réduire la VMA comme en Allemagne) pour rendre plus probable qu'il y en ait au moins un, pendant*

*7s, dans le champ central de vision d'un conducteur et rendre le changement de signal plus marqué (un feu « à éclat », comme ceux des véhicules de secours, plutôt qu'un feu clignotant).*

FIGURE 100 – Arbre de Noël » de feux clignotants sur passage à niveau, ligne (LFDT) CHUO central, réseau de JR-CENTRAL Tokai, Photo O. Cazier

### 7.6.3 Visibilité des barrières, barrières hautes ou multiples, barrières à haute visibilité (Y compris radars/lidars frontaux, etc.)

On a vu un peu plus haut que les réseaux Scandinaves avaient des taux d'accidents relativement faibles compte tenu de leur équipement en PN non gardés et non barrières.

Une partie de cette performance s'explique probablement par la pression sociale, mais les barrières massives (en bois, voir figure 101) des réseaux suédois et Norvégiens sont aussi très visibles à une distance considérable, bien situées dans le champ de vision du conducteur quand elles sont abaissées, etc.

FIGURE 101 – Barrières PN. Réseau ferroviaire suédois. Outre la visibilité de ces barrières, leur aspect massif peut aussi dissuader l'automobiliste de franchir le PN un peu tard (photo O. Cazier 2013).

Les barrières des PN japonais sont, contrairement à celle des PN scandinaves, relativement discrètes. En revanche, lorsqu'il y a une fréquentation poids lourds /transports en commun importante, ou une pente importante avant le PN, les PN à quatre demi-barrières sont remplacés par des PN à « 6 ½ barrières », les barrières supplémentaires étant placées à bonne hauteur pour être dans le champ de vision du conducteur d'autobus ou de camion (cf. figure 102).

### 7.6.4 La nécessaire adaptation aux ADAS (Advanced Driver assistance systems)

Depuis quelques années, les systèmes d'assistance électronique à la conduite se sont multipliés, avec des résultats plus ou moins probants en termes de sécurité.

Parmi les ADAS qui peuvent avoir un impact, figure la détection automatique d'obstacles sur la trajectoire et le déclenchement automatique d'un freinage d'urgence.

À l'heure actuelle, la signature radar ou visuelle de nos barrières semble insuffisante pour déclencher de façon sûre le freinage d'urgence (FU) du véhicule routier.

*Les réflexions sur la visibilité des barrières et du PN active doivent tenir compte de la sensibilité des ADAS. L'impact d'une généralisation des ADAS et leur synergie avec d'autres dispositions sera examinée plus loin.*

FIGURE 102 – Réseau ferroviaire japonais. Mieux que le PN à quatre demi-barrières...le PN à 6 demi-barrières (photo O. Cazier).

### 7.6.5 Efficacité de ces dispositions

On a vu plus haut que la cécité d'inattention était, sous ses diverses formes, la principale cause d'accidents, notamment sur les tout petits passages à niveau.

On a vu aussi que la cécité d'inattention était un phénomène complexe, avec au moins deux manifestations :

— La cécité au changement qui n'a pas de raisons particulières de dépendre du moment, mais qui peut être combattue très efficacement par les dispositions précédentes.

— La cécité d'inattention proprement dite, quand on ne fait pas attention au risque passage à niveau, soit parce qu'on a été conditionné à le trouver toujours ouvert, soit parce qu'on priorise un autre risque. Cette forme est probablement celle qui

est sensible au moment, et la variation du ratio Cd/Ce avec le moment est un argument de plus pour considérer que la cécité de changement est moins importante, comme cause d'accident, que la cécité d'inattention stricto sensu si cette hypothèse est exacte, la cécité de changement représenterait un nombre d'incidents inférieur à 1% du total des incidents de cécité d'inattention pour les passages à niveau à faible moment, et, au mieux, un ordre de grandeur analogue au risque d'accident lié à l'erreur de conduite.

*La forme majeure de la cécité d'inattention correspond à une attention qui ne se focalise pas sur le PN, notamment parce que le conducteur anticipe un PN ouvert.*

Il n'y a pas assez de données sur le comportement du conducteur pour modéliser plus finement l'efficacité de ces dispositifs. On peut toutefois revenir à la distribution du risque, et remarquer que le gain va probablement beaucoup varier suivant l'état d'origine de l'ergonomie routière du passage à niveau :

- Les dispositions précédentes, en augmentant la possibilité que le signal d'activation du PN soit dans la zone d'attention, en rendant le signal plus visible, pourraient réduire le risque. Mais elles seraient moins efficaces s'il s'agit, non pas d'une attention détournée sur un objet, mais sur un sujet («daydreaming»). Il est donc vraisemblable qu'elles auront une efficacité limitée, mais qui pourrait en moyenne être significative.
- Si l'on part d'un passage à niveau dont l'ergonomie routière est abominable (rues parallèles aux PN avec plan de circulation inadapté, visibilité des feux clignotants essentiellement sur la voirie directe, environnement encombré de distractions, etc ou, à l'inverse, trop simple, une grande ligne droite donnant sur une ligne secondaire peu visible), le gain peut être important, le risque divisé par un facteur deux à 5, voire davantage.
- À l'inverse, si l'ergonomie routière d'origine du passage à niveau était déjà correcte, le gain serait beaucoup plus limité.

Malheureusement, le modèle sous sa forme actuelle ne permet pas une évaluation plus précise. Cependant, en fin de thèse, il y aura une discussion sur les évolutions possibles.

# Chapitre 8

# Exemple n°3 d'utilisation du modèle simplifié : évaluer des innovations

## Table des matières


8.1 Passage à niveau « normalement fermé ? » . . . . . 175

8.2 Retour du PN gardé par un robot . . . . . 180

8.3 Intégration « classique » d'un DOPN . . . . . 183

8.3.1 Exemple de PN en Suède : PN à franchissement conditionnel avec condition de bonne fermeture et d'absence d'obstacle . . . . . 183

8.3.2 Comment adapter un détecteur d'obstacle à un PN à franchissement conditionnel . . . . . 185

8.3.3 Adapter un détecteur d'obstacle sur des PN qui ne sont pas à franchissement conditionnel . . . . . 185

8.3.4 Adapter un détecteur d'obstacle sur des PN qui ne sont pas à franchissement conditionnel. L'exemple de l'Italie . . . . . 189

8.4 Estimation de l'efficacité des détecteurs d'obstacles . . . . . 189

8.4.1 Mécanicien ferroviaire comme détecteur d'obstacle . . . . . 189

8.4.2 Efficacité des DOPN « classiques » . . . . . 190

8.4.3 Efficacité et domaines d'emploi des PN équipés de DOPN . . . . . 195

8.4.4 Efficacité d'une sécurisation du réseau avec des PN normalement fermés . . . . . 200

8.4.5 PN « Exit Gate Dynamic Mode » (EGDM) aux USA . . . . . 200

8.4.6 Efficacité de la combinaison NFOD + DOPN sur une ligne à 140 et des PN représentatifs des PN du réseau pour des trains de type AUT 140 1300 et MA 100 . . . . . 207

8.5 Ergonomie de conduite en cas d'alarme : comment maximiser la réduction de risque sans obérer la régularité. . . . . 208

8.5.1 DOPN et mécanisme d'esquive . . . . . 208

8.5.2 Intérêt d'une condition de vitesse et danger de règles visant à trop réduire le nombre de « fausses alarmes » . . . . . 209

8.5.3 Fonction de transfert incidents/accidents pour les EGDM et les DOPN « classiques »et l'efficacité du mécanisme d'esquive . . . . . 211

8.5.4 Intérêt d'une ergonomie de conduite adaptée, impact sur la sécurité d'une alarme au train « permissive » . . . . . 211

## 8.1 Passage à niveau « normalement fermé ? »

*Indépendamment des considérations ci-dessus, on pourrait imaginer des conceptions de PN, dans le cas de faibles circulations routières, mieux adaptées que nos PN actuels.*

Récemment, dans le cadre du programme ALEX, nos collègues suédois ont développé un passage à niveau « normalement fermé, ouvert à la demande » (cf. Figure 103).

En Suède, il est considéré que ces PN sont adaptées aux voiries routières « réservées aux riverains », et l'ouverture du PN n'est possible qu'avec une clé fournie par TRV aux riverains.

Mais au Royaume-Uni, ce type de passage est aussi en cours de développement (évolution récente des UWC, avec motorisation et détection des trains), et est ouvert à tous publics.

FIGURE 103 – Expérimentation d'un passage à niveau « normalement fermé » à Hammerby, Suède (Source TRV Ole Mornell)

Dans les versions ultérieures « de série », le signal routier (analogue à nos R24), peu adapté aux PN normalement fermés, a été remplacé par un feu blanc routier, qui rappelle aux utilisateurs l'existence du PN et le rend visible de loin même si on a pu constater par ailleurs que les feux fixes sont peu efficaces vis-à-vis de la cécité d'inattention.

D'après certaines sources (JR EAST notamment) des feux blancs bleutés pourraient être plus efficaces, compte tenu d'associations « inconscientes » bleu et police, danger.

Ce type de passage à niveau, qui pourrait être implémenté sur des voiries avec une circulation routière faible, remplacerait le feedback négatif des conducteurs (ce PN est tou-

FIGURE 104 – Réseau ferroviaire suédois – PN Normalement fermé vu de la voie, avec sa configuration « définitive » : deux feux routiers blancs et suppression des feux traditionnels routiers des PN – photo TRV.

jours ouvert, il n'est pas un danger) par un feedback positif (Attention, je dois aarrêter à la barrière, attendre qu'elle s'ouvre, et la franchir) et il pourrait réduire de façon dramatique le risque lié à la cécité d'inattention, et le risque tout court.

Cette disposition pourrait être très efficace pour supprimer presque complètement le risque lié à la cécité d'inattention sous toutes ses formes, qui est très dominant sur les PN à flux routier faible.

Dans le système ALEX, l'ouverture se produit à la demande, en tournant une clé puis en appuyant sur le bouton d'autorisation (Ägovägslåda) et est réservée aux riverains. Dans d'autres pays, les systèmes existants ou en cours de développement sont utilisables à tous publics et peuvent utiliser des boutons poussoirs pour demander l'autorisation et /ou des boucles magnétiques/ inductives pour détecter des véhicules.

Pour évaluer l'ordre de grandeur de l'efficacité d'un tel système, on pourrait utiliser notre modèle, en le modifiant légèrement.

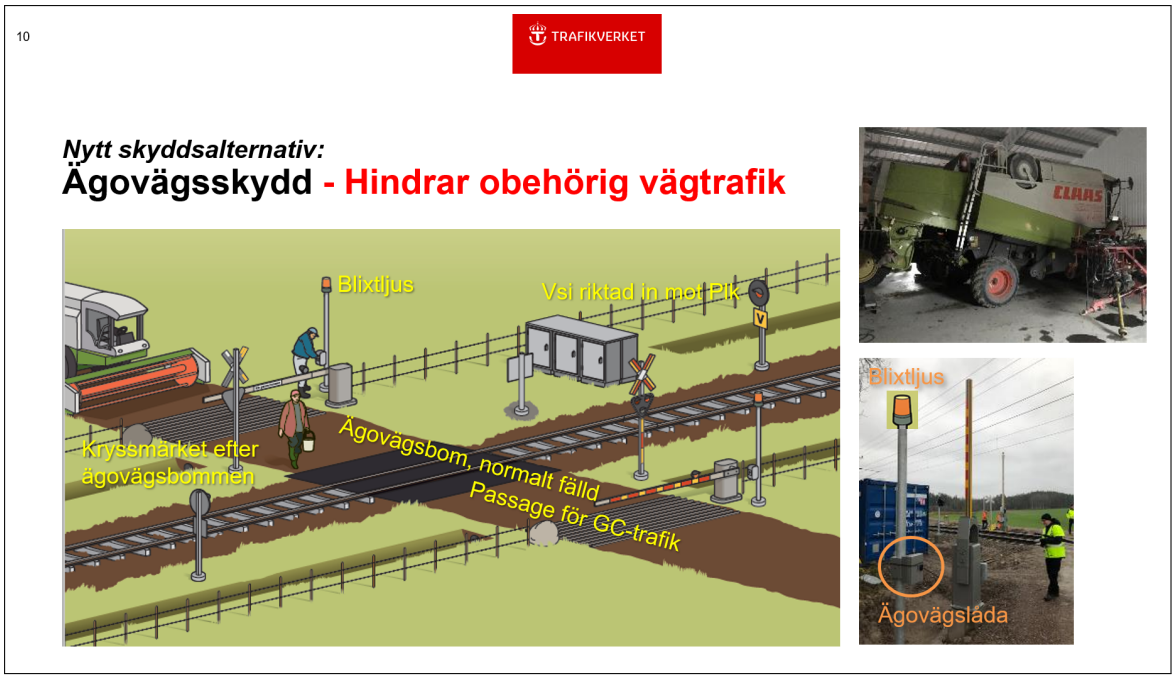



FIGURE 105 – Passage à niveau «normalement fermé» développé dans le cadre du projet ALEX par Trafikverket

À l'heure actuelle, l'« apprentissage » du risque au PN est proportionnel à une fonction puissance du moment, en fait, à une fonction puissance de la probabilité des « rencontres » entre train et véhicules.

Remplacer la rencontre entre train et véhicule par une rencontre train / barrière peut changer le mécanisme d'apprentissage, mais il existe plusieurs raisons de penser que cela ne sera pas le cas, où, l'écart sera positif :

- Malgré des ergonomies un peu différentes, la réponse d'apprentissage des conducteurs semble très proche pour les SAL 2 français, les SAL 4, les SAL 4 japonais.
- Comme l'a suggéré Beccaria, la réponse au risque des humains est plus sensible à la fréquence et à l'échéance du risque qu'à sa gravité.
- Les gains récents (depuis les 30 dernières années) en matière de sécurité routière, sont en grande partie basés sur ce principe : introduire des risques « mineurs » : obstacles sur la chaussée pour faire ralentir les véhicules et réduire la fréquence et la gravité des accidents routiers [1].

1. Cela fonctionne très bien pour les accidents routiers, car la gravité et la fréquence des accidents sont très liés à la vitesse des véhicules (Loi de Nillson). L'application aux accidents de passage à niveau nécessite plus qu'une simple transposition, car malheureusement, le risque et la fréquence semblent beaucoup moins sensibles à la vitesse.
Une transcription aux passages à niveau des idées ayant réussi en sécurité routière pourrait donc emprunter deux pistes :
- Réduire la cécité d'inattention en augmentant la « remarquabilité » du passage à niveau (l'objet de ce chapitre)
- Augmenter le risque subjectif perçu du passage à niveau (qui fera l'objet d'une discussion dans un des chapitres suivants)

Si l'on admet que le mécanisme d'apprentissage demeure valide, alors on peut évaluer la probabilité de rencontre en remarquant :

- Qu'un train reste environ 45s dans la zone du passage à niveau, et que la probabilité de rencontre par les véhicules du PN traditionnel activé est donc proportionnelle à 45 VT.
- Que si l'on imagine que les véhicules circulent significativement sur 8 h, la probabilité de rencontre du PN « normalement fermé » est proportionnelle à $8 \times 3600V$ (ne dépends plus de $T$).
- Qu'en termes d'erreur de conduite, la durée d'annonce « équivalente » d'un PN normalement fermé devrait être de 60s [2] pour tenir compte du temps de manœuvre des barrières, du temps nécessaire pour le redémarrage et la traversée d'un véhicule agricole lent et lourd, du temps de fermeture et du risque d'éventuels véhicules croiseurs profitant de l'ouverture du passage à niveau par un premier véhicule.
- Qu'un ordre de grandeur de l'efficacité de ce type de système pourrait donc être comparable à celui d'un passage à niveau avec une annonce de 60s, une fréquentation de $T$ trains et $V$ véhicules, mais avec un ratio $CD/CE$ calculé avec la fréquentation $\frac{8\times3600\times V}{45\times T\times V}$ soit $\frac{640}{T}$, tout le reste du calcul (sauf le ratio $CD/CE$) étant bien entendu inchangé et calculé avec les flux réels.

Dans ces conditions, le modèle donne une efficacité de réduction qui va essentiellement dépendre du nombre de trains (le taux de cécité d'inattention final ne va plus dépendre du nombre de trains, mais le taux initial du PN de référence en dépend, et le ratio entre les taux d'accident va très peu dépendre des véhicules, car à moins de 100 v/jour, l'effet Stott est faible) mais cette réduction est très élevée pour les nombres de trains faibles.

Cependant, lorsque le taux de véhicules est très faible, il est souvent relativement aisé de supprimer le passage à niveau par détournement ou remembrement, pour des couts assez faibles.

*Le développement, à l'instar des Suédois ou des Britanniques de ce type de Passage à niveau pourrait être très intéressant pour des flux de véhicules faibles ou moyens (entre 1 et 100 par jour), plus difficiles à supprimer, et correspondrait tout à fait aux tendances actuelles de sécurité routière, où il est de moins en moins tabou de faire perdre quelques dizaines de secondes aux automobilistes, si cela améliore fortement, comme c'est le cas ici, leur sécurité.*

Cette évaluation illustre aussi un autre argument de la thèse, les difficultés de l'approche par le retour d'expérience pour des phénomènes rares : avec un accident tous les 2000 ans pour un PN « normalement fermé », dans son domaine d'application probable, il faudrait au minimum de 100 000 années PN d'observation pour valider grossièrement, par le retour d'expérience, les deux courbes d'évaluation qui suivent (cf. figures 106 et 107).

On peut aussi évaluer l'efficacité du PN normalement fermé (figure 108) sur la sous-population de SAL éligibles du réseau (c.-à-d. celle à moins de 100 v/j inclus)

2. 1mn est d'ailleurs le temps minimum retenu par TRV pour ALEX

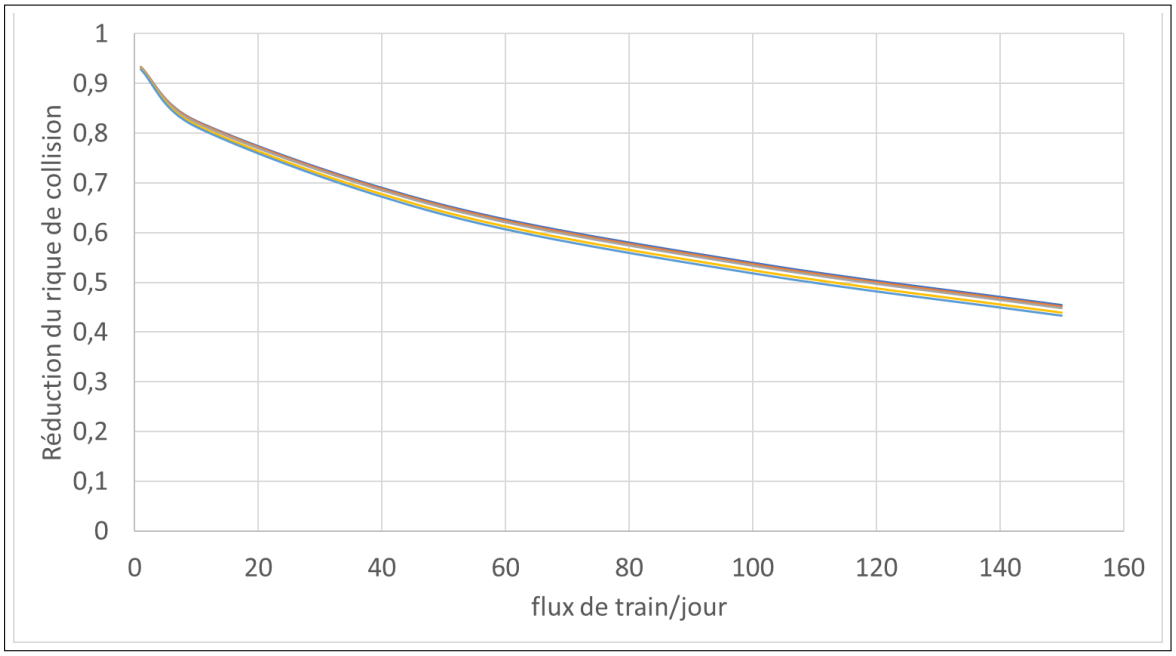



FIGURE 106 – Évaluation de la réduction du risque entre un ON normalement fermé et un SAL2 de référence, AUT 140 300 sur ligne 140 pour 1 et 100trains/j. Modèle générique d'accidentologie aux PNs

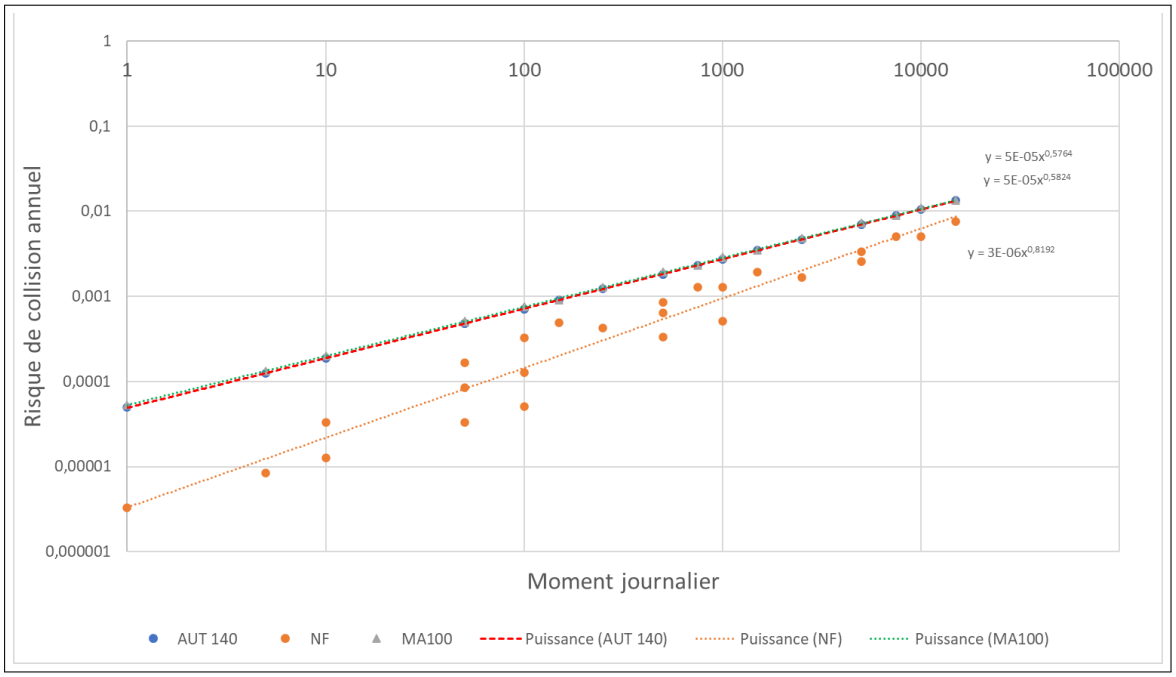



FIGURE 107 – Évaluation du risque absolu de collision entre un PN «normalement fermé» et un SAL 2 classique, en fonction du moment et moins de 100 v/j, Aut 140 300 et MA 100 sur ligne 140. Modèle générique d'accidentologie aux PN.

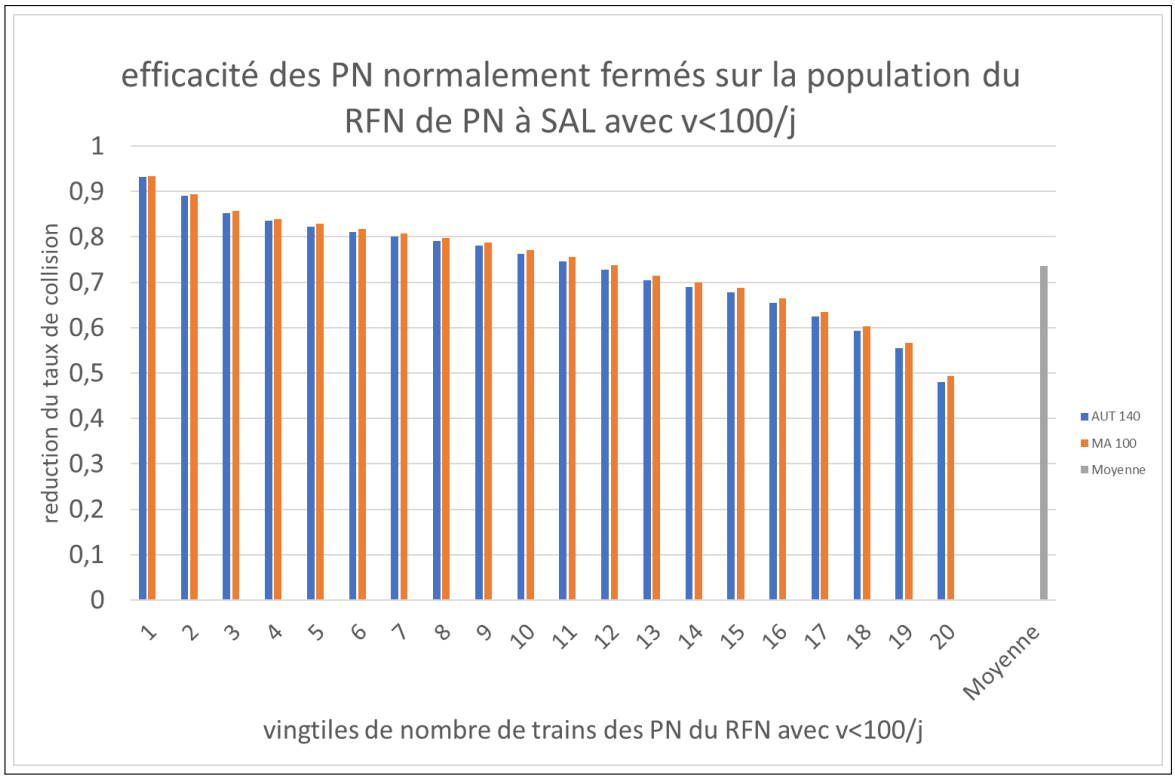



FIGURE 108 – Efficacité du PN normalement fermé sur la sous-population de PN « éligibles » (moins de 100 v/jour). Modèle générique d'accidentologie aux PN

Comme on peut le constater, sur cette sous population de PN, l'efficacité de la transformation du PN à SAL en PN normalement fermé est élevée (entre 93% et un peu moins de 50%), en moyenne sur cette sous-population 74%.

Une autre approche pour confirmer cette efficacité pourrait être de prendre une ligne fret très peu fréquentée et de comparer, sur les PN à croix de Saint-André existants sur cette ligne, l'efficacité d'une automatisation « classique » avec des SAL 2 et d'une automatisation en NFOD (cf. Figure 109).

La « simple » automatisation avec un SAL 2 est déjà très efficace, comme on peut le voir. Mais si au lieu d'un SAL 2, on substitue au PN à croix de Saint-André un PN NFOD, l'efficacité est quasiment identique à celle d'une suppression par remembrement et fréquemment supérieure comme on verra plus loin à celle d'une suppression par détournement.

*En revanche, si les autorités locales acceptent de jouer le jeu, mon expérience personnelle en Normandie est que la suppression par remembrement est la solution la plus efficace en termes de cout/efficience.*

## 8.2 Retour du PN gardé par un robot

Dans le courant de la seconde moitié du 20e siècle, la plupart des réseaux d'Europe, des États-Unis, du Japon ont remplacé leurs passages à niveau gardés par des passages

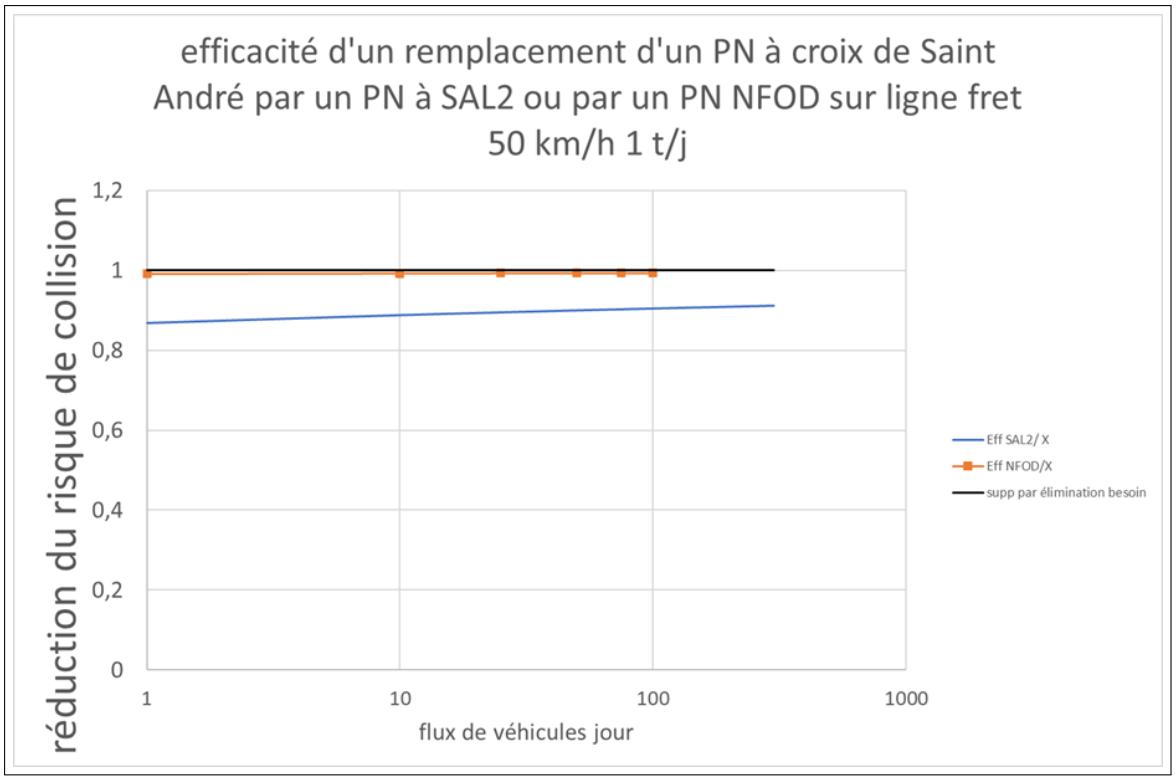



FIGURE 109 – En pratique, sur une ligne «réelle», l'efficacité d'un NFOD sur un PN à croix de Saint-André est très proche de celle de la suppression, mais une suppression par remembrement est souvent plus efficace, car moins coûteuse. Modèle générique d'accidentologie aux PN

à niveau automatiques, et remplacé nombre de passages à niveau à croix de Saint-André par des passages à niveaux automatiques à feux et barrières.

La recherche bibliographique n'a pas permis de retrouver si cette modification avait fait l'objet d'une analyse d'impact sécurité, que ce soit en France ou dans un autre pays, et, en ce qui concerne les motivations de ce changement, elles semblent plutôt avoir été liées :

— Au Lobby Automobile. : que la traversée d'une voie à un PN Gardé impose 60 s d'attente à son automobile, au bénéfice de ce moyen de transport obsolète qu'était le train, était jugé intolérable au temps de la voiture Reine qui tuait 20 000 personnes/an...
— Aux exigences d'économies et de gains de productivité imposées au ferroviaire.

S'il est indéniable que l'automatisation des passages à niveau à croix de Saint-André apporte un gain réel de sécurité, c'est beaucoup moins évident en ce qui concerne la transformation des passages à niveau gardés en passages à niveau automatiques.

Il suffit de regarder la répartition des accidents en Allemagne (figure 110 et 111) ou en Angleterre où il subsiste encore beaucoup de PN gardés par opérateur, souvent par des agents de circulation avec caméra qui sont progressivement remplacés par des détecteurs d'obstacles.

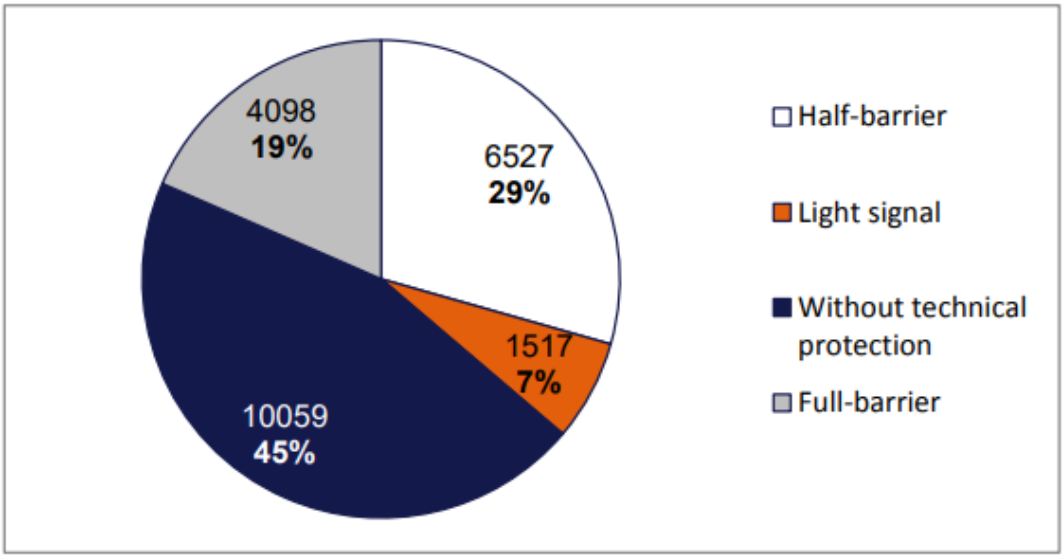



FIGURE 110 – Répartition des types de protection sur les passages à niveau du réseau de la DEUTSCHE BAHN (source DB)

| Criticality of the level crossing | Common protection |
|---|---|
| High | Technical; full-barrier level crossing with an automatic level crossing free detection |
| Medium to high | Technical; light signalling system or light signalling system with a half-barrier |
| Low | Without technical system; Signs |

TABLE 9 – Critère d'équipement des passages à niveau sur le réseau DB : les PN les plus critiques ont des barrières complètes et un système de détection d'obstacles (par opérateur ou DOPN)

On remarque que les passages à niveau les plus critiques, protégées par des barrières complètes ou quatre demi-barrières, et avec une détection d'obstacles humaine, où de plus en plus automatique, n'ont quasiment pas d'accident, malgré leur criticité.

— Pour 6 295 Passages à niveau de *criticité moyenne*, avec feux et demi-barrières, *21 collisions*
— Pour 4 098 passages à niveau de *criticité élevée*, équipés de barrières complètes ou de quatre demi-barrières, avec annonce de 60s et détection d'obstacles par gardien ou détecteur automatique, *1 Collision*.

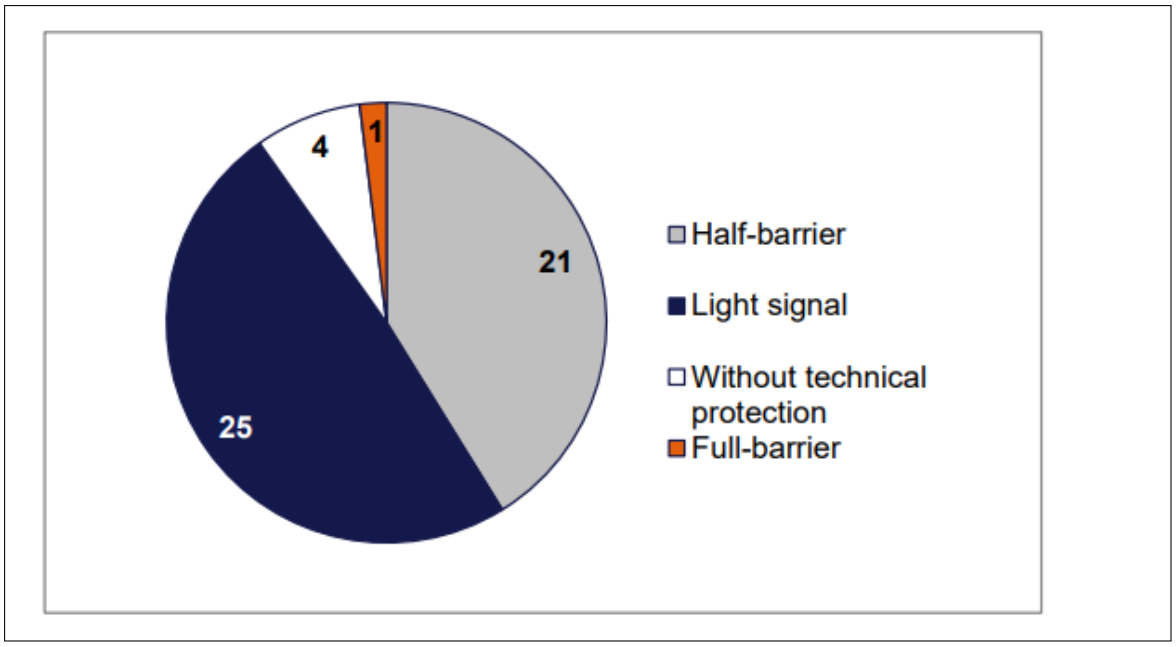



FIGURE 111 – Répartition des collisions sur les passages à niveau de la DEUTSCHE BAHN (Source DB)

*Si la criticité était identique entre les PN à demi-barrières et les PN à quatre demi-barrières gardés ou avec DOPN, le risque serait divisé par 14 grâce au garde ou au DOPN.*

Les retours d'expérience Britannique et Suédois le confirment aussi (voir Traduction partielle du retour d'expérience Suédois de 2004 en Annexe) : un passage à niveau, qu'il soit gardé par un humain ou par un « robot », est beaucoup moins accidentogène qu'un passage à niveau traditionnel à feux et barrières, *au moins pour les PN critiques à forte fréquentation.*

Pour citer le Rex suédois :

> *« Dans ces collisions, personne n'a été blessé. Il semble que les passages à niveau équipés de détecteurs d'obstacles soient en grande partie exempts d'accidents »* (OLE 2005)

La durée d'annonce des PN Suédois, Suisses ou allemands est de l'ordre de 60s pour les PN avec quatre demi-barrières, mais cette durée est liée au choix du franchissement conditionnel, et non directement à la présence du DOPN. Cependant, comme dit plus haut à propos des passages à niveau normalement fermés, il est de moins en moins tabou, aujourd'hui, de faire perdre quelques secondes à l'automobiliste pour améliorer sa sécurité.

## 8.3 Intégration « classique » d'un DOPN

### 8.3.1 Exemple de PN en Suède : PN à franchissement conditionnel avec condition de bonne fermeture et d'absence d'obstacle.

Le réseau de Trafikverket comportait, en 2021, 6519 passages à niveau, répartis comme suit :

— 22% à quatre demi-barrières

— 14% à deux demi-barrières
— 8% à feux (progressivement remplacés par des deux demi-barrières ?)
— 14% de PN à Stop
— 42% de PN « sans protection »

FIGURE 112 – Un passage à niveau suédois sur ligne à V > 160, équipé d'un détecteur d'obstacles (boucle magnétique détectant uniquement les véhicules), pas de détection des modes doux et d'un portique limitant le gabarit PL. (photo TRV 2006)

Comme tous les passages à niveau de culture ferroviaire « germanique » (Scandinavie, Allemagne, Autriche, Suisse, etc.), ces passages à niveau sont à franchissement conditionnel, avec deux possibilités suivant le pays, ou parfois le type de PN :

— Le PN est protégé par un signal NF (comparable à un carré) commandé par la signalisation, ou par un agent de circulation (dans le cas de PN surveillés et gardés à distance), le signal n'étant ouvert que si l'autotest du PN a confirmé le bon fonctionnement et où le garde (ou le DOPN) a vérifié, par caméra, l'absence d'obstacle.
— Le PN est protégé par un feu, souvent à un seul aspect, confirmant par son allumage le bon fonctionnement du PN, comme pour les « SAL 2 FC » allemands, avec condition d'autotest réussi :

Pour lever toute ambiguïté, rappelons que, contrairement à une croyance répandue en France, les trains sont prioritaires aux PN à franchissement conditionnel.

Mais, franchissement conditionnel veut simplement dire qu'une condition doit être remplie pour que le PN puisse être franchi en vitesse : les PN de gare à rétention d'annonce sont des PN à franchissement conditionnels.

Pour en revenir aux PN suédois, une centaine ont été équipés, depuis les années 70 pour certains, de détecteurs d'obstacles par boucles inductives.

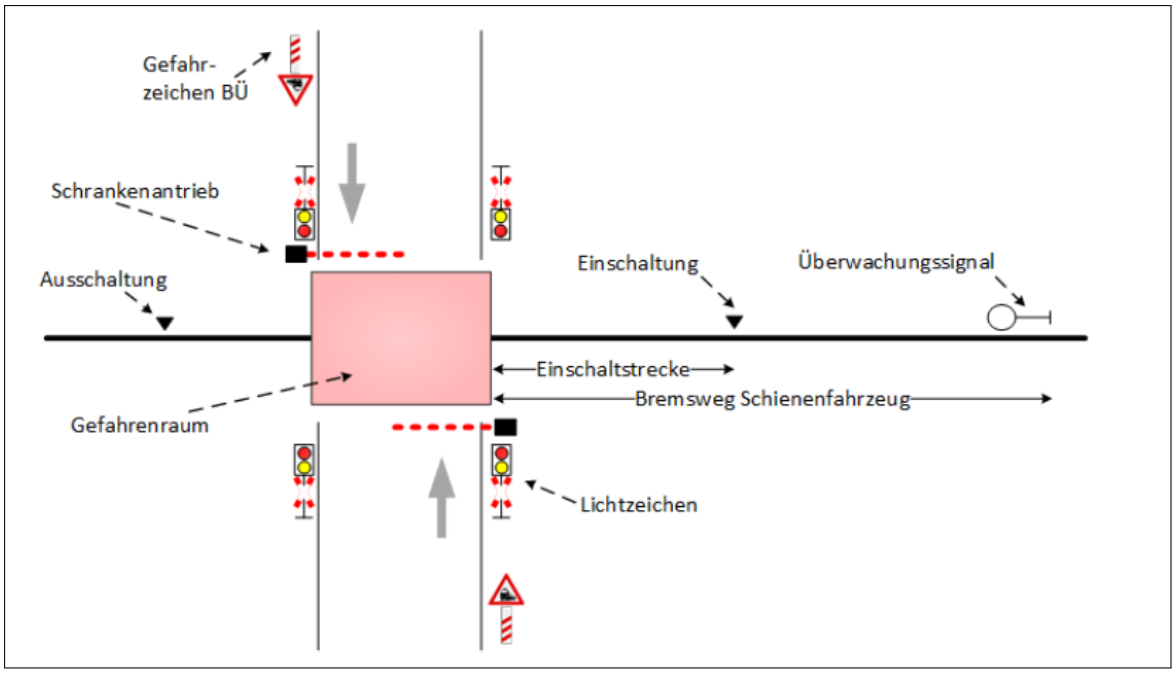



FIGURE 113 – Exemple de PN à demi-barrières à franchissement conditionnel (source EBA)

Compte tenu de l'obsolescence technique, TRV a lancé en 2013 un programme de développement d'un nouveau DOPN basé sur radar centimétrique, qui aurait été installé systématiquement sur les PN à risques, mais malheureusement, le développement a échoué (le radar étant plus sensible que le Lidar aux intempéries)

TRV consulte actuellement d'autres fournisseurs potentiels.

### 8.3.2 Comment adapter un détecteur d'obstacle à un PN à franchissement conditionnel

L'adaptation des PN à franchissement conditionnel aux détecteurs d'obstacles est « naturelle » : on « ajoute » aux conditions déjà existantes la condition « absence de détection d'obstacle » et on applique les règles de signalisation du pays.

### 8.3.3 Adapter un détecteur d'obstacle sur des PN qui ne sont pas à franchissement conditionnel. L'exemple du Japon.

Par contre, une des différences importantes entre le Japon et la France est la grande diversité du système japonais, qui compte 6 grands réseaux héritiers de l'ancienne entreprise JNR après la réforme de 1987 (JR EAST, Central, West, Kyushu, Shikoku, Hokkaido), quelques grands réseaux privés (Odakyu, Meitetsu, Kintetsu..) et une foule de petits opérateurs locaux de voyageurs, souvent filiales des grands groupes ou parfois de type partenariat public/ privé.

Une grande partie de ces réseaux ont équipé leurs PN préoccupants de détecteurs d'obstacles. Cependant, même si la loi japonaise impose une certaine interopérabilité entre

Le chemin de fer s'est développé au Japon à partir des années 1860, mais la tradition ferroviaire japonaise présente de nombreux points communs avec les États-Unis ou la France, et notamment la rareté des PN à Franchissement conditionnels, la plupart des PN japonais, avant les détecteurs d'obstacles, n'avaient pas de protection coté rail.

FIGURE 114 – Signal à double aspect : Croix jaune et « agrès spécial » pentagonal sur une LFDT (3e réseau) privée japonaise (photo O. Cazier)

réseaux, il existe au Japon plusieurs solutions quant à l'intégration des détecteurs d'obstacles et aux règles de conduite et d'ergonomie de conduite associées, qui se traduisent notamment par des ergonomies de conduites un peu différentes.

Tout d'abord, le « signal » utilisé pour donner l'alarme au train ne semble pas être « juridiquement » un signal, mais plutôt une sorte d'agrès, un peu l'équivalent d'une torche à flamme rouge[3].

En tout cas, il ne semble pas figurer dans les catalogues de signaux de l'ordonnance japonaise mais est nommé (littéralement « avertissement d'obstacle » et traduit comme « torche » ou « signal spécial » dans les documents anglais des JR.

Ce signal existe sous deux formes :

— Un signal LED intense, rouge et clignotant (figure 116), qui remplace les anciennes torches pyrométriques utilisées par les JR. Sous cette torche figure une inscription qui définit le type de danger protégé, et c'est en fonction du danger que les règlements de sécurité de l'opérateur considèrent que le signal est franchissable en marche à vue ou non : depuis le tremblement de terre du Kanto en 1923, les Japonais évitent d'immobiliser un train hors d'une zone « sure ».
— Un signal pentagonal avec cinq feux « tournants », en général couplé à une croix jaune (cf. figure 114), mais pas toujours sur certains réseaux (figure 115).

Le signal pentagonal seul est aussi utilisé comme répétition d'alarme PN à distance quand la visibilité du signal pentagonal au pied du PN est insuffisante.

On voit qu'au Japon il y a plusieurs combinaisons possibles :

3. Il est possible que cette solution « agrès » ait été retenue pour éviter la modification de l'ordonnance sur les chemins de fer, qui aurait nécessité une procédure très lourde. (JRE)

La croix jaune, allumée, signale le bon fonctionnement du passage à niveau. Le signal pentagonal est, « juridiquement » considéré comme une torche et non comme un signal, et s'allume pour indiquer un dysfonctionnement du PN : autotest défaillant (barrière rompue, raté de fermeture) ou une présence d'obstacle.

FIGURE 115 – D'autres réseaux, surtout sur des LFDT, utilisent uniquement la torche « pentagonale » pour indiquer le dysfonctionnement du PN (photo O. Cazier, Ligne de Gotemba – Japon)

FIGURE 116 – Agrès spécial de type torche – Japon : ligne Tokaïdo classique – photo O. Cazier

— Torche à Led, éventuellement répétée si problème de visibilité.
— Signal pentagonal tournant, éventuellement répété si problème de visibilité.
— Signal pentagonal tournant et croix jaune, signal pentagonal éventuellement répété si problème de visibilité.

La règle générale :

— En cas d'alarme obstacle PN, freinage vigoureux et passage en marche à vue.
— La suite va dépendre de la solution retenue :
  — En cas de double signal (croix jaune et feu pentagonal), le feu pentagonal s'éteint si l'alarme disparaît pendant 2s du DOPN, et si la croix jaune est allumée et le feu pentagonal éteint, le train reprend sa vitesse.
  — En cas de simple signal (torche à LED ou signal pentagonal seul), le train circule en marche à vue jusqu'à la torche à proximité du PN, constate que le PN est libre, franchit le PN en marche prudente, ce qui éteint la torche ou le signal (en fonction de la nature de l'obstacle, la torche est « franchissable » par exemple si elle protège un PN ou non franchissable par exemple si elle protège d'une chute de rocher, et la nature franchissable ou non est indiquée par un panonceau sous la « torche » qui identifie la nature et l'emplacement du danger).

Il y a plusieurs ergonomies de conduites possibles en réponse à une alarme, mais elles ont toutes des points communs :

— *« Le DOPN est une machine à transformer des accidents en fausses alarmes : il vaut mieux concevoir le système pour réduire le plus possible les conséquences d'une alarme plutôt que d'essayer de minimiser les alarmes et de risquer de passer à côté d'un accident. » (Nakajima Yasunori, JRE).*
— Le principe, conformément à la doctrine japonaise, est d'éviter ou de raccourcir au maximum l'arrêt d'un train [4] hors zones sûres depuis le tremblement de terre du Kanto en 1923 ou un train arrêté devant un signal éteint avait été emporté par une coulée de boue avec plusieurs centaines de passagers. L'autre avantage est de rendre « socialement acceptable » l'usage des détecteurs sans prendre de risques de réduire les faux positifs et de créer des faux négatifs et de passer à côté d'un obstacle.

4. Au Japon, on évite les arrêts longs de trains en pleine voie pour plusieurs raisons :
— Le risque catastrophe naturelle si le train n'est pas arrêté à un endroit sur
— Le risque d'avoir des passagers sur les voies, avec soit des longues perturbations du trafic qui fait perdre son attractivité au mode ferroviaire, et rejette les clients sur la route, avec globalement une augmentation des accidents et des décès dus aux transports.

Les autorités de sureté et les réseaux japonais pensent que le risque est plus faible si on reste en marche à vue que si on arrête le train au milieu de nulle part et le taux d'accident ferroviaire au Japon est comparable à celui des meilleurs pays européens, avec une régularité nettement supérieure, et une fréquentation ferroviaire très importante qui réduit la circulation routière et donc les morts sur les routes aussi.

La France avait une pratique analogue jusqu'à une date récente, et l'arrêt systématique en cas d'alarme ne semble pas avoir amélioré la sécurité en pratique, mais il a sérieusement dégradé la régularité, notamment en Banlieue-Nord de Paris. Il semble qu'on soit revenu en arrière au moins en zone dense.

### 8.3.4 Adapter un détecteur d'obstacle sur des PN qui ne sont pas à franchissement conditionnel. L'exemple de l'Italie.

En Italie, un peu comme en France, il y a une distinction entre des PN « de Gare », à quatre barrières et protégés par signaux (l'équivalent de nos PN à rétention d'annonce) et des PN « de campagne », à deux barrières et non protégés par signaux.

Pour permettre l'équipement de ces PN en détecteurs d'obstacles, RFI a défini des signaux de block « à overlay » (figure 117) qui ne renseignent pas sur la présence du train (ce ne sont donc pas des signaux de block stricto sensu) mais qui indiquent l'état du passage à niveau.

Fonctionnellement, ils sont plus proches de la torche, et ne sont utilisables que pour une protection d'un obstacle

Par contre, comme ils ont deux aspects (rouge ou vert) pour le signal de proximité et jaune ou vert (pour le signal d'annonce) ils péjorent moins l'exploitation qu'une simple torche.

## 8.4 Estimation de l'efficacité des détecteurs d'obstacles sur une population de passages à niveau « représentative » des PN du réseau ferré national

### 8.4.1 Mécanicien ferroviaire comme détecteur d'obstacle

Tant que la vitesse de la ligne est suffisamment élevée, elle n'influe pas de façon significative, d'après le modèle, sur le taux de collision.

Cependant, lorsqu'elle descend suffisamment bas pour que la distance de visibilité du PN devienne du même ordre que la distance de freinage, et notamment lorsque le train est en marche à vue (il adapte sa vitesse aux conditions de circulation, sans dépasser 30 km/h), il devient possible que le mécanicien aperçoive un obstacle sur la voie, qu'il freine, et que cela influe sur le taux d'accidents (figure 118).

Cet effet est analogue à celui d'un « détecteur d'obstacle », et comme pour les détecteurs d'obstacles, son effet va être beaucoup plus important pour un train de voyageurs que pour un train de marchandises dont le freinage est lent à s'établir : dans ce cas, le seul impact significatif de la vitesse est l'allongement du délai d'annonce effectif.

Mais il faut aussi signaler que la gravité des chocs est beaucoup plus basse lorsque la vitesse d'impact est égale ou inférieure à 30 km/h

On peut cependant en conclure que si la vitesse des trains influe peu sur le risque de collision dans le cas général, elle est cependant significative au moins dans les deux cas suivants :

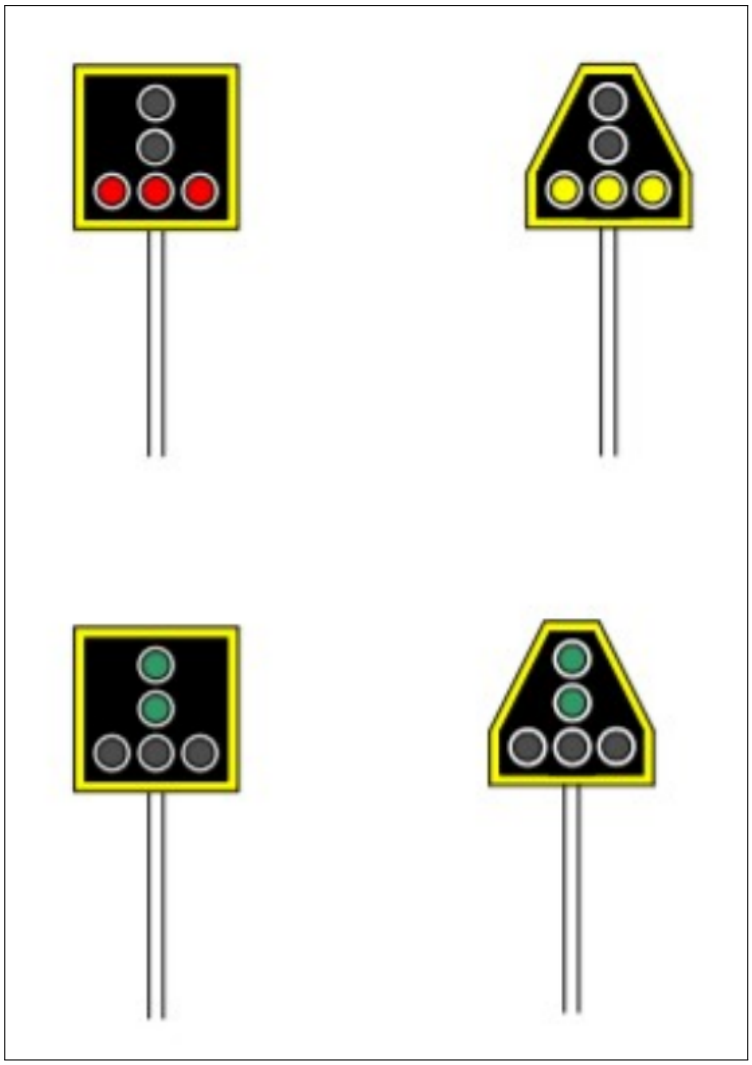


FIGURE 117 – Réseau ferroviaire italien : signaux de block à overlay utilisés pour protéger les PN équipés de détecteurs

— Lorsque le PN est à proximité d'une gare et d'un point d'arrêt, qu'il y a une visibilité raisonnable du PN depuis la ligne/le Point d'arrêt et qu'une proportion significative des trains le franchit à une vitesse inférieure à 50 km/h
— Lorsque le train circule en « marche à vue » à une vitesse inférieure à 30 km/h et « adaptée » au type de ligne et de trains.

S'il faut descendre nettement en dessous de la vitesse de la ligne ou de 30 km/h (dans le cas d'une ligne à 30 km/h) pour réduire les collisions, notamment pour des PN peu fréquentés et peu accidentogènes, la réduction de vitesse entraine une très forte réduction de la gravité des accidents : même si les données sont rares, toutes indiquent qu'en dessous de 25/30 km/h, la probabilité de décès routier est très faible.

### 8.4.2 Efficacité des DOPN « classiques »

Dans tout ce qui suit, sauf mention contraire, le réglage du DOPN et du passage à niveau a été pris à :

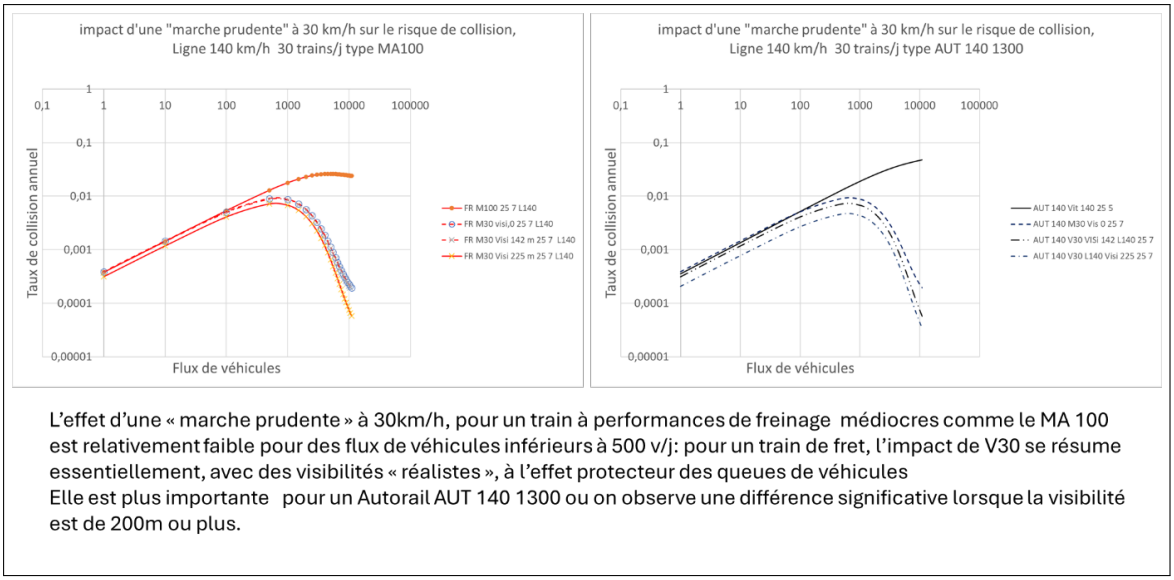



FIGURE 118 – Effet d'une marche prudente à 30km/h sur le risque de collision sur ligne 140km/h à 30 trains/j pour des autorails 140 1300 et des MA 100. Modèle générique d'accidentologie aux PN

- Déclenchement dès l'activation.
- 5s de clignotement avant mouvement des barrières d'entrée, annonce de durée X variable entre 25s et 60s, pas de régulation du temps d'annonce.
- Pendant 11 s, condition de vitesse et temps de réaction du DOPN 4s.
- Ensuite, pas de condition de vitesse et temps de réaction 1 s.
- Noté DOPN X 5 11 4 1 [5]

Le passage à niveau est considéré à plat (mais quand le trafic ferroviaire est « symétrique », la pente/rampe de la voie influe peu)

Enfin, on peut remarquer que si le taux de collision varie de façon assez complexe avec $T$, $V$, l'annonce, le type et les performances de freinage, l'efficacité du DOPN ne dépend pas de $T$.

Le système de référence est le SAL 2 nominal, 25 ou 30s au-dessus de 140, 7s de clignotement

La figure 119 représente l'efficacité des DOPN sur une ligne à 140 km/h, avec des trains de voyageurs de performances de freinage « modestes » (Aut 140 1300) et des trains de marchandises et un freinage de service. C'est donc plutôt une borne basse de l'efficacité des DOPN.

Pour les « petits » flux de véhicules (effet Stott négligeable) l'efficacité va essentiellement dépendre des performances de freinage, et va donc être faible pour les trains de marchandises, et modeste pour des autorails 140 1300. Elle pourrait être beaucoup plus

5. Ce sont des caractéristiques typiques du DOPN IHI testé par la SNCF. D'autres détecteurs ne permettent pas la condition de vitesse et ne sont réellement utilisables que sur des annonces longues.

élevée avec un matériel différent : l'ordre de grandeur de la limite vers V=0 serait de 50% pour un freinage de type tramway en FU contre 10% pour un AUT 140 1300)

À l'inverse, pour les grands flux de véhicule, ce qui domine est la synergie entre l'effet Stott (qui réduit les intrusions tardives) et les DOPN (qui éliminent les accidents d'initiation précoces)

L'efficacité augmente donc fortement avec le flux de véhicules, et est plus grande pour le fret (annonce réelle plus longue) que pour les trains de voyageurs.

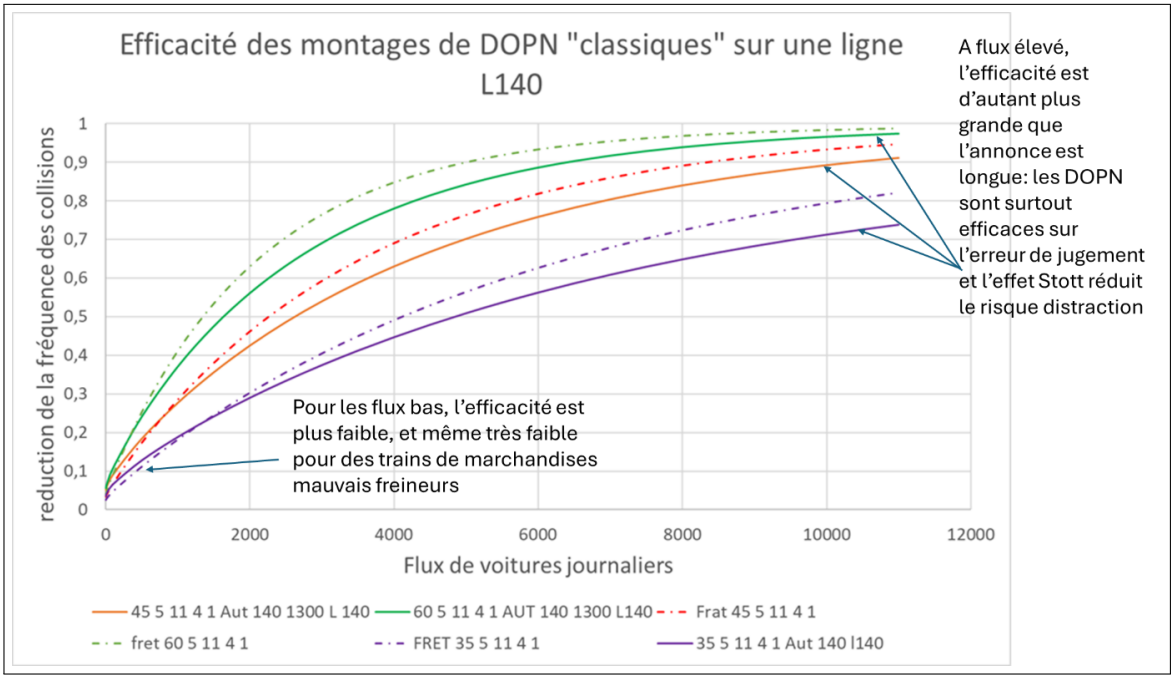



FIGURE 119 – Estimation de l'efficacité des DOPNclassiques sur une ligne L 140. Modèle générique d'accidentologie aux PN

Pour les lignes à V160 (figure 120), le commentaire est le même, l'effet de l'annonce étant simplement amplifié par le passage à 30s au lieu de 25s.

Pour une ligne à V100, l'avantage du fret pour les flux élevés disparait (figure 121)

Il reste une efficacité plus importante pour les trains de voyageurs, et pour aussi bien le fret que le voyageur  aux flux élevés : La synergie DOPN/ effet Stott qui permet des efficacités très élevées pour les *V* élevés

*D'une manière générale, on constate que l'évolution du taux de collision en fonction de T, V et de l'annonce est beaucoup plus complexe que pour un PN « traditionnel » sans détecteur.*

Par rapport aux PN classiques, ou le train n'a en général, pas le temps de freiner avant l'accident, l'efficacité du DOPN dépend fortement de la capacité de freinage du matériel roulant, et notamment du temps de réaction du frein et de la décélération, et ce, d'autant plus que l'annonce est courte.

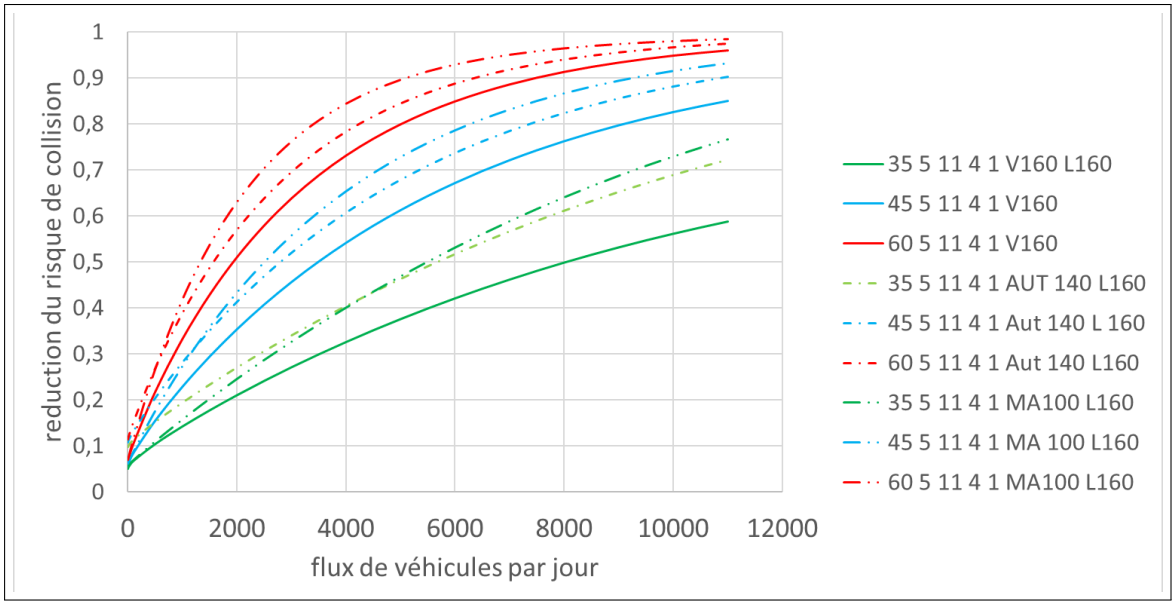



FIGURE 120 – Estimation de l'efficacité d'un DOPN sur ligne V 160 – modèle générique d'accidentologie aux PN

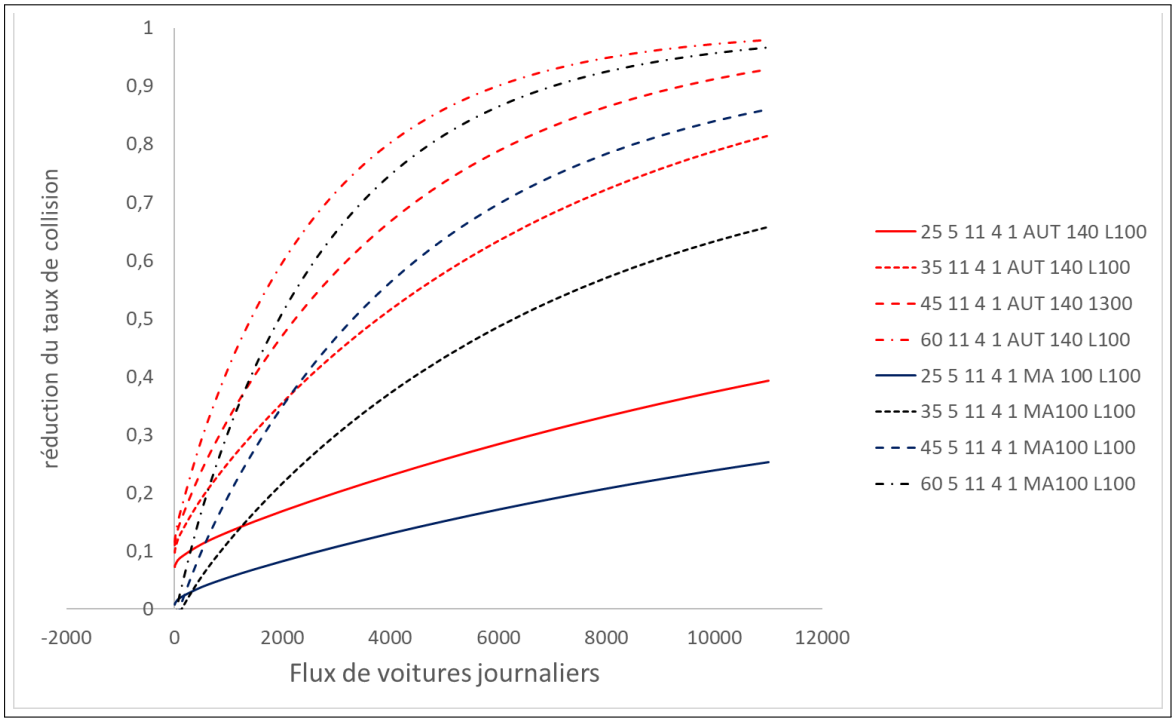



FIGURE 121 – Estimation de l'efficacité d'un DOPN sur une ligne V100 pour AUT 140 1300 et MA 100

Pour clarifier ce point, nous avons évalué l'impact des performances de décélération du train (figure 122) et du temps de déclenchement du freinage (figure 123)

Le DOPN utilisé pour la simulation est le 3DLX de IHI, dont les caractéristiques techniques sont bien connues (testé par la SNCF et en cours d'homologation en 2023) avec 5s de clignotement, X s d'annonce, et une première phase de 11s avec condition de vitesse et une seconde phase sans condition de vitesse.

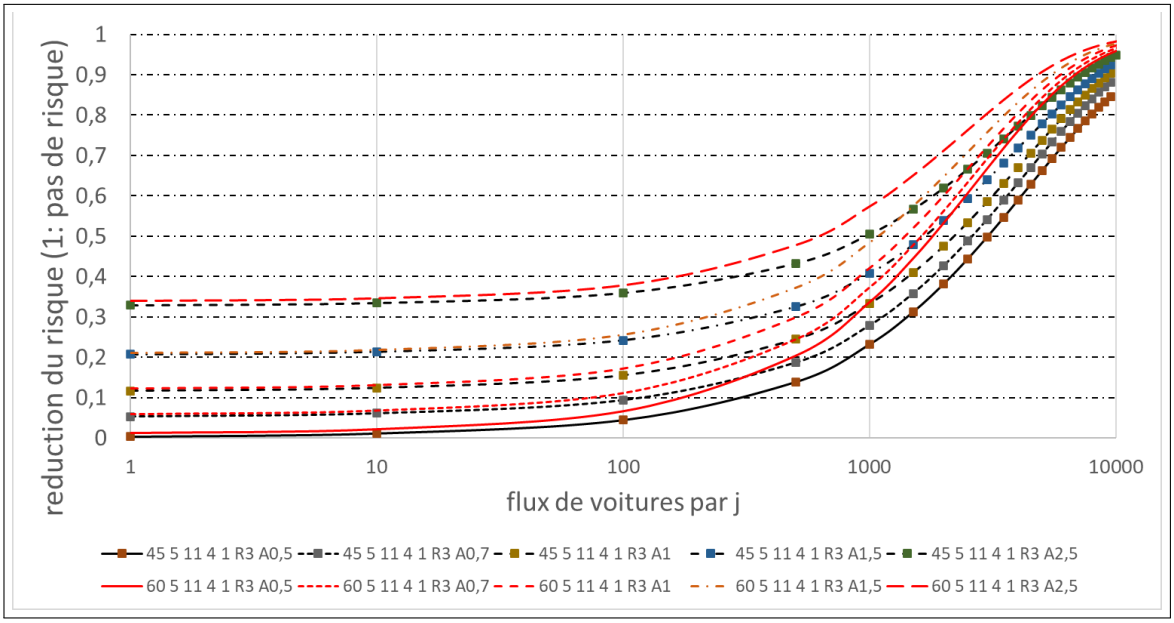



FIGURE 122 – Sensibilité de l'efficacité du DOPN (par rapport au SAL 2 25 7 «standard») en fonction de l'accélération du Matériel pour un temps d'établissement du freinage de 3s et des accélérations entre 0,5 et 2,5m/s. Modèle générique d'accidentologie aux PN

Comme on peut le voir ci-dessus, l'efficacité du DOPN augmente quand la décélération de freinage augmente, mais l'influence est surtout sensible au-dessus de 1 m/s$^2$ et pour des annonces courtes et des flux de véhicules faibles. Ce n'est pas pour rien que ce sont les chemins de fer japonais qui ont le plus développé les DOPN, car les exigences de freinage du fret japonais sont très voisines de celles du RER A.

Le temps d'établissement du freinage a aussi une influence, mais moindre que celle de l'accélération.

*On peut aussi s'interroger sur l'intérêt des PN à quatre ½ barrières non équipées de détecteurs : les allemands, par exemple, les utilisent systématiquement soit gardés, soit avec DOPN, avec un taux d'accident très faible qui d'ailleurs suggère que notre modèle est pessimiste.*

*Les figures 124 et 125 comparent le SAL 4* ***35 7*** *aux diverses variantes possibles de DOPN.*

Comme on peut le voir sur ces deux figures, lorsque le trafic est essentiellement voyageur et sur les modes motorisés, le DOPN, même en conservant l'annonce à 25s, a une efficacité sur le risque de collision supérieure au SAL 4.

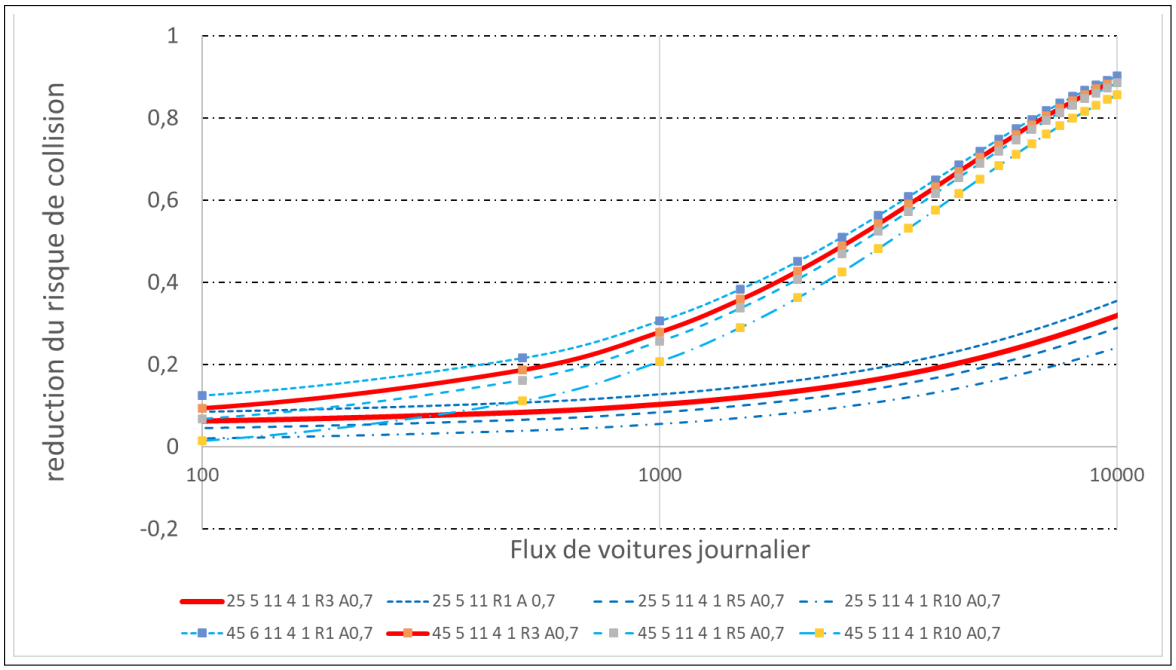



FIGURE 123 – Sensibilité de l'efficacité du DOPN à la durée de réaction du mécanicien et d'établissement du freinage sur ligne à 140, train à V140, R entre 1 et 10s, A 0,7 m/s2. Modèle générique d'accidentologie aux PN

La situation est plus complexe pour le fret, ainsi qu'en zone urbaine ou les modes doux ont une importance croissante.

Pour le fret, même avec une annonce à 35s, le DOPN est supérieur au SAL 4, mais, quitte à changer l'annonce, autant viser 45 ou 60s, car là, l'efficacité sera nettement supérieure.

Toutefois, en zone urbaine, on pourrait envisager (voir plus loin) des montages SAL 2X2 « EGDM » avec quatre barrières, jupes, calfeutrement des moteurs, plus efficaces que les SAL 4 pour les circulations voyageurs, moins efficaces que les SAL 4 (mais équivalentes au SAL 2 à bas moment et meilleures à moment élevé) pour le fret qui est fréquemment minoritaire dans ces zones.

### 8.4.3 Efficacité et domaines d'emploi des PN équipés de DOPN

Pour évaluer l'ordre de grandeur de l'efficacité « sur le terrain » des DOPN, on peut calculer l'efficacité de réduction sur un échantillon de la population des PN du réseau (avec les caractéristiques T,V et V supérieur à 100 v/j et une exigence sur l'annonce 45s minima ou 60s minima.) on constate une efficacité, en fonction du centile, comprise entre 12 et ≈99% pour un train de type AUT 140 1300 et entre 8 et ≈99% pour les MA 100 (cf. figure 127).

Par rapport au Japon, l'efficacité en France des DOPN à faible moment (classés par centiles de flux de véhicules) est plus faible pour les PN les moins chargés (à cause des exigences de freinage plus faibles, notamment fret).

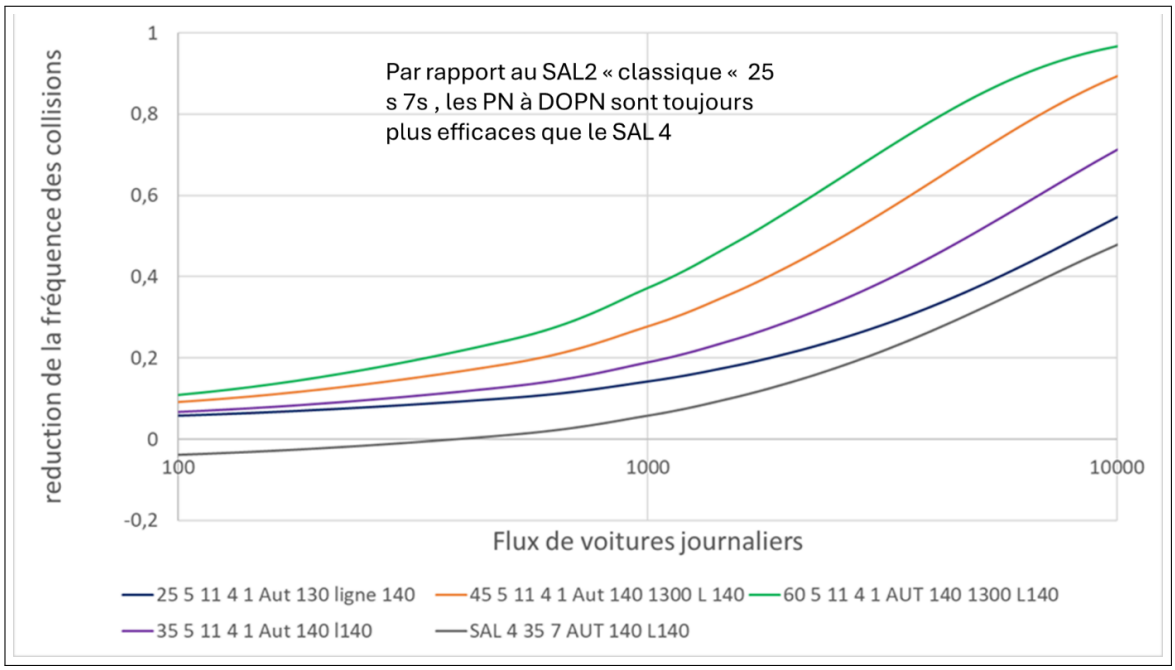



FIGURE 124 – Comparaison efficacité DOPN et SAL 4 pour un train de voyageurs type AUT 140 1300. Modèle générique d'accidentologie aux PN

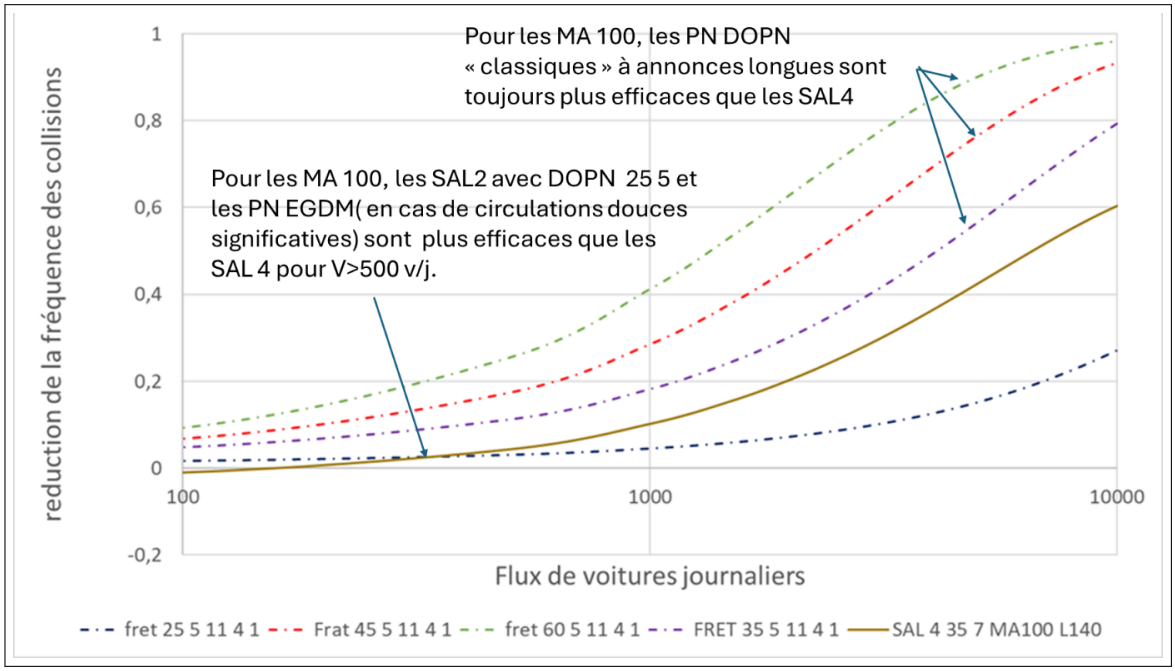



FIGURE 125 – Comparaison efficacité DOPN SAL 4 pour MA100. Modèle générique d'accidentologie aux PN

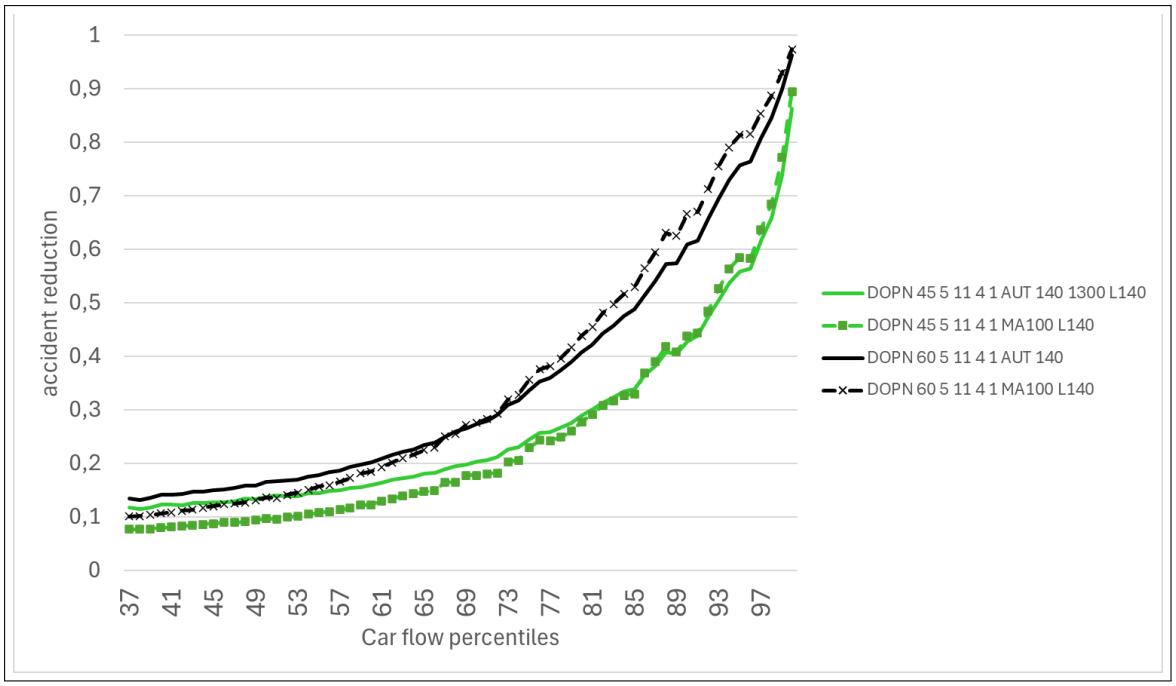



FIGURE 126 – Efficacité des DOPN sur les centiles de moment avec V supérieur à 100 sur ligne à 140km/h avec un échantillon représentatif de PN et des trains AUT 140 1300 et MA100

À l'exception du PN normalement fermé, dont l'efficacité est encore plus grande, mais qui n'est utilisable que sur une partie des passages à niveau (flux de véhicules faibles), les DOPN ont une efficacité importante pour réduire le risque de collision, ce qui est cohérent avec le retour d'expérience des réseaux les utilisant.

En complément de l'évaluation précédente, on peut aussi regarder le taux de collision (figure 128)

Avec les trains français « courants », dont les exigences de freinage sont très inférieures aux trains japonais ou aux tramways, l'efficacité des DOPN est limitée pour les PN à flux de véhicule faible (50% des PN en France)

On voit aussi que l'évolution du risque de collision en fonction du flux de véhicules est extrêmement différente de celle des passages à niveau sans détecteur : il passe par un maximum pour des flux « moyens », mais devient très faible pour les flux élevés.

Cela tient à une très forte synergie du détecteur d'obstacle et de l'effet Stott : avec un détecteur d'obstacle, suivant la capacité de freinage des trains, seuls les accidents tardifs, s'initiant 15s à 20s avant l'arrivée du train contribuent aux accidents, et si le flux de véhicule est suffisamment élevé, à ce moment, il y a une queue formée devant le passage à niveau. Avec un détecteur et une fréquentation routière suffisante, l'accident devient impossible, sauf aux heures creuses de la nuit.

Contrairement à l'expérience japonaise, on ne constate pas de diminution de l'efficacité des DOPN pour des flux de trains élevés. L'explication est très simple, et tient au profil

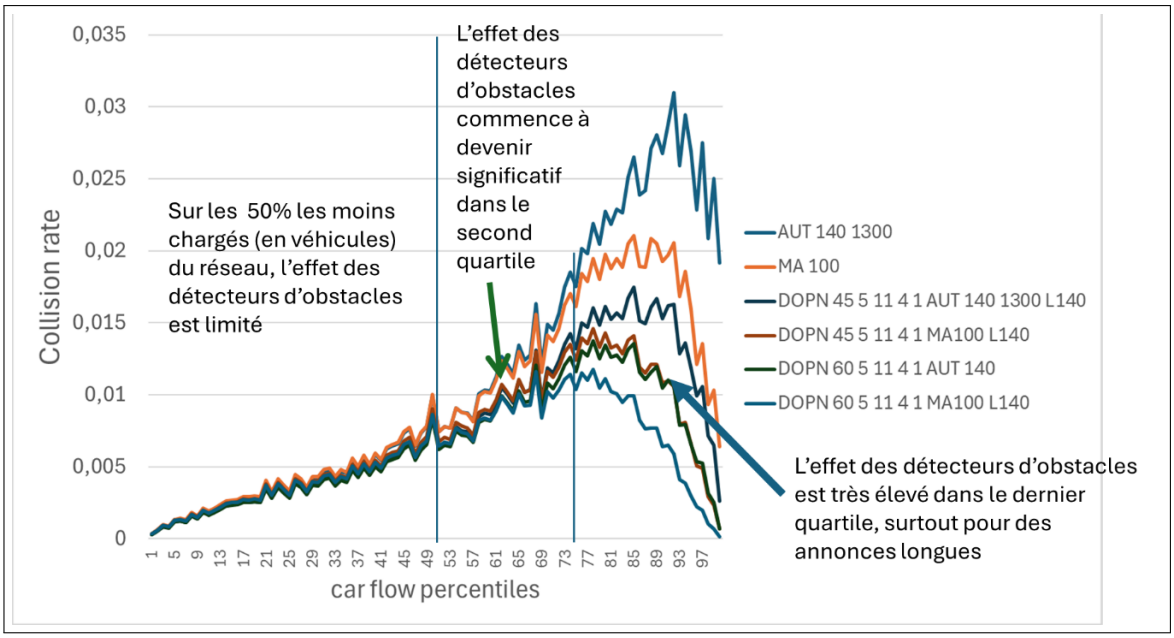



FIGURE 127 – Impact des détecteurs sur le taux de collision sur ligne V140 sur échantillon représentatif de PN français. Modèle générique d'accidentologie aux PN

de moments du réseau : en France, le dernier vingtile de la distribution des flux de trains à plus de 110 trains et plus de 8000 véhicules, alors qu'au Japon, le dernier vingtile est à 300 trains, mais un nombre de véhicules plus faible (moins de 2000 v/j), les PN avec des flux de trains supérieurs à 200 par jour ont tous des flux routiers relativement faibles, alors que l'efficacité du DOPN est essentiellement corrélée au flux de véhicules.

En fait, la réduction du risque de collision avec un DOPN n'est pas fonction du moment, mais essentiellement fonction du flux de véhicules. Ce que l'on voit sur la figure 128 est que, lorsque le le nombre de véhicules augmente, donc l'effet Stott, alors la part relative de la distraction, et donc des incidents tardifs, diminue et que l'efficacité du détecteur augmente en conséquence.

Les détecteurs d'obstacles sont extrêmement efficaces pour réduire les accidents précoces : au-delà de 45s d'annonce, en pratique, avec un détecteur, les incidents qui arrivent pendant la fermeture des barrières ne donnent plus lieu à accident, et seuls les incidents d'occurrence tardive contribuent à l'accidentologie.

La différence entre les MA 100 et les différentes familles d'autorail est plus complexe, car provient de la conjonction de deux facteurs contradictoires :

— Tout d'abord, le temps d'établissement du freinage, pris à 10s dans les règles EPSF, qui pénalise fortement le DOPN lorsque le délai d'annonce est court.
— La durée effective d'annonce, fortement augmentée par rapport à la valeur nominale des trains à V 140, qui potentialise l'effet Stott, et augmente fortement l'efficacité du DOPN.

La figure 127 confirme bien ces deux effets antagonistes : pour les tout petits flux de véhicules, l'effet Stott est négligeable, l'effet du frein l'emporte, et le DOPN est moins effi-

cace si le train est un MA 100 que si c'est un autorail, et à l'inverse, sur les flux routiers élevés, l'effet Stott est prépondérant et le DOPN est plus efficace si le train est un MA 100 que si c'est un autorail.

En résumé, le détecteur d'obstacle « classique », tel qu'il avait été testé en France en 1968/1980, et tel qu'il a été déployé au Japon, en Suède, en Allemagne et en Italie sur des PN à quatre demi-barrières :

- Est une solution extrêmement efficace pour réduire le risque d'accidents pour des PN avec des flux importants de véhicules et des annonces de 45 à 60s.
- Nécessite des aménagements relativement conséquents du côté ferroviaire (Allongement des annonces, ajout de barrières de sortie) si on veut le substituer à un PN existant de type SAL 2 .
- Il laisse cependant subsister une grande partie des accidents dus à l'inattention. Mais ceux-ci peuvent être réduits par un travail sur l'environnement routier (réduction des distractions possibles du conducteur, augmentation de la visibilité du PN activé)
- Par rapport à la solution classique de fermeture du PN, il peut être une alternative lorsque celle-ci est très couteuse ou impossible.

En revanche, son efficacité est plus limitée lorsque le flux de véhicules est très faible : le détecteur d'obstacle « classique » n'est pas la solution pour les PN à très faible flux de véhicules :

- Ceux-ci peuvent souvent être supprimés avec des travaux de coût raisonnable, surtout si les autorités organisatrices locales soutiennent le projet.
- S'ils ne peuvent pas être supprimés, une amélioration de type automatisation, ou, mieux encore, « PN normalement fermé » pourrait être plus efficace que le DOPN, même si la comparaison directe est impossible (l'efficacité d'un DOPN varie en fonction du flux de véhicules et des performances du freinage du train, alors que celle d'un PN normalement fermé est fonction du flux de trains, mais dans le domaine de pertinence du PN normalement fermé moins de 100 v/j, il est toujours plus efficace que le DOPN classique).

En conclusion : Dans les paragraphes précédents, nous avons vu que les DOPN « classiques » à annonces longues sont très efficaces pour les PN à très fort flux de véhicules, qui sont souvent très difficiles à sécuriser, et dont la suppression est très couteuse.

De plus, dans ces gammes de flux de véhicules, l'efficacité ne va pas dépendre sensiblement des performances du train.

Notre modèle, qui utilise les données de freinage de service sous-évalue probablement les performances des DOPN pour les flux de véhicules faibles, et on pourrait mieux encadrer l'efficacité réelle (opposée à l'efficacité garantie) soit en revenant à un modèle de Monte-Carlo (comme le modèle préliminaire) soit en effectuant plusieurs calculs avec des performances correspondant à des adhérences plus ou moins bonnes ou plus ou moins dégradées pour encadrer mieux la performance réelle.

Enfin, les DOPN pourraient avantageusement se substituer aux SAL 4 dans la majorité des cas d'application.

### 8.4.4 Efficacité d'une sécurisation du réseau avec des PN normalement fermés (en dessous de 100 véhicules/j) et des DOPN (au-dessus de 100 v/j)

Les PN à faible flux de véhicules (moins de 100v/j) sont rarement les plus accidentogènes, mais ils sont très nombreux (36%) et l'efficacité d'un PN « normalement fermé, ouvert à la demande », dépend essentiellement du flux de trains, et non du flux de véhicules.

Avec le profil de moments des PN français, la simulation donne une valeur très élevée d'efficacité (de l'ordre de 70%) (cf. figure 126).

À l'inverse, l'efficacité des DOPN est d'autant plus grande que le flux de véhicules est plus élevé, d'où la suggestion d'une « politique » où l'on équiperait, en cas de modernisation, les « petits » PN en NFOD et les PN plus importants en DOPN, au moins dans les cas où la suppression ne serait pas possible et où l'amélioration ergonomique routière ne serait pas suffisante.

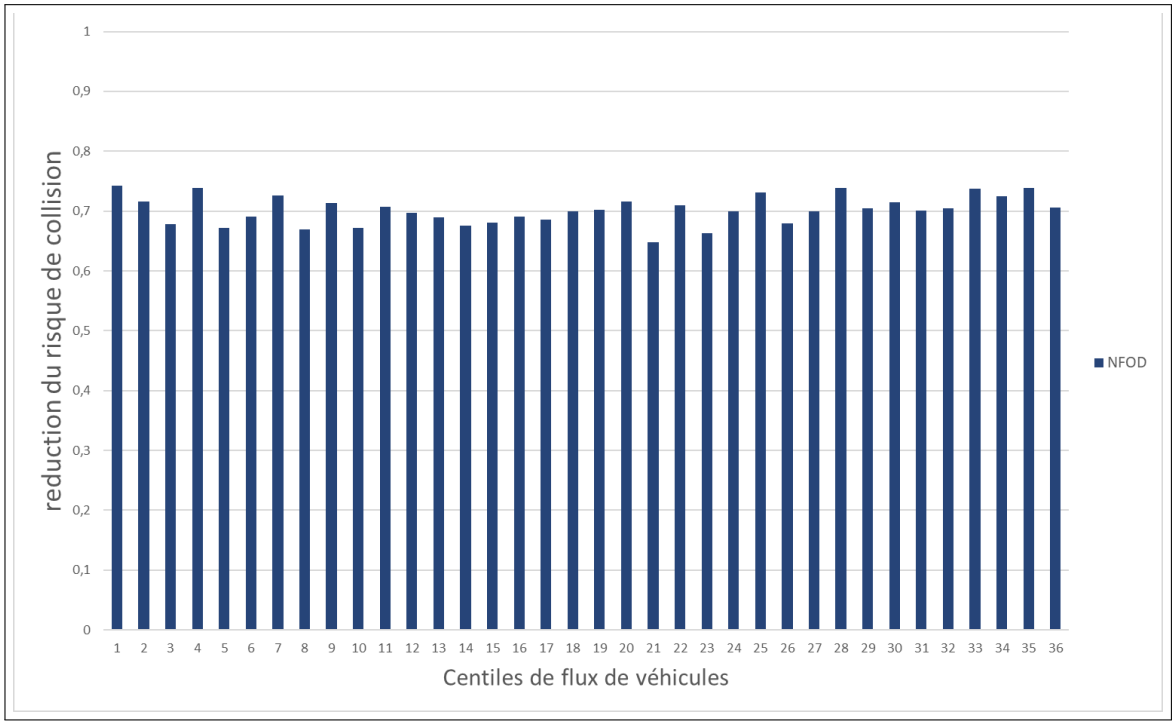



FIGURE 128 – Efficacité des PN NFOD pour les centiles de flux de véhicules inférieurs à 100 v/j. Modèle générique d'accidentologie aux PN

### 8.4.5 PN « Exit Gate Dynamic Mode » (EGDM) aux USA : une solution pour les PN à proximité de gares et les PN urbains en général ?

À l'origine, ce type de PN visait :

— À réduire le risque de cécité d'inattention en augmentant le « risque perçu (subjectif) au PN (sans augmenter ou même en diminuant le risque objectif) ce qui va pousser les utilisateurs routiers à concentrer leur attention sur le PN.»
— À réduire le risque de franchissement tardifs du PN grâce à la fermeture simultanée des quatre barrières, mais sans avoir, comme pour un SAL 4 classique, à augmenter la durée d'annonce, ce qui peut être complexe et couteux.

Cette solution consiste :

— À réduire au minimum la durée de clignotement avant baisse des barrières en la calculant à partir du temps de réaction du conducteur et de la vitesse du véhicule.
— À installer un détecteur d'obstacle.
— À fermer simultanément les barrières d'entrées et de sorties du passage à niveau en l'absence d'obstacle. En présence d'un obstacle, les barrières de sortie restent ouvertes dans que l'obstacle n'a pas dégagé.
— Les premiers PN EGDM n'envoyaient pas d'alarme au train, mais cette fonctionnalité a été ajoutée rapidement et améliore l'efficacité du système.

> The vehicle detection technology consists of inductive loops embedded within the roadway, connected to a solid state vehicle detection unit on the wayside. At single track locations, four loops are installed in each approach and exit highway quadrant inside the grade crossing gates. For double-track grade crossing applications, an extra pair of loops is installed between the tracks. These configurations are illustrated in Figure 4. As described previously, this technology has been successfully implemented on Amtrak's NEC HSR corridor in Connecticut. However, the Illinois configuration is not integrated with the train control system.
>
> The EGMS operates in two modes with respect to exit gate operation; "dynamic" and "timed." In dynamic mode, which is the primary operational state, exit gate function is dependent on the presence and detection of vehicles within the grade crossing. If no vehicles are detected, the entrance and exit gates descend simultaneously. Timed mode is the EGMS backup operational state. If failure occurs in the EGMS hardware or the vehicle detection subsystem, exit gate descent is delayed until the entrance gates have reached the horizontal position. This operational mode provides an exit means for vehicles within the crossing when the warning system is activated.

> When a grade crossing is activated, the gate warning lights flash for 5 seconds. In dynamic mode operation, if no motor vehicles are detected and the crossing equipment is operating normally, both the entrance and exit gates will descend in tandem. All four gates will arrive at the horizontal position within 10 seconds of beginning descent and remain there for a minimum of 15 seconds before train arrival. This sequence is depicted in Figure 5. During this time, if a vehicle is detected within the crossing, the exit gates will cease lowering and begin to ascend. Once the detection system verifies the crossing is unoccupied, the exit gates will resume descending. When all of the gates reach the horizontal position and the grade crossing island circuit is activated by a train, the vehicle detection system is inhibited. This prevents the train from being incorrectly detected as a highway vehicle, which would result in the inadvertent raising of the exit gates by the EGMS. Once the rear end of the train clears the island circuit, the gates begin to ascend and return to the vertical position within 12 seconds.

*Extrait du retour d'expérience (report to Congress) du FDA sur le corridor Amtrak Chicago Saint-Louis (office of railroad devlopment 2001)*

Le principe du PN EGDM est une amélioration à la fois du SAL 2 et du SAL 4 (ou plus exactement de leurs équivalents américains) avec la même durée d'annonce que les « SAL 2 » américains (30 s)

Le principe (que l'on pourrait adapter à nos SAL 2) est le suivant :

- Clignotement 5s.
- En absence de détection d'obstacle, descente quasi simultanée et rapide des quatre barrières (voir photo plus bas). Fin de fermeture à t+15s pour les quatre barrières.
- En présence d'obstacle, la barrière de sortie ne descend pas où se réouvre.
- Sur les modèles récents, en cas de détection d'obstacle, envoi d'une alarme au train.
- Dès que l'obstacle a dégagé, fermeture de la barrière de sortie et annulation de l'alarme.
- Arrivée du train à T + 30s. Inhibition du détecteur quand le train attaque la zone courte du PN.

FIGURE 129 – PN EGDM sur corridor Chicago Saint-Louis en cours de fermeture (photo prise lors des essais du train » à grande vitesse » (125 mph) d'Amtrak, d'où la présence de spectateurs).

Selon la FDA, l'efficacité de réduction du risque de collision apportée par un PN EGDM est très élevée, à cause de deux effets complémentaires :

- La fermeture quasi simultanée (et rapide) des quatre barrières augmente fortement le risque subjectif perçu : même si le DOPN va maintenir la barrière de sortie ouverte en cas d'obstacle (ou de dysfonctionnement) le système est conçu pour faire craindre au conducteur routier d'être enfermé, ce qui a deux conséquences
  - Les franchissements tardifs et imprudents sont réduits ; moins d'accidents dus à l'imprudence
  - Le PN faisant peur, le conducteur routier lui accorde davantage d'attention : moins d'accidents dus à la cécité d'inattention.

  - De plus, en cas d'obstacle, le DOPN ralentit les trains, la barrière de sortie reste ouverte, et le véhicule a davantage de chances d'esquiver.
- La FDA estime la réduction à 80%.

Notre modèle ne permet pas de prendre en compte la réduction de cécité d'inattention, qui peut être importante. En revanche, il peut évaluer le 1er et le 3e effet, donc donner une borne basse de l'efficacité et une borne haute de l'accidentologie d'un PN SAL 2 auquel on appliquerait les principes EGDM :

- Clignotement 5s
- Fermeture barrière d'entrée de 5 à 12s et fermeture barrière de sortie simultanée de la barrière de sortie en absence d'obstacle
- Alarme au train en cas d'obstacle détecté, avec condition de vitesse dans les 11 premières secondes, sans condition ensuite.
- Barriere de sortie conservée ouverte ou réouverte en cas de détection d'obstacle, fermeture dès la détection terminée + 1s
- Arrivée du train à 25s mini

Il est envisageable d'utiliser en France le concept américain des PN « Exit Gate Dynamic Mode », même si notre durée d'annonce de 25s est très courte, et en réduit nettement l'efficacité, notamment quand le train est un train de fret « européen », dont le freinage met beaucoup plus de temps à se déclencher que celui des trains de fret AAR.

On pourrait même envisager une doctrine d'application en deux étapes :

- Dans un premier temps, on installe un PN EGDM en conservant l'annonce classique française (entre 25 et 35s)
- Dans un second temps, lors de la rénovation de la signalisation de la ligne, on augmente la durée d'annonce pour augmenter l'efficacité du détecteur.

Dans les deux figures qui suivent (figures 131 et 132), on va comparer cette solution d'abord au SAL 2 de référence, puis à l'alternative technique qui est le SAL 4 « classique », pour une ligne à V140 et l'AUT 140 1 300 et le MA 100.

Concernant la protection vis-à-vis des collisions avec les trains de voyageurs, un DOPN à annonces courtes à 25 ou 30s est toujours plus performant qu'un SAL 4 à 35s d'annonce.

Pour les trains de fret, c'est un peu plus complexe, car 25s est très court pour agir sur un train de fret dont le temps de latence du freinage peut atteindre 10s.

Cependant, même à 25s, l'efficacité d'un DOPN à annonce courte vis-à-vis des collisions avec les trains de fret est voisine de celle d'un SAL 4 35s (meilleure pour les flux de véhicules faibles ou très forts, moins bonne pour les flux moyens) et toujours meilleure à 30s.

Faute de données, le modèle ne comprend pas de réduction du risque de cécité d'inattention, alors que le risque d'enfermement perçu par le conducteur routier est très important (annonce courte, chute rapide et simultanée des barrières aux USA) : c'est peut-être une des raisons pour lesquelles l'efficacité moyenne évaluée par notre modèle est nette-

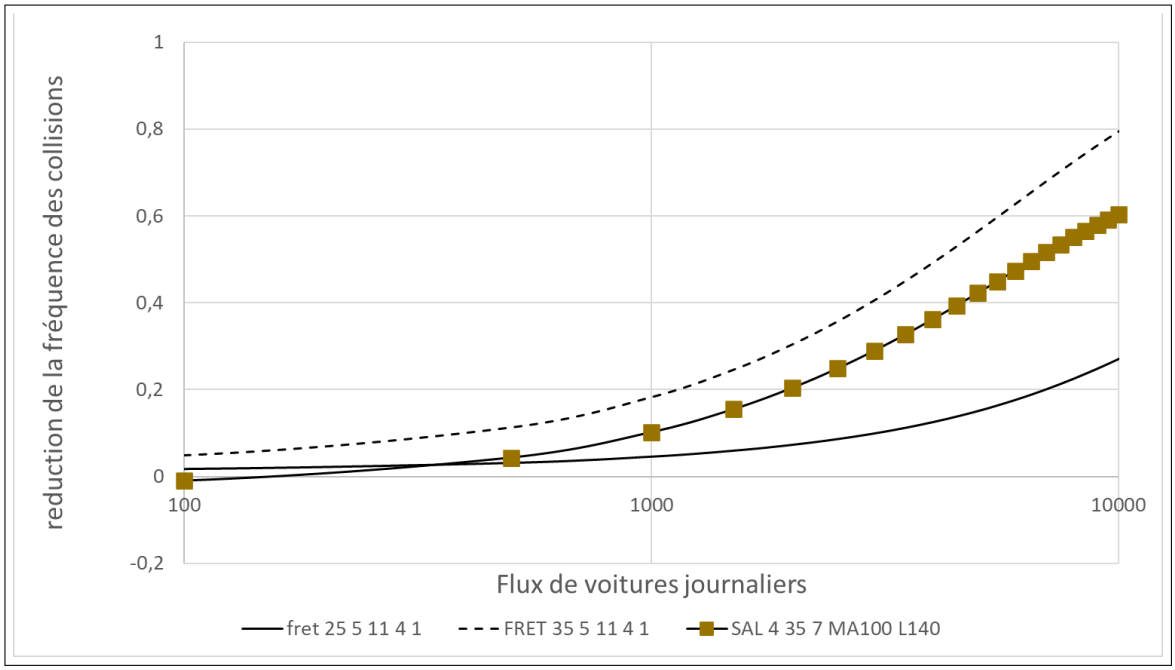



FIGURE 130 – Efficacité des SAL 4 et des DOPN EGDM sur ligne V140 parcourue par des trains type MA 100 en référence par rapport aux SAL 2 25 7

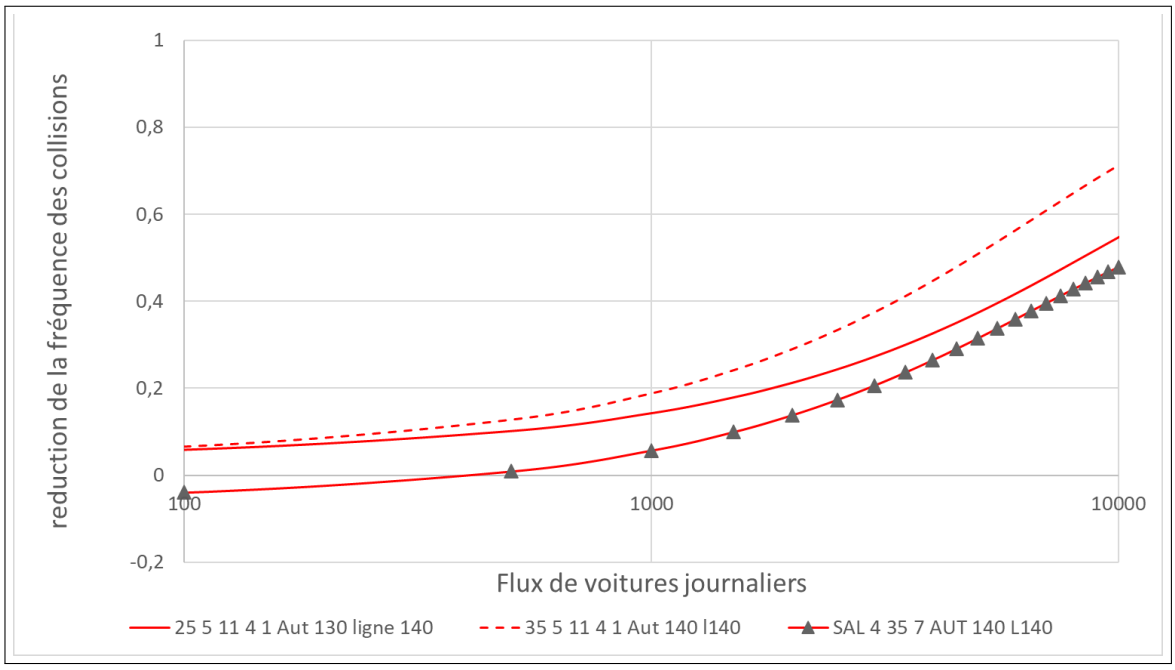



FIGURE 131 – Efficacité des SAL 4 et des DOPN EGDM sur ligne V140 pour des autorails référence SAL 2 25 7. Modèle générique d'accidentologie aux PN

ment inférieure à celle donnée par la FDA, l'autre pouvant être un biais d'échantillon (La FDA a essentiellement installé ces PN sur des sites à moment élevés).

Cependant, pour un coût voisin du SAL 4 classique, avec l'ajout d'un détecteur et d'un « signal spécial », sans modification du PN si on fait commander les barrières de sorties directement par le détecteur (car celui-ci est SIL 3 et le mode de repli, en cas de défaillance du détecteur est le SAL 2 d'origine), la réduction du risque de collision, même sans prendre en compte l'ergonomie routière, est plus élevée que pour le SAL 4 classique dans de nombreux cas.

Comparée à l'analyse de la FDA (80% de réduction), le modèle donne une réduction plus faible, de l'ordre de 60% à 75% pour les trains de voyageurs et les moments élevés.

De plus, si l'on reste dans des durées d'annonces de 25s et 30s, qui sont celles des SAL 2 classiques, on peut imaginer de garder des demi-barrières d'entrées uniquement, et de ne pas installer de barrières de sortie commandées par le détecteur.

Cependant, cette proposition présente plusieurs inconvénients :
- Elle n'est pas efficace contre les circulations douces. Or, le détecteur réduisant fortement le risque vis-à-vis des modes motorisés, les modes doux vont représenter une part importante, voire majoritaire en contexte urbain, des accidents résiduels.
- Elle n'augmente pas le risque subjectif d'enfermement perçu par le conducteur, qui pourrait être l'une des raisons de l'efficacité très élevée annoncée par la FDA.
- Le risque résiduel de collision est encore important.

*Il est donc préférable dès qu'il y a un risque non négligeable de circulations douces, d'équiper le PN « EGDM » de 4 demi-barrières avec jupes, de calfeutrer les espaces autour des moteurs, et d'accompagner impérativement la mise en place du détecteur de mesures routières visant à réduire le risque de cécité d'inattention (cf guide EPSF 021 ou celles évoquées dans cette thèse).*

*On verra aussi qu'il est indispensable de réfléchir à l'ergonomie de conduite ferroviaire pour éviter, dans le cas de PN EGDM, trop de perturbations de la régularité tout en gardant une bonne efficacité.*

Concernant l'efficacité sur la population du RFN « éligible » (cas plus de 100 v/jour), on peut simuler l'impact de l'installation généralisée de détecteurs sur cette population, pour des MA100 et des trains de voyageurs à VL (cf. Figure 133)

Dans la figure 133, on trouve aussi la comparaison entre un « EGDM stricto sensu » (conservant l'annonce à 25s) et un DOPN à annonce « moyenne » (35s)

Contrairement aux SAL 4, l'efficacité des EGDM est toujours positive, mais elle ne devient réellement significative, dans notre modèle, que pour le dernier tiers des PN avec le flux de véhicules les plus élevés (cf. figure 134).

Le PN EGDM 25 5 11 4 1 serait même « plus efficace » (figure 133) pour les PN à flux de véhicules moyens que les DOPN à 35s d'annonce (et que les SAL 4 pour des lignes ou les trains de fret sont fortement majoritaires)

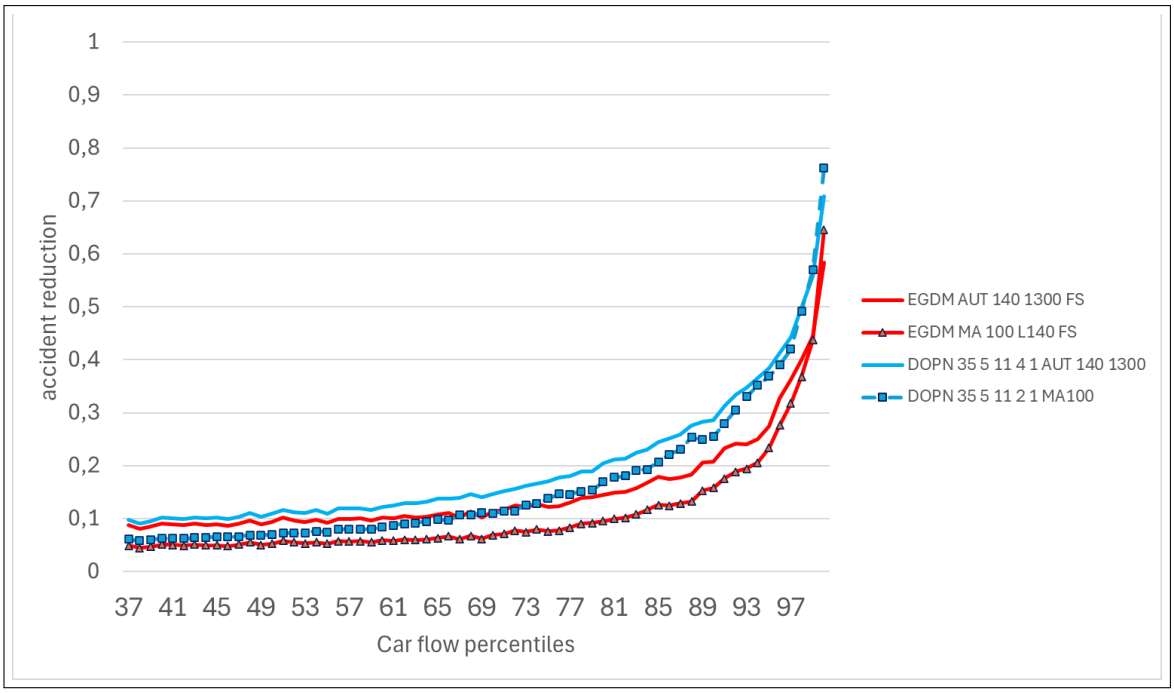



FIGURE 132 – Efficacité des PN EGDM sur ligne 140km/h avec un échantillon représentatif de PN français pour des trains AUT140 1300 et MA100 – modèle énérique d'accidentologie aux PN

Cependant, il est possible que notre modèle sous-estime l'efficacité des EGDM.

Ceux-ci ont été conçus en fonction des principes de sécurité routière, et leurs caractéristiques (fermeture simultanée des quatre barrières en absence d'obstacle, délai de clignotement de 5mn, baisse rapide des barrières) augmente très fortement le risque subjectif perçu par le conducteur routier et pourrait fortement réduire le risque de cécité d'inattention.

Le modèle ne prend pas en compte ce point.

De plus, pour les PN proches de gares, les PN à fort risques de circulations douces, ces PN pourraient permettre d'installer quatre demi-barrières, des jupes sous barrières, un calfeutrement autour des moteurs, des warning box pour les circulations douces qui devraient permettre de réduire de façon significative les accidents de modes doux.

On peut en dégager une zone de pertinence possible pour les PN EGDM :

— Comme amélioration « rapide » en attendant une refonte de la signalisation et une augmentation du temps d'annonce.
— *En zone urbaine, pour pouvoir installer des barrières de sortie avec jupes sans avoir à modifier l'annonce (avec en sus des « anti-trespass » éventuels et un calfeutrement autour des moteurs) et réduire les accidents de modes doux.*
— Pour des PN de fréquentation moyenne, en complément d'un travail sur l'ergonomie routière et les plans de circulation.

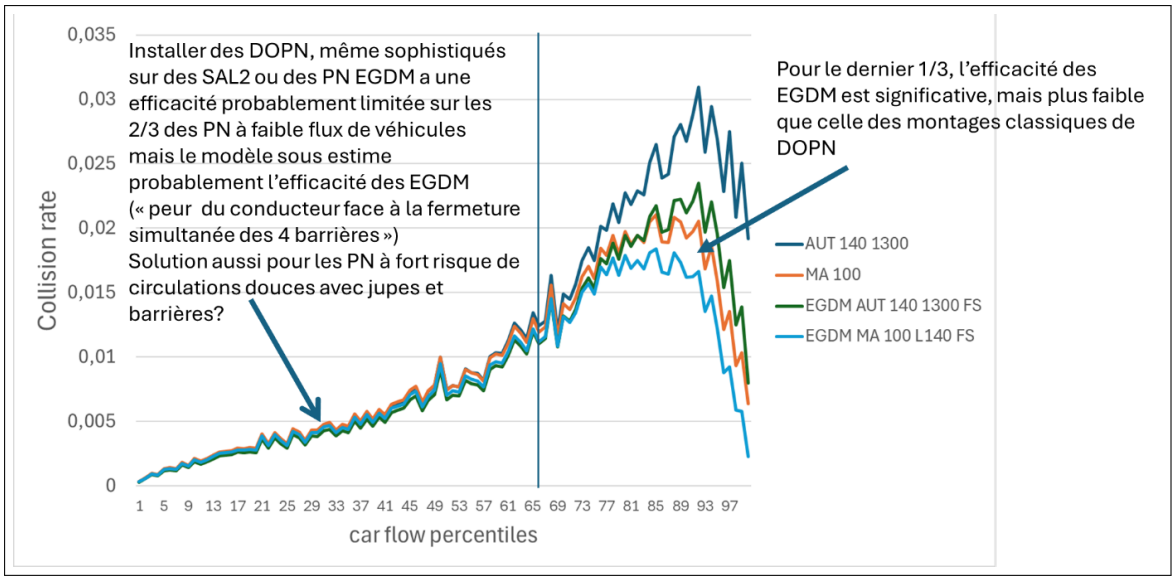



FIGURE 133 – Simulation de taux de collision aux PN EGDM comparé à un PN classique sur réseau ferroviaire français. Modèle générique d'accidentologie aux PN

On peut aussi envisager à terme une extension du domaine de pertinence en instrumentant les PN ainsi équipés ou en effectuant un retour d'expérience pour évaluer l'impact de l'ergonomie de ces types de PN sur le comportement des conducteurs et le taux de collisions.

### 8.4.6 Efficacité de la combinaison NFOD + DOPN sur une ligne à 140 et des PN représentatifs des PN du réseau pour des trains de type AUT 140 1300 et MA 100

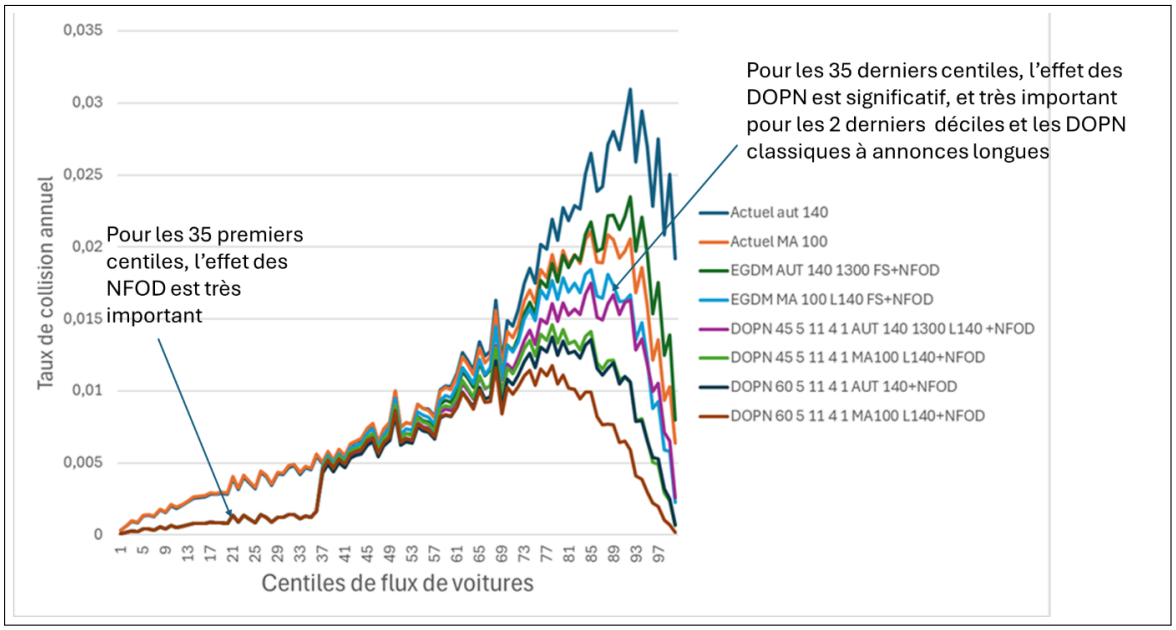



FIGURE 134 – Simulation de taux de collision comparé entre PN à SAL classiques existants et PN «innovants». Modèle générique d'accidentologie aux PN

Sur cette figure 134, on peut voir que d'une part :

— Sur les PN avec des flux de véhicules inférieurs à 100/j, les PN NFOD sont extrêmement efficaces.
— Sur les 35 derniers centiles, les divers types de DOPN permettent une réduction significative du taux d'accident.

*Dans l'état actuel, le modèle ne permet pas de conclure pour les centiles intermédiaires. Cependant :*

— *Un travail sur l'ergonomie routière du PN.*
— *Un travail sur le plan de circulation.*

*Pourrait réduire de façon très efficace le taux d'accident .*

*Pour les PN à taux de circulations douces élevées, les EGDM avec Jupes et calfeutrement pourraient apporter une réduction significative du risque circulations douces. Leur efficacité sur les circulations motorisées paraît plus faible que celle des DOPN classique, mais pourrait être fortement sous-estimée si la fermeture simultanée et rapide des quatre barrières induisait un risque subjectif fortement accru pour les conducteurs routiers et une réduction significative de la cécité d'inattention*

## 8.5 Ergonomie de conduite en cas d'alarme : comment maximiser la réduction de risque sans obérer la régularité.

### 8.5.1 DOPN et mécanisme d'esquive

Le mécanisme d'esquive, aux passages à niveau, est plus important qu'on ne le croit, et pour un accident, il y a plusieurs incidents, avec pénétration dans la ZD (Zone Dangereuse) et redémarrage, même avec les annonces assez courtes que l'on a en France.

Quand on ajoute un détecteur d'obstacle, dès que le mécanicien est alarmé, il réagit et freine, le train ralentit, et la durée du parcours jusqu'au passage à niveau augmente.

Ce que soulignent nos collègues japonais, c'est qu'il est très rare, avec un détecteur d'obstacle laissant ouvert la barrière de sortie en cas d'alarme, que le train trouve un obstacle au niveau du passage à niveau. Et pourtant, il ne s'agit pas d'un dysfonctionnement du détecteur : l'obstacle était bien réel, mais avec l'allongement du temps de parcours du train jusqu'à l'obstacle, l'obstacle a quitté les lieux. *Cela a une grande importance en ce qui concerne l'intégration et l'acceptation des détecteurs.*

L'efficacité des détecteurs d'obstacles vient autant de l'allongement de la durée d'arrivée du train sur le PN en cas d'alarme, et de la barrière de sortie maintenue ouverte (pour encourager l'esquive) que de l'arrêt du train. C'est la raison de l'efficacité des montages EGDM, même si la réduction d'accident est plus faible qu'avec le montage classique japonais ou allemand. D'après nos collègues japonais, avec un DOPN, au lieu d'avoir 10 accidents (et 90 incidents non détectés), on aurait un accident et 99 alarmes avec ralentissement, et obstacle disparu à l'arrivée du train.

Cela pose deux questions sur l'optimisation du réglage des DOPN, et notamment sur la possibilité de l'utiliser.

— Avec des annonces courtes (le PN EGDM)
— Avec une alarme au train « non permissive » au lieu d'une alarme « permissive »

### 8.5.2 Intérêt d'une condition de vitesse et danger de règles visant à trop réduire le nombre de « fausses alarmes »

Le détecteur d'obstacle testé par la SNCF (IHI LX3D, qui a été pris comme exemple dans cette étude) dispose d'une fonctionnalité qui permet d'éviter de donner une alarme, en début de cycle, si l'obstacle se déplace au-dessus d'une certaine vitesse.

Mais le constructeur conseille plutôt d'avoir une annonce de 45s ou plus, et d'avoir plutôt un système d'alerte au train qui minimise l'impact sur la régularité (par exemple, en autorisant une reprise de vitesse dès que l'obstacle n'est plus détecté pendant 1s), leur argument étant que cela simplifie les réglages par l'utilisateur avec une efficacité équivalente.

Pour évaluer cette proposition, on a simulé deux réglages d'un DOPN :

1. 5s de clignotement, condition de vitesse pendant 11s et ensuite alarme sans condition de vitesse, annonce totale entre 25 et 60s, fermeture des barrières de sortie neutralisées si obstacle
2. 5s de clignotement, alarme « suspendue » pendant 11s et ensuite alarme sans condition de vitesse, annonce totale entre 25 et 60s, fermeture des barrières de sortie neutralisée si obstacle

Pour les trains de voyageurs (figure 135) on voit que, comme le préconise la société IHI, ajouter une condition de vitesse n'a pas d'intérêt sauf quand la durée d'annonce est courte (EGDM). Dès une annonce de 36s, l'écart est négligeable.

Mais on a vu précédemment (figure 131) qu'un détecteur d'obstacle, même avec une annonce courte à 25s, est nettement plus efficace qu'un SAL 4 à 35s dans tous les cas pour les autorails du moins ; c'est le principe du PN EGDM développé aux USA, et évoqué plus haut : *l'intérêt d'une condition de vitesse est négligeable dans un montage DOPN de type « classique » allemand ou japonais, mais il est significatif en cas de montage type EGDM avec une annonce de 25s et encore sensible avec une annonce de 30s.*

En ce qui concerne les trains de fret (figure 136), l'influence de la condition de vitesse est beaucoup plus faible, parce que le temps d'établissement du freinage est voisin de celui de la 1re phase.

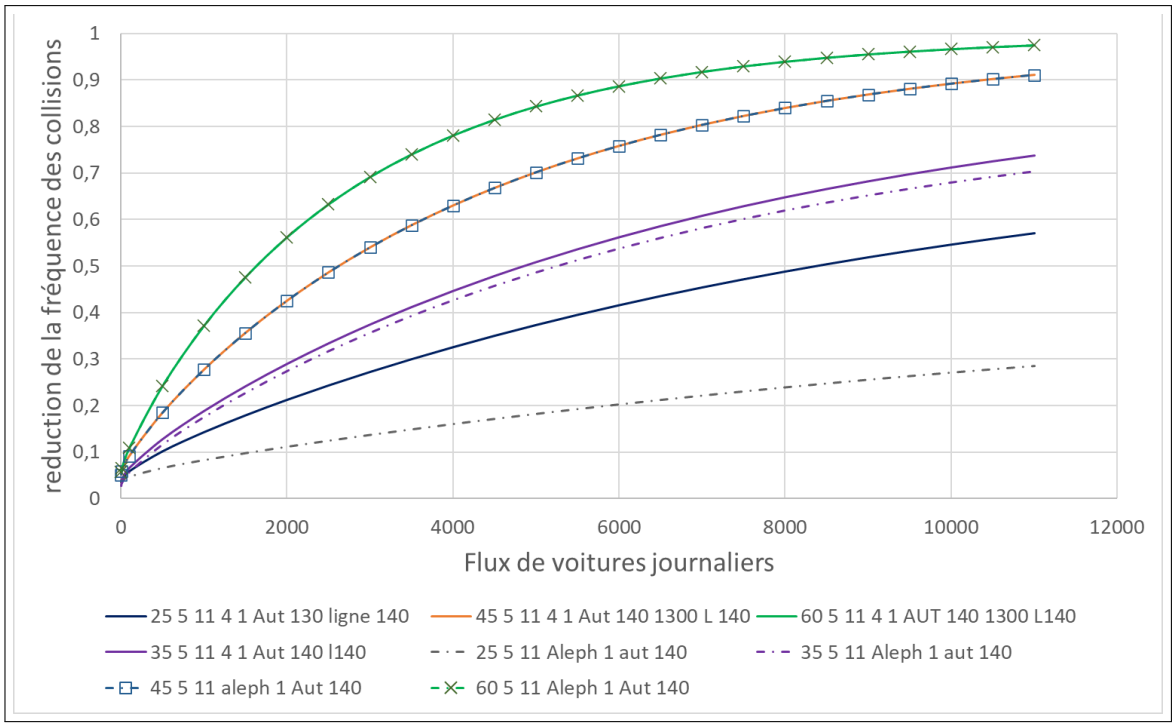



FIGURE 135 – Influence condition de vitesse sur Aut 140 1300 et, ligne V140. Modèle générique d'accidentologie aux PN

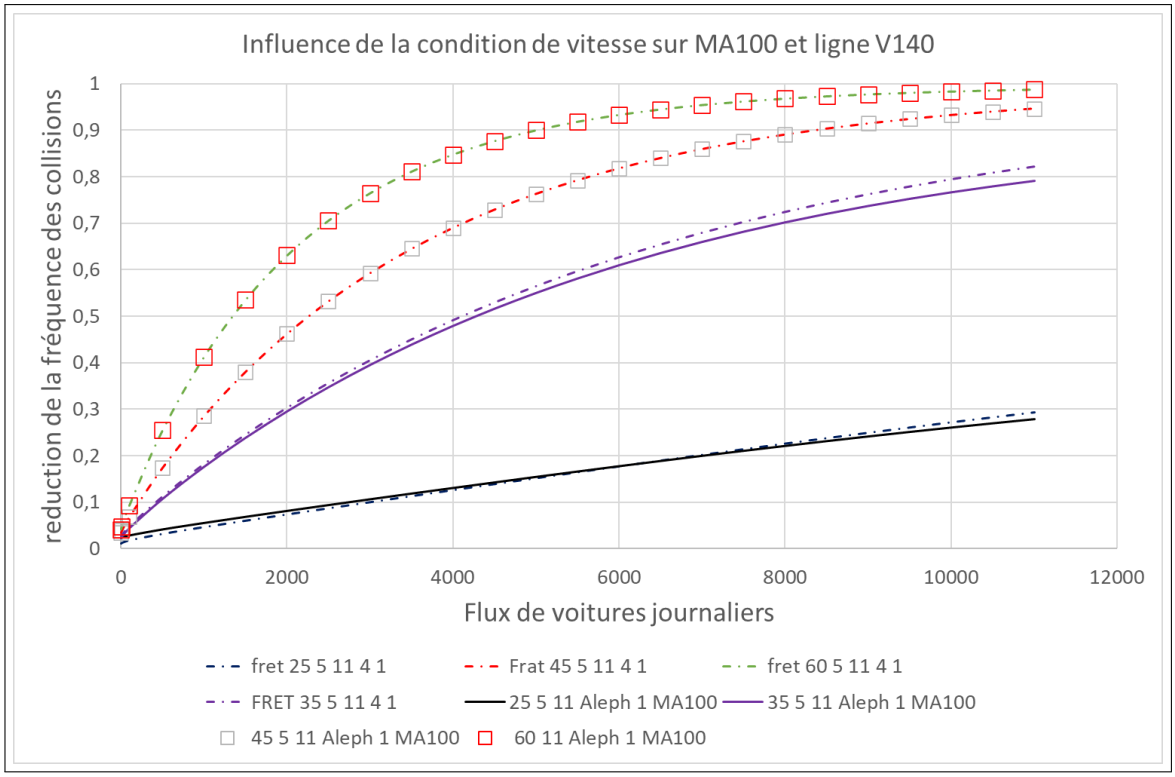



FIGURE 136 – Influence de la condition de vitesse sur MA100 et ligne V140, en fonction du flux de véhicule journalier pour des trains de fret (modèle générique d'accidentologie aux PN)

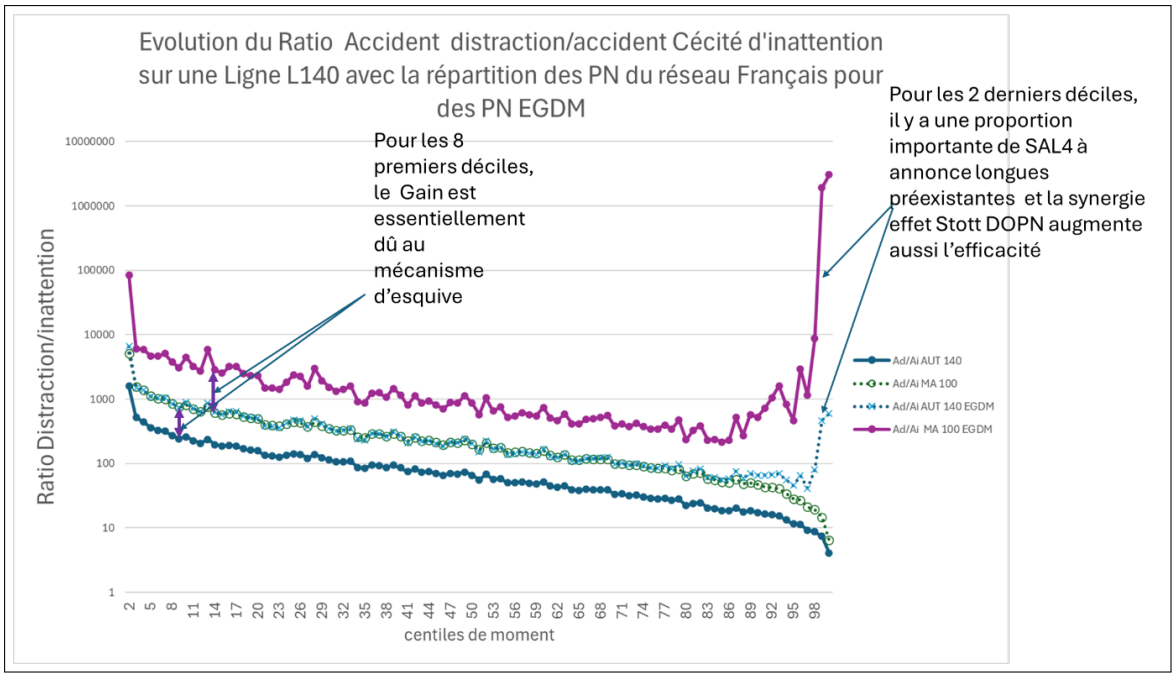



FIGURE 137 – Répartition sur le RFN du ratio Accidents de distraction/ accidents imprudence pour des PN EGDM (modèle générique d'accidentologie aux PN)

### 8.5.3 Fonction de transfert incidents/accidents pour les EGDM et les DOPN « classiques »et l'efficacité du mécanisme d'esquive

Le ratio accidents de distraction/accidents d'imprudence est plus élevé pour les PN EGDM (figure 137) que pour les SAL 2, même si l'annonce nominale est identique : en cas d'obstacle détecté, le train va ralentir, surtout pour les accidents précoces, souvent dus à l'imprudence, et $A_d/A_i$ va augmenter, parce qu'Ai va diminuer davantage qu'Ad.

Cependant, pour les derniers déciles, beaucoup de passages à niveau sont déjà des SAL 4, avec des annonces de 35 ou 45s. dans ce cas, $A_d/A_i$ prend des valeurs très élevées, d'où la remontée pour les derniers déciles.

Le DOPN classique à 45 ou 60s n'a pas été représenté parce que dans ce cas, le train est pratiquement toujours capable d'arrêter par suite d'un incident précoce, et que $A_d/A_i$ atteint des valeurs « astronomiques » qui n'ont plus de sens physique : le DOPN traditionnel est efficace à 100% sur les accidents d'imprudence, mais partiellement sur les accidents de cécité d'inattention.

### 8.5.4 Intérêt d'une ergonomie de conduite adaptée, impact sur la sécurité d'une alarme au train « permissive »

L'un des problèmes potentiels de l'acceptabilité des DOPN pour les exploitants ferroviaires est leur impact potentiel sur la régularité, d'autant plus que les incidents aux PN, même actuellement, ne sont pas neutres.

Mais réduire la sensibilité, trouver des « astuces » pour éliminer des alarmes marginales n'est pas forcément la meilleure solution, car elle implique un risque, plus ou moins important, de « passer » à côté d'une alarme qui peut entrainer un accident. En tout cas, ce n'est pas celle pratiquée par nos collègues utilisant les détecteurs d'obstacles, qui ont plutôt tendance à adopter des « alarmes permissives ».

En effet, les détecteurs d'obstacles aux PN ne sont pas efficaces à 100% : les DOPN sont des boucles de rattrapage, dont l'efficacité est, en fonction du flux de véhicules, entre 20 et 98%, mais dont l'efficacité de détection est nettement meilleure : Le détecteur d'IHI, qui a été le mieux étudié par la SNCF, a un taux de faux négatif de l'ordre de $10^{-5}$.

Prenons l'hypothèse d'un système de transmission au train à deux états, avec un taux de faux positifs (F ou HS au lieu de O) de $\epsilon_p$ et un taux de faux négatifs (O au lieu de F, contraire à la sécurité) de $\epsilon_n$ installé pour signaler l'état d'un DOPN (A ou Non A) et $E_0$ l'efficacité d'un DOPN « Parfait » (entre (0,1 et 0,99)).

La probabilité d'un accident sur un PN équipé de DOPN « parfait » par rapport à un PN non équipé serait

$$P_{accDOPN} = (1 - E_0)P_{accPN} \tag{8.1}$$

Avec un DOPN « Non parfait » qui aurait un taux de faux négatifs de $\epsilon_n$ (Chaîne de transmission plus DOPN) et en supposant que les événements faux négatifs et inefficacité DOPN soient indépendants, pour qu'il y ait accident, il faudrait que

- Soit le DOPN n'ait pas été efficace ($(1 - E_0)P_{accPN}$) parce que l'incident initial ait été trop tardif.
- Soit qu'il y ait eu un faux négatif ($\epsilon_N E_0 P_{accPN}$).

Autrement dit, l'efficacité du DOPN devient $E_1 = E_0(1 - \epsilon_N)$. L'autre question que l'on peut se poser est « FS et marche à vue, ou arrêt? FS ou FU? ». Compte tenu des règles de redémarrage après FU et de leur impact sur la régularité, la question ne se pose pas, et les calculs d'efficacité ont pris en compte un FS. Comme on a d'ailleurs pu le voir en comparant les AUT 140 1300 et les AUT 140 900, le gain d'efficacité du au FU est marginal lorsque l'annonce vaut 45s ou plus. En théorie, un véhicule ferroviaire en « marche à vue » est capable d'arrêter devant l'obstacle, ou du moins, que la probabilité de non arrêt soit faible ($\epsilon_{MV}$) devant 1. L'efficacité réelle du DOPN est donc :

$$E_2 = E_0(1 - \epsilon_N - \epsilon_{MV}) \approx E_0 \tag{8.2}$$

si $\epsilon_N + \epsilon_{MV} \ll 1$, ce qui est en général le cas. Par contre, en ce qui concerne l'impact régularité :

$$P_{fr} = (1 - E_2)P_{accPN} + (1 - P_{accPN})\epsilon_p \approx (1 - E_2)P_{accPN} + \epsilon_p \tag{8.3}$$

Avec un accident PN avec DOPN de l'ordre de $10^{-3}$ à $10^{-4}$ par an, il est inévitable que le DOPN ait un impact sur la régularité, et si on veut un taux de faux négatifs négligeable, le taux de faux positifs sera non négligeable.

**d'où la recommandation (conforme aux habitudes des réseaux utilisant les DOPN) de règles de conduites minimisant l'impact sur la régularité : le gain d'un FU (freinage d'urgence) ou d'un FS avec arrêt complet en cas d'alarme, en termes de sécurité, est marginal par rapport au gain FU ou FS et Marche prudente jusqu'au PN et arrêt uniquement si l'obstacle persiste, mais leur impact sur la régularité serait important, et hors de proportion avec le gain de sécurité.**

**La meilleure solution est bien de réduire l'impact sur la régularité d'un freinage par une ergonomie de conduite adaptée.**

# Chapitre 9

# Les extensions possibles du modèle générique d'accidentologie aux passages à niveau

## Table des matières


9.1 Extensions du modèle générique d'accidentologie aux PN . . . . . 216

9.1.1 Le comportement des conducteurs . . . . . 216

9.1.2 Le rapport $Cd/Ce$ : évaluation à partir du risque issu du retour d'expérience français . . . . . 218

9.1.3 Ce qu'apprend le modèle . . . . . 218

9.1.4 PN à SAL 0 . . . . . 220

9.2 Peut-on bâtir un modèle déductif d'accidentologie aux PN intégrant l'environnement routier ? . . . . . 220

9.2.1 Modélisations traditionnelles de l'erreur humaine : peuvent elle décrire la cécité d'inattention ? . . . . . 220

9.2.2 Les données issues de l'ergonomie routière . . . . . 221

9.2.3 Prise en compte de l'environnement routier . . . . . 223

## 9.1 Extensions du modèle générique d'accidentologie aux PN, aux PN à croix de Saint Andre ou aux PN à feux sans barrières

### 9.1.1 Le comportement des conducteurs

Malheureusement, il n'y a pas de relevés de comportement des conducteurs routiers analogues à ceux que Ci Liang a pu réaliser pour les SAL 2, dans le cadre de MORIPAN. De plus, le nombre de PN à croix de Saint-André est beaucoup plus faible, et leur accidentologie moins bien connue que celle des SAL.

La précision du modèle va s'en ressentir. Cependant, modéliser les PN à X peut permettre de mieux comprendre ces installations moins bien connues, mais dont on sait cependant que le danger de collision, rapporté au moment, est très élevé.

Par contre, on a pu constater que pour les PN à deux demi-barrières, le comportement des conducteurs de Perth, tel que mesuré par T. Radalj (RADALJ 2025), était identique à celui des conducteurs français. Faute de données françaises, on a donc testé la faisabilité d'un modèle portant sur les PN à Croix de Saint-André, en incorporant, comme comportement des conducteurs, les évaluations faites par (LARUE et al. 2018) et en les comparant aux exigences de visibilité de l'instruction ministérielle sur les passages à niveau.

> a) Le moment de circulation ne dépasse pas 3 000 ;
> b) Pour un observateur placé sur l'axe de la voie routière en au moins un point situé entre 3,50 et 5 mètres du rail le plus proche, et de chaque côté de la ligne ferroviaire, un train doit être visible de part et d'autre du passage à niveau sur une distance R, exprimée en mètres, de :
> R 1 = 0,8 F (n + 5,6) 1/2
> F représentant la vitesse maximum des trains sur la section de ligne, exprimée en kilomètre heure, et n le nombre de voies ferrées.
> Si le passage est notoirement emprunté par des véhicules routiers de longueur supérieure à 14 m ne pouvant pas franchir le passage à niveau à une vitesse supérieure à 15 kilomètres/ heure ou par des troupeaux groupant plus de huit bovins ou plus de 50 ovins, cette distance est :
> R 2 = (3,4 + 0,7 n) F
> Les distances R 1 et R 2 doivent être inférieures à 600 mètres.
> c) Pour un observateur se déplaçant sur la route sur une distance D mesurée en mètres à partir du rail le plus proche, telle que D = 0,01 V2 + 0,60 V, V représentant la vitesse routière sur le tronçon de route encadrant le passage à niveau exprimée en kilomètre heure, un train est visible, sans interruption notable, de part et d'autre du passage à niveau, sur une longueur L de voie ferrée exprimée en mètres de :
> L 1 = 0,28 F [(V + 100)/15 + n]
> lorsque le passage à niveau constitue un point singulier de l'itinéraire routier nécessitant une vitesse de franchissement n'excédant pas 30 kilomètres heure.
> Dans les autres cas, cette distance est :
> L 2 = 0,28 F [(V + 50)/15 + 0,5 n]
> d) Par exception, si la circulation routière journalière moyenne ne dépasse pas 10 véhicules et que la vitesse V définie ci-dessus est inférieure ou égale à 30 kilomètres heure, la condition de visibilité définie au paragraphe b est seule exigée. »

Pour obtenir un tel modèle, les hypothèses suivantes ont été retenues :

— La structure du modèle est identique à celui décrit précédemment pour les passages à niveau barrières.
— Pour l'annonce, il serait logique de prendre comme durée $\frac{1400m}{V(\frac{m}{s})}$ (pour des distances de plus de 1400 m, les conducteurs ne réagissent pas à la présence du train) mais l'arrêté ministériel prescrit des distances de visibilité nettement inférieures à celle de l'étude Australienne et précise d'ailleurs que les distances de visibilité MINIMUM doivent être Inférieures à 600 m (Voir tableau 10).

Concernant le comportement des conducteurs, (LARUE et al. 2018) avait établi la loi suivante (cf. figure 139) dont on peut constater qu'elle porte sur des distances beaucoup plus grandes que les distances de visibilité de l'arrêté ministériel (tableau 10, de 264 à 600 m en fonction de la vitesse ferroviaire et du nombre de voies).

| *V train* | *100* | *140* | *nombre voies* | *vitesses véhicules* |
|---|---|---|---|---|
| *R1* | 264,0 | 369,6 | 1 | |
| | 304,0 | 425,6 | 2 | |
| *R2* | 410,0 | 574,0 | 1 | |
| | 480,0 | 600,0 | 2 | |
| *L1* | 270,7 | 378,9 | 1 | 30 |
| | 298,7 | 418,1 | 2 | |
| *L2* | 312,7 | 437,7 | 1 | 60 |
| | 326,7 | 457,3 | 2 | |
| *L2* | 350,0 | 490,0 | 1 | 80 |
| | 364,0 | 509,6 | 2 | |

TABLE 10 – Distances de visibilité exigées dans l'instruction ministérielle sur les PN

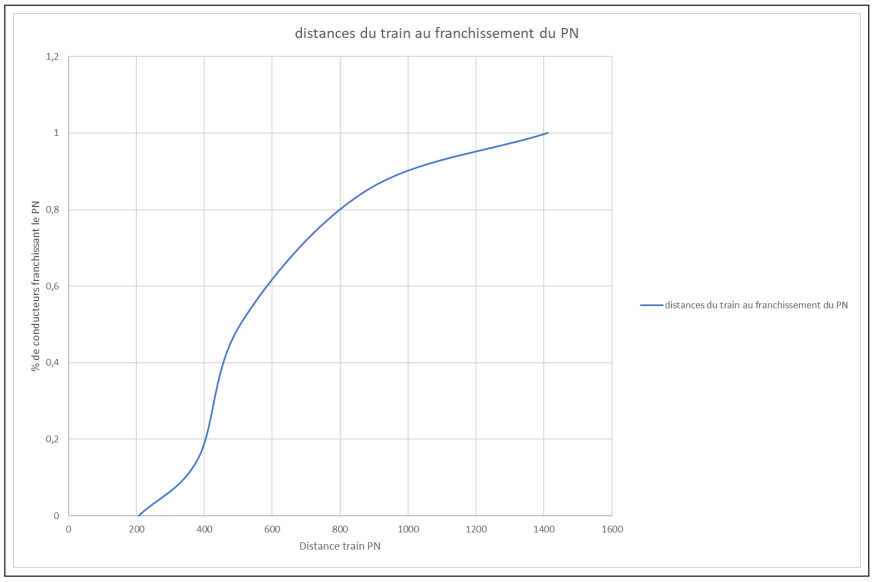



FIGURE 138 – Proportion de véhicules franchissant le PN en fonction de la distance train/PN (Adapté de (LARUE et al. 2018))

Le modèle intègre donc les hypothèses suivantes (tableau 11) :

- La distance de visibilité R2 de l'instruction ministérielle (y compris son plafonnement).
- Le comportement des conducteurs va correspondre à l'observation de LaRue ainsi modifiée :
  - Lorsque le train est à une distance supérieure à la distance de visibilité de l'instruction, 100% des usagers traversent.
  - À la distance de visibilité de l'instruction, et pour des distances inférieures, la probabilité que les usagers traversent est donnée par la courbe de LaRue.

| | V train/ N voies | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Distances** | 1 | 410 | 451 | 492 | 533 | 574 |
| | 2 | 480 | 528 | 576 | 600 | 600 |
| **Temps de Franchissement** | 1 | 14,8 | 14,8 | 14,8 | 14,8 | 14,8 |
| | 2 | 17,3 | 17,3 | 17,3 | 16,6 | 15,4 |

TABLE 11 – Distances de visibilité retenues pour le modèle pour les PN à croix de Saint-André

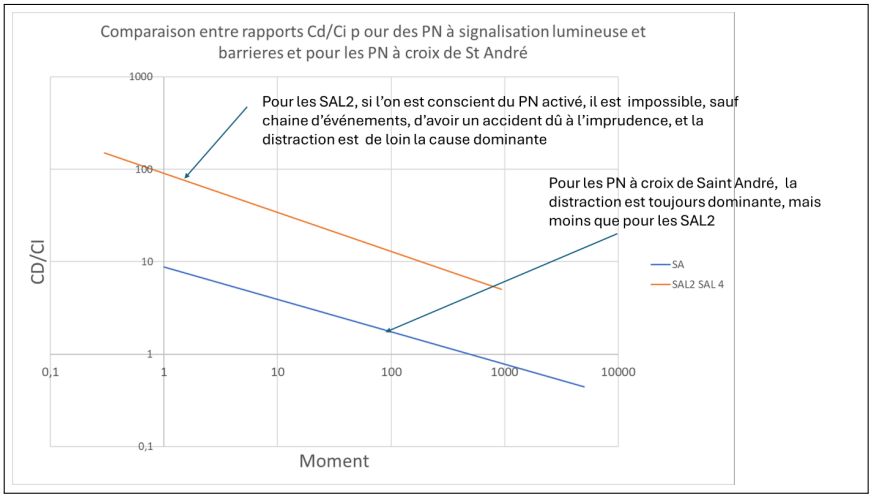



FIGURE 139 – Comparaison imprudence distraction entre PN à SAL et PN à croix de Saint-André – extension du Modèle générique d'accidentologie aux PN appliqué aux PN X

### 9.1.2 Le rapport $Cd/Ce$ : évaluation à partir du risque issu du retour d'expérience français

En utilisant les données du REX MORIPAN, et notre modèle un peu modifié, on peut reproduire la démarche du chapitre 5 et évaluer, pour les PN à croix de Saint-André, le rapport $Cd/Ci$

La première constatation (figure 139) est que, pour ces tout petits moments, l'accidentologie des PN à X est toujours dominée par la cécité d'inattention, mais que cette dominance est moins écrasante que pour les PN à SAL.

### 9.1.3 Ce qu'apprend le modèle

Contrairement aux SAL 4 et aux SAL 2, où le comportement des automobilistes (imprudence), et la cécité d'inattention sont identiques, dans le cas des PN à croix de Saint-André :

— Le comportement des conducteurs est substantiellement différent et donc le risque d'imprudence/erreur de jugement : dans le cas des PN avec barrières, il est dicté par l'anticipation de la fermeture de la ou des barrières. Dans le cas d'un PN à croix de Saint-André, il est dicté par la perception du risque lié à une vision du train, avec un jugement faussé par l'illusion de Leibowitz.

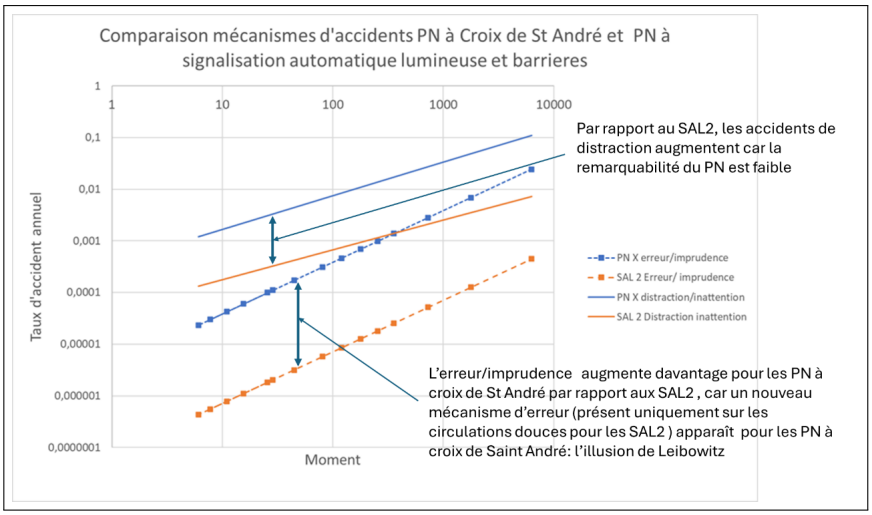



FIGURE 140 – Comparaison mécanismes d'accidents en fonction du type de PN – Extension du Modèle générique d'accidentologie aux PN appliqué aux PN X

— Alors que le risque d'imprudence/ erreur de Jugement est substantiellement plus élevé pour les SA que pour les PN à barrières, le ratio Cd/Ce est un peu moins élevé, mais dans l'absolu, Cd est plus élevé pour les PN à croix de Saint-André que pour les SAL 2 et 4 (la « remarquabilité » des PN est plus faible, à moment égal; pas de feux, pas de barrières) : *l'accidentologie est dominée par la distraction, mais un peu moins massivement que pour les SAL 2 (figure 140)*

—

Lors du projet MORIPAN, il avait été constaté que, contrairement aux SAL 2 et 4 où l'acc identologie issue du retour d'expérience pouvait se modéliser par une loi binomiale négative (LIANG 2018), l'accidentologie sur les PN à croix de Saint-André pouvait se modéliser par une loi très proche d'une loi de Poisson.

Les facteurs environnementaux et l'ergonomie semblent peu jouer sur le taux d'accident, de même que la vitesse, du moins pour les vitesses assez basses pratiquées sur ces lignes (figure 141).

L'influence de la vitesse du train est non significative pour les lignes dont la vitesse est inférieure à 100 km/h (ce qui concerne une proportion importante des PN à croix de Saint-André).

Au-dessus de 100 km/h le taux d'accident augmente, à la fois pour les autorails qui vont à la vitesse de la ligne (à cause de l'illusion de Leibowitz) et pour les trains de fret qui vont à une vitesse inférieure (le nombre de véhicules interférant avec le PN augmente, mais des mesures complémentaires du comportement des conducteurs seraient nécessaires pour valider ce point).

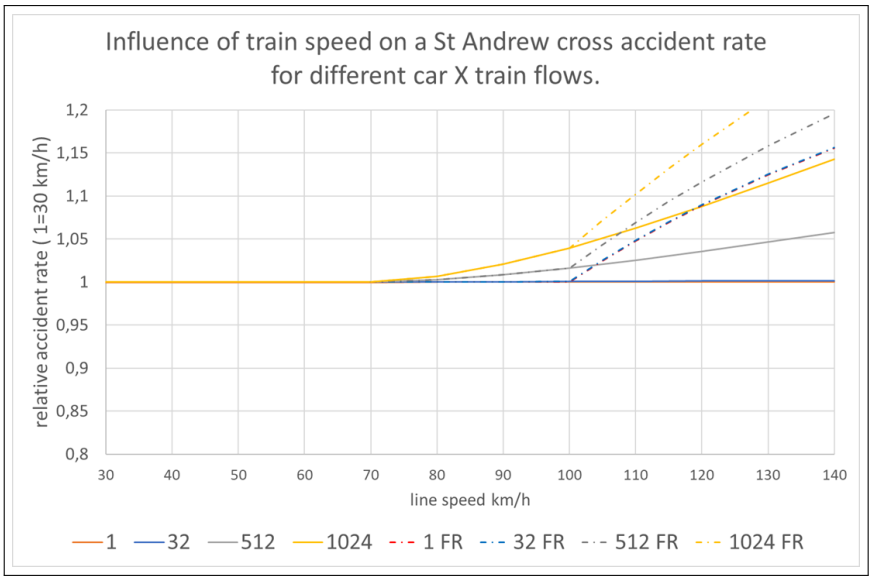



FIGURE 141 – Influence de la vitesse du train sur l'accidentologie aux PN en fonction du flux de véhicules et de la vitesse de la ligne – extension du Modèle générique d'accidentologie aux PN appliqué aux PN X

### 9.1.4 PN à SAL 0

En France, ces PN ne sont utilisés que pour les tramways. Il pourrait être possible de faire une modélisation de l'accidentologie si le STRMTG disposait des données de REX nécessaires.

## 9.2 Peut-on bâtir un modèle déductif d'accidentologie aux PN intégrant l'environnement routier ?

### 9.2.1 Modélisations traditionnelles de l'erreur humaine : peuvent elle décrire la cécité d'inattention ?

Afin de pouvoir mener des études probabilistes de sécurité, les ingénieurs ont développé deux techniques de modélisation des erreurs humaines.

- La plus ancienne est THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) (SWAIN et GUTTMANN 1983) – *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, Sandia National Laboratories*
  - L'efficacité de THERP repose essentiellement sur des tables « empiriques » de taux d'erreur, corrigées du contexte, du temps disponible, de la charge de travail, du stress plus que sur une théorie de la connaissance, ce qui limite son adaptabilité.
  - On dispose désormais d'un retour d'expérience important sur THERP (près de 40 ans) mais THERP a été conçu dans le cadre très particulier de l'exploitation d'une centrale nucléaire, avec des opérateurs formés, régulièrement contrôlés, opérant

dans le cadre d'une « High reliability organisation », avec une forte culture de sureté.

*Ces conditions sont très loin de celle qu'on rencontre pour la conduite automobile, avec une population beaucoup plus hétérogène et dont les conditions d'attention sont beaucoup moins favorables.*

— Une technique assez voisine est HCR (Human Cognitive Reliability model), lui aussi issu de recherches faites dans le cadre de l'exploitation de centrales nucléaires (Hannaman, Spurgin et Lukic 1984).

HCR est, par les hypothèses prises, un peu moins spécialisé que THERP, et donc un peu plus adaptable, mais il a été moins développé. *Il souffre du même inconvénient, en ce qui concerne notre problème : il est adapté à l'évaluation du risque d'une erreur humaine dans un contexte très particulier d'une organisation HRO, avec une forte culture de sureté et un monitoring par une autorité de sureté extérieure.*

Dans tous les cas, ces méthodes nécessitent une bonne connaissance empirique des taux d'erreur, et de la façon dont ces taux varient en fonction de la charge de travail et du stress de l'opérateur, du contexte, etc.

### 9.2.2 Les données issues de l'ergonomie routière

Il existe beaucoup d'études sur l'ergonomie routière. Mais très peu portant sur les passages à niveau, qui représentent un nombre d'accidents et de décès heureusement marginal.

Le premier modèle explicatif des mesures de comportement des conducteurs faites par Radalj à Perth et Ci Liang en France, avait montré que ce comportement n'était explicable qu'avec plusieurs hypothèses :

— Le ratio conducteur distraits/ conducteur alertés est très faible.
— La durée de visibilité des R 24 en « vision » centrale (valeur recommandée 5s) est trop faible pour les conducteurs distraits.

L'idée que la visibilité ou la remarquabilité des feux clignotants est insuffisante est d'ailleurs une idée répandue : On a vu que les JR-Central avaient multiplié les feux clignotants pour assurer une visibilité de ceux-ci pendant un temps suffisant, dans la zone de vision centrale du conducteur. Il n'y a pas de retour d'expérience publié sur ces installations mais la littérature ergonomique indique cependant :

— Que les feux clignotants (et encore plus « à éclats », comme sur les véhicules de secours) sont encore mieux perçus que les feux fixes.
— Que des changements dans la zone de vision centrale du conducteur pourraient être remarqués plus vite. Il n'y a pas de publications concernant les feux à éclats, mais concernant les feux fixes en vision centrale (par exemple montés sur portique plutôt que latéraux), ils pourraient réduire la fréquence d'accidents jusqu'à 90% dans certaines conditions (Wundersitz 2009)

| Level crossings | Types of protection | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Full barriers | | | Half barriers | | Traffic light signals only | Flashing lights | Without technical protection equipment | All types of protection |
| | With traffic light signals | Full barrier only | With flashing lights | With traffic light signals | With flashing lights | | | | |
| Without accidents | 88 | 39 | 6 | 234 | 156 | 9 | 12 | 530 | 1,074 |
| With accidents | 2 | 1 | 0 | 27 | 18 | 2 | 6 | 39 | 95 |
| All level crossings studied | 90 | 40 | 6 | 261 | 174 | 11 | 18 | 569 | 1,169 |

TABLE 12 – Extrait de (HANTSCHEL et al. 2016) *Sicherheit an Bahnübergängen*

L'utilisation de systèmes d'information avancés est aussi une idée courante. Cependant, la seule évaluation publiée dans (GREEN 2009) n'est pas concluante.

Les conventions routières autorisent, pour les feux des passages à niveau, soit des feux clignotants, soit une paire de feux fixes jaunes et rouges. Dans le monde, les feux clignotants semblent très majoritaires, et la littérature ergonomique va en ce sens.

L'Allemagne a basculée, dans les années 90, des feux rouges clignotants à deux feux fixes, mais n'a jamais publié de retour d'expérience, et il n'y a pas eu de retour d'expérience, ni de la DB, ni de l'EBA à ce sujet.

La littérature ergonomique routière indiquerait plutôt que les feux fixes augmenteraient le risque de « change blindness », la cécité au changement.

L'étude de l'association allemande des assureurs sur la sécurité aux passages à niveau donne cependant un élément intéressant (tableau 12) :

L'étude ne donne pas d'informations sur comment a été échantillonné la population des passages à niveau allemands, mais, si l'échantillon est non biaisé, la différence entre feux clignotants et feux fixes ne serait pas significative.

On peut cependant remarquer que le ratio « full barriers/half barriers » est voisin des autres statistiques publiées sur les PN allemands, que la répartition entre types de PN semble représentative du réseau DEUTSCHE BAHN et le nombre d'accidents (0,1 pour les demi-barrières, et 0,02 pour les 4 barrières avec détection ou garde), autorise à penser que l'observation a porté sur plusieurs années, de l'ordre d'une dizaine.

Dans ces conditions, on peut effectivement penser que l'échantillon est à la fois non ou peu biaisé, et qu'il porterait sur 4000 années PN environ.

Même si les détails manquent, cela confirme que l'écart feu routiers/ feux clignotants « classiques » est difficile à quantifier, mais qu'il semble peu significatif voire inexistant.

Peut-être parce que les feux clignotants ne sont pas assez intenses ou assez nombreux ou que la cécité au changement est minoritaire par rapport à la cécité d'inattention stricto sensu ?

En résumé, ce que l'on peut dire des données connues est :

- *Qu'à luminosité égale, il est probable qu'un feu clignotant soit moins sensible à la cécité de changement qu'un feu bicolore parce qu'il fournit plusieurs occasions de remarquer le changement.*
- *Que la luminosité des feux clignotants utilisés, dans certains pays du moins paraît un peu faible dans certaines configurations diurnes (luminosité intense, contrejour, etc.)*
- *Que la durée/distance de visibilité en vision centrale des feux clignotants parait un peu faible pour laisser à un conducteur distrait une chance de se reprendre et d'arrêter dans tous les cas en cas de PN activé.*
- *Que des feux « fixes » (et probablement aussi celle des feux clignotants) situés dans la zone de vision centrale seraient beaucoup mieux remarqués qu'en zone de vision périphérique.*
- *Qu'il pourrait être utile de travailler l'ergonomie des feux clignotants (feux à éclats plutôt que clignotants, visibilité dans toutes les directions d'approche, adaptation au fonds lumineux en cas de contrejour ou lumière rasante) et éventuellement de moduler la VMA (vitesse maximale autorisée) pour « viser » une durée de visibilité de 8s et un contraste important entre le « fond » et le stimulus visuel du R24.*

### 9.2.3 Prise en compte de l'environnement routier

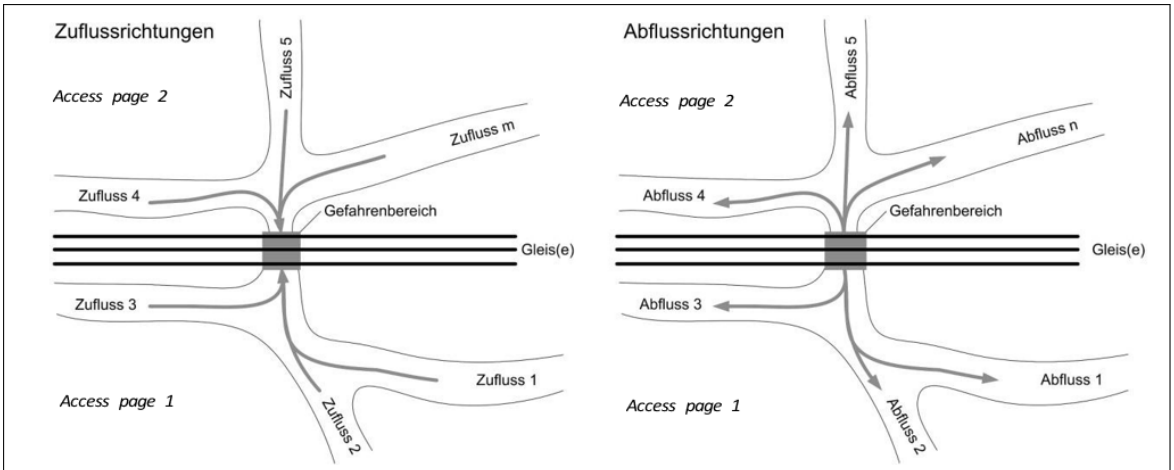
Cependant, l'ergonomie du passage à niveau lui-même n'est pas le seul élément, ni peut être le plus important : ce qui compte beaucoup c'est l'ergonomie globale du système incluant le PN, et aussi l'ensemble de l'environnement routier.

Une recherche bibliographique concernant les modèles prédictifs de fonctionnement des routes montre que ces modèles existent et ont été développés depuis de nombreuses années.

Cependant, ils ont été développés soit sur la base d'observations empiriques de configurations routières existantes, soit à posteriori (modèles statistiques de retour d'expérience), soit comme modèles probabilistes de Monte-Carlo, mais dans tous les cas, en utilisant des données de comportement de conducteurs issus d'observations.

En revanche, aucun de ces modèles n'intègre cette configuration très particulière de « carrefour » qu'est un passage à niveau, et les données observationnelles concernant les passages à niveau publiées sont relativement rares (Radalj, Liang) et ne recouvrent pas la totalité des configurations de passages à niveau que l'on peut rencontrer (Feux bicolores fixes en Allemagne, Arbres de Noel de feux clignotants au Japon)

Une exception est la thèse de E. Schöne (Schöne 2012) à l'université de Dresde « Ein risikobasiertes Verfahren zur Sicherheitsbeurteilung von Bahnübergängen » (« Une mé-




| Feature | Units/Characteristics |
|---|---|
| Road traffic volume | Road users per unit of time |
| Speeds of road users | km/h |
| Road layout in front of the level crossing | straight/curvy |
| Crossing angle | Degree |
| Distance to neighbouring traffic facilities | m |
| Right of way regulation at neighbouring traffic facilities | Ranking over other traffic flows |
| Visibility from the road to the level crossing | m |
| Visibility from the road to the railway line | m |
| Backup type | (see below) |

FIGURE 142 – Figure et paramètres utilisés dans la thèse de Eric Shöne « Une méthode d'évaluation de la sécurité des passages à niveau basée sur les risques »

thode d'évaluation de la sécurité des passages à niveau basée sur les risques ») qui présente un modèle analytique relativement complet de l'aspect routier du passage à niveau.

Malheureusement, le modèle d'E. Schöne est basé essentiellement sur une version « sophistiquée » du raisonnement du professeur Stott de 1987 : l'accident a lieu si le véhicule routier pénètre dans la zone dangereuse dans la fenêtre d'arrivée du train et le modèle consiste essentiellement dans une approche théorique du calcul de la probabilité et de la durée de présence du véhicule dans cette fenêtre.

Les principales notions et les paramètres de la thèse de E. Schöne sont présentés dans la figure 142.

Or, ce modèle n'est pas réaliste : les observations de la SNCF à Roissy-en-Brie, de JR EAST sur ses PN équipés de DOPN ont montré l'importance d'un mécanisme d'esquive, notamment pour les annonces longues comme en Allemagne.

De plus, le modèle d'E. Schöne répartit les accidents entre « intentionnel » (erreur de jugement) et non intentionnel (distraction) avec une clé arbitraire qui parait discutable, (voir tableau 13) et en tout cas incompatible avec les observations de Ci Liang et les retours d'expérience français, qui sont incompatibles avec les taux pris par Schöne.

| Mode of transport | **motorized** | | **non-motorized** | |
|---|---|---|---|---|
| Type of misconduct | **intentionally** | **unintentional** | **intentionally** | **unintentional** |
| Proportion of passive protection | 50% | 50% | 50% | 50% |
| Proportion of light signals | 90 % | 10 % | 90 % | 10 % |
| Proportion of half-barriers | 90 % | 10 % | 100 % | 0 % |
| Proportion of full barriers | 0 % | 100 % | 100 % | 0 % |

TABLE 13 – D'après la thèse de Eric Shöne « Une méthode d'évaluation de la sécurité des passages à niveau basée sur les risques »

L'approche d'E. Schöne semble cependant intéressante. Elle pourrait cependant être reprise lors de recherches ultérieures, si l'on arrivait à instrumenter un certain nombre de configurations de PN, des plus simples au plus complexes, et à obtenir des données statistiques suffisantes du comportement d'un conducteur dans une configuration complexe de PN pour pouvoir confronter le modèle et la réalité, et adopter des modèles plus réalistes.

En attendant cette collecte de données, on voit au chapitre suivant que, dans la continuité des travaux de Ci Liang(LIANG 2018), on peut utiliser le modèle générique comme estimateur de la dépendance du risque aux paramètres ferroviaires ($V$, $T$ et $Annonce$) et obtenir un modèle de risque d'un PN « individualisé » intégrant les paramètres d'environnement routier.

# Chapitre 10

# Ébauche d'un modèle bayésien d'accidentologie individualisé au PN

## Table des matières


10.1 Introduction et explication de la démarche . . . . . 229

10.2 Modèle actuel du guide 021 de l'EPSF . . . . . 229

10.3 Enrichissement mutuel des modèles probabilistes individualisés . . . . . 231

10.3.1 Une première tentative d'intégrer le modèle de Stott dans le cadre de MORIPAN 2018 . . . . . 231

10.3.2 Premier mode d'enrichissement mutuel : utiliser le modèle générique comme estimateur pour le modèle individualisé. . . . . 232

10.3.3 Ce que l'ébauche de modèle d'accidentologie individualisé peut apporter au modèle prédictif . . . . . 235

10.4 Identification des facteurs de risques non inclus dans le modèle d'accidentologie individualisé . . . . . 236

10.4.1 Comparaison avec la littérature technique . . . . . 236

10.4.2 Analyse de C. Liang et O. Cazier dans le cadre du projet MORIPAN. . 237

10.5 Élaboration du modèle d'accidentologie individualisé . . . . . 238

10.5.1 Voiries parallèles à la voie ferrée dans la trajectoire d'approche du PN sans carrefour (« S ») . . . . . 238

10.5.2 Carrefours à proximités du PN avec SAS, et rues parallèles . . . . . 239

10.5.3 PN à proximité d'une gare . . . . . 243

10.5.4 Variation de largeur de la voirie à proximité ou dans l'emprise du platelage du PN . . . . . 243

10.5.5 Profil difficile, dos d'âne, caténaire de hauteur réduite . . . . . 244

10.5.6 Grande ligne droite routière et PN peu remarquable (SAL 2, ligne non électrifiée) . . . . . 244

10.6 Première esquisse de modèle individualisé d'accidentologie . . . . . 244

10.6.1 Principe de Beccaria . . . . . 246

10.6.2 Principe de sécurisation d'un PN . . . . . 246

10.6.2.1 Encore une fois, l'importance de la cécité d'inattention . . 246

10.6.2.2 Ce qu'apportent les études des psychologues et des ergonomes sur la cécité d'inattention . . . . . 247

10.6.2.3 « Jouer » sur la conception du PN : Normalement fermé, EGDM ?, amélioration de la « remarquabilité » des PN activés . . . 249

10.6.2.4 « Jouer » sur la circulation routière : empêcher « physiquement » l'arrivée des véhicules vulnérables, réduire les franchissements tardifs des modes doux . . . . . 250

10.6.2.5 « Jouer » sur le plan de circulation, éliminer les risques « fréquents » concurrents . . . . . 251

10.6.2.6 Ajouter une boucle de rattrapage : le DOPN . . . . . 252

10.6.3 Une fausse bonne idée, les SAL 2 avec îlots ? . . . . . 252

## 10.1 Introduction et explication de la démarche

Dans ce chapitre, nous allons montrer qu'il est possible d'utiliser le modèle générique d'accidentologie aux PN comme estimateur du taux d'accident issu du retour d'expérience (basé sur les accidents 1993/2013 utilisé par MORIPAN) et utilisant les paramètres $Annonce$ (Annonce, en s), $T$ (le flux de trains journalier) et $V$ (le flux journalier de véhicules motorisés).

Liang (LIANG 2018) a montré que T et V n'étaient pas les déterminants principaux du risque de collision, et qu'intégrer dans l'estimateur :

— Un coefficient correspondant à la «sécurité routière générale» (équivalent au $C_i$ de notre modèle)
— Des paramètres de géométrie du PN

Améliorait fortement la précision **et étaient nécessaires pour envisager un modèle l'accidentologie propre à chaque PN.**

Cependant, la présente thèse suggère fortement que d'autres paramètres, par exemples relatifs à l'environnement routier pourraient être significatifs. Malheureusement, ces paramètres ne sont pas présents dans ARMEN, et les paramètres routiers sont probablement assez fortement « censurés » (au sens statistique) ou peu fiables.

*Ce chapitre inclura donc une « démonstration » de la faisabilité de l'utilisation d'un échantillon des PN pour introduire les paramètres manquants et proposer un premier « apriori » d'un modèle Bayésien d'accidentologie individualisé au PN, qui pourrait compléter celui établi par Liang en 2018.*

Cependant, la présente thèse s'arrête au niveau d'un démonstrateur : un modèle bayésien [1] comme celui proposé, représenterait à lui seul une thèse. De plus, si ce nouveau modèle devait intégrer de futurs types de PN comme les NFOD, les DOPN « classiques » et les PN « EGDM », il faudrait intégrer directement la simulation dans l'estimateur plutôt que de l'intégrer sous forme d'une corrélation.

## 10.2 Modèle actuel du guide 021 de l'EPSF

Actuellement, on dispose avec le guide 021 de l'EPSF (EPSF 2021) d'un document de référence permettant d'évaluer la « dangerosité » d'un passage à niveau, ainsi que l'efficacité probable de mesures compensatoires.

*Si le principe de la méthode paraît sain (comme on verra ci-après), certains éléments de la méthode proposée devraient être revus, et notamment l'influence de la fréquentation du passage à ni-*

1. Si l'on travaille au niveau d'un PN « individuel », la statistique classique a ses limitations, notamment liées au petit nombre de données. C'est une des raisons qui avaient amené Liang à proposer un modèle Bayésien, où l'on crée un « apriori » correspondant à l'état de l'art actuel, modèle qui « apprend » et s'améliore en intégrant au fur et à mesure les nouvelles données d'expérience.

*veau sur la dangerosité de celui-ci, qui est « hérité »d'une étude très ancienne SNCF Réseau/RFF des années 2000.*

Il ne semble pas que les hypothèses de cette étude aient été tracées, mais un certain nombre d'éléments indiquent que cette évaluation de l'influence de la fréquentation du PN, n'a pas été faite dans les règles de l'art par les auteurs.

— Tout d'abord, le résultat est une « probabilité » de décès, en fait, plutôt une espérance mathématique, et sans aucune indication sur la distribution de probabilité : rien sur la variance, le Kurtosis, l'asymétrie. On ignore en fait quelle est la loi de probabilité qui a servi à modéliser les PN, voire s'il y en a eu une.
— D'après quelques éléments recueillis auprès de l'EPSF et de la SNCF, les collisions ne semblent pas être un vrai comptage de collisions, mais une combinaison linéaire des collisions et de 10 fois le nombre d'incidents PN (type bris de barrière).
— Il semble aussi que l'évaluation ait été faite sur un échantillonnage assez réduit de PN, répartis dans plusieurs sous catégories, mais sans qu'il y ait eu vérification que l'échantillonnage soit représentatif, ni même en nombre suffisant.

Cependant, les études préliminaires faites dans le cadre du projet MORIPAN, sur la base du REX d'accident de la SNCF sur les années 1993/2013 ont montré :

— Que les décès présentaient une variance très importante, qui rendaient peu prédictif un modèle statistique. Exclure du modèle les Bus, Camion, SUV, transports routiers de Matières Dangereuses, ou les traiter à part atténue le problème, mais ne le supprime pas.
— Que les bris de barrière présentent eux aussi une variance extrêmement élevée, liée probablement à des hétérogénéités de la qualité des remontées d'information dans ARMEN.
— Que tout modèle statistique des décès, qui inclurait comme prédicteur d'accidents les bris de barrière en sus des collisions et qui prendrait en compte les décès routiers et ferroviaires de tous types de véhicules, a nécessairement une variance plusieurs fois égale à l'espérance. Autrement dit, une valeur prédictive extrêmement faible, un « aléa » sur la prévision très élevé par rapport à la valeur « moyenne » attendue (l'espérance) et un fort écart entre la valeur « moyenne » attendue, la médiane et le mode.

Si l'erreur due à l'analyse statistique ancienne est importante, elle pourrait être « acceptable » lorsque le projet porte sur la rénovation d'une ligne ou d'un groupe de lignes, et sur de nombreux PN, ce qui était le cas du guide 021 jusqu'à présent.

L'EPSF souhaitant étendre la validité du guide 021 à d'autres types d'opération, jusqu'à l'amélioration individuelle d'un PN, il y a dans ce cas un risque réel de distorsion des prévisions par rapport à la réalité.

Il semble possible, à partir des données du REX SNCF issues d'ARMEN :

— D'établir un modèle statistique (modèle d'accidentologie individualisé) de l'influence de la politique de sécurité routière, du flux de trains, du flux de véhicules et de la durée d'annonce basé sur une distribution de probabilité d'accident suivant une loi binomiale négative en utilisant notre modélisation [2].
— D'inclure dans l'estimateur des éléments comme la largeur, le type de platelage, etc. et, à partir d'un échantillon issu des données des rapports « Bussereau [3]» et d'éléments cartographiques, des éléments concernant la route et l'ergonomie routière.
— De proposer des extensions du modèle qui permettraient la prise en compte de solutions innovantes : PN normalement fermé, PN EGDM ou à détecteur d'obstacles « classique ».
— D'utiliser ces modèles comme apriori d'un modèle bayésien (Cf MORIPAN) qui pourrait à terme remplacer le modèle actuel EPSF du guide 021, avec une précision suffisante pour traiter le cas d'un PN « individuel ».
— Concernant la probabilité de décès, elle pourrait être prise en compte, au moins pour les accidents avec véhicules individuels par un estimateur de probabilité conditionnelle de décès une fois accident.

## 10.3 Enrichissement mutuel des modèles probabilistes individualisés type modèles de COX et des modèles prédictifs stochastiques ou de Monte-Carlo

### 10.3.1 Une première tentative d'intégrer le modèle de Stott dans le cadre de MORIPAN

Parmi les corrélations Accidents, T, V analysées dans le cadre de MORIPAN, il y en avait une issue du modèle initial proposé par Stott en 1987 (STOTT 1987).

Malheureusement, les corrélations obtenues étaient moins bonnes que celle, plus simple, finalement retenue.

La raison de cet échec est probablement à rechercher dans la complexité des phénomènes menant à l'accident de PN : coexistence de plusieurs mécanismes d'accident, mécanisme d'esquive interférant avec le mécanisme de protection prévu par Stott, etc

D'une manière plus générale, il semble impossible de définir a priori une forme de l'estimateur de l'espérance de collision, sauf à être guidé par un modèle prédictif : l'effet Stott est très fortement non linéaire, et les algorithmes de recherche d'estimateurs, y compris ceux basés sur la maximum de vraisemblance fonctionnent mal en cas de comportement fortement non linéaire (voir figure 143)

2. Le modèle générique a été conçu dans ce but, et peut s'implanter facilement sur un simple tableur.
3. Rapport « Bussereau » : rapport obligatoire d'inspection des passages à niveau en France

### 10.3.2 Premier mode d'enrichissement mutuel : utiliser le modèle générique comme estimateur pour le modèle individualisé.

Dans le projet MORIPAN, Ci Liang avait montré que les accidents de mode motorisés étaient très corrélés à la politique de sécurité routière, et notamment à la pression de répression des infractions : en fait, le niveau des accidents routiers de l'année était le principal déterminant du risque d'accident aux PN.

Nous allons donc adopter un estimateur proportionnel au nombre d'accidents routiers de l'année.

Pour évaluer l'influence du flux de trains, de véhicules et de la durée d'annonce, on peut simuler la variation du taux d'accidents, en utilisant un ensemble de classes « homogènes » de moment et comme estimateur du taux de collision, $E(Year, V, T, Annonce) = Corr(Year)Modle(V, T, Annonce)$ avec $Corr(year)$ la correction de proportionnalité du taux de collision routière au taux de collision des PN, et $Modle(V, T, Annonce)$ le modèle de risque générique.

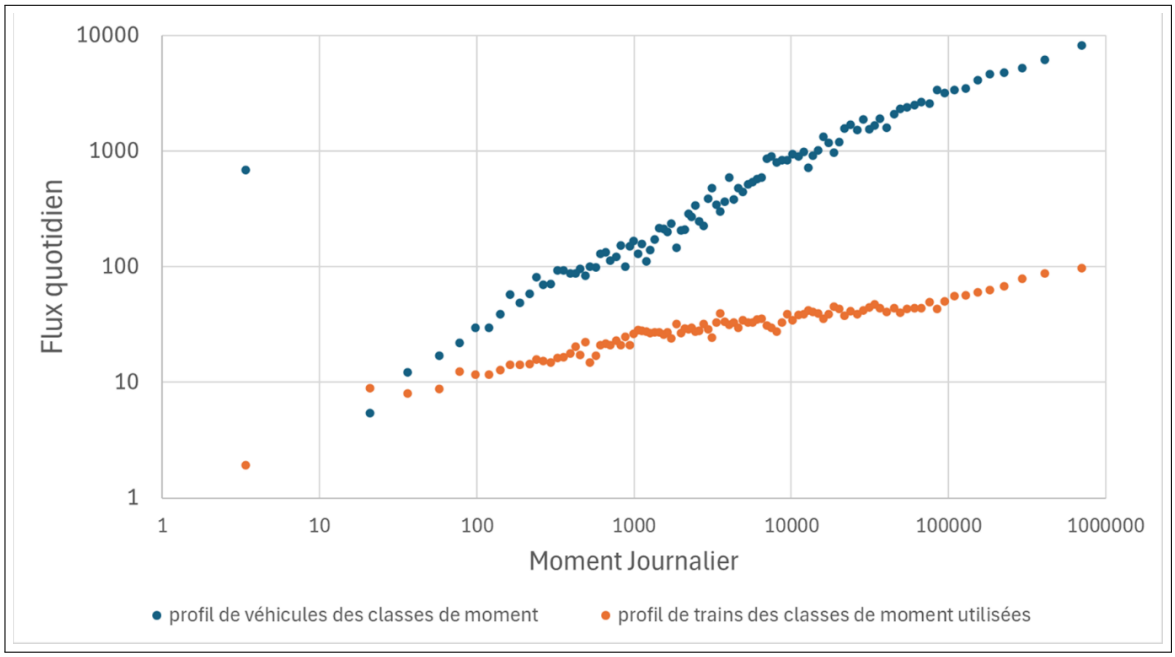



FIGURE 143 – Profil des flux de véhicules moyens et des flux de trains moyens des classes « homogènes » de moment utilisées pour la simulation et l'analyse du REX d'accidentologie aux PN

Les classes de moment utilisées correspondent aux centiles de la distribution des moments des PN à SAL.

Nous avons ensuite calculé pour chaque classe un estimateur de collision «issu du REX MORIPAN», très simple, avec pour l'instant uniquement le moment pris en compte (figure 143).

Nous avons comparé cet estimateur avec l'estimateur issu du modèle prédictif générique d'accidentologie au PN pour vérifier qu'ils étaient bien corrélés (figure 145)

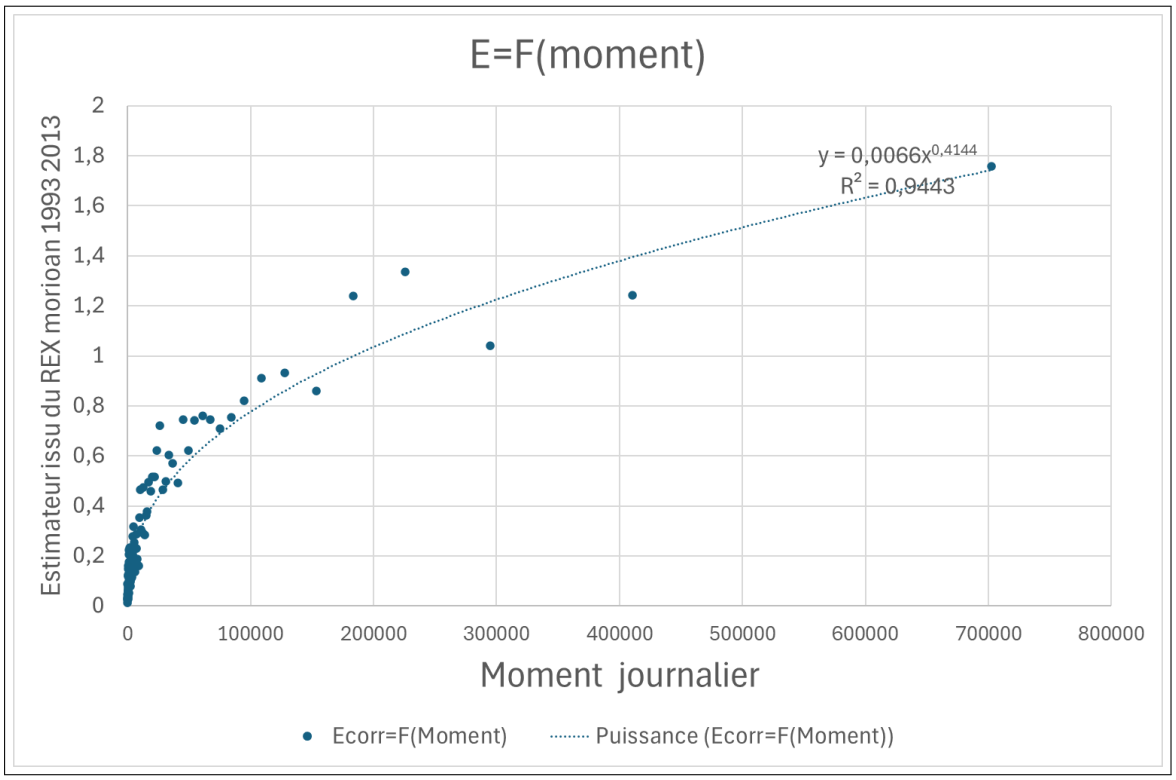



FIGURE 144 – Représentation de l'espérance évaluée sur les classes de moment de la figure 143 (données MORIPAN) – analyse du REX d'accidentologie aux PN

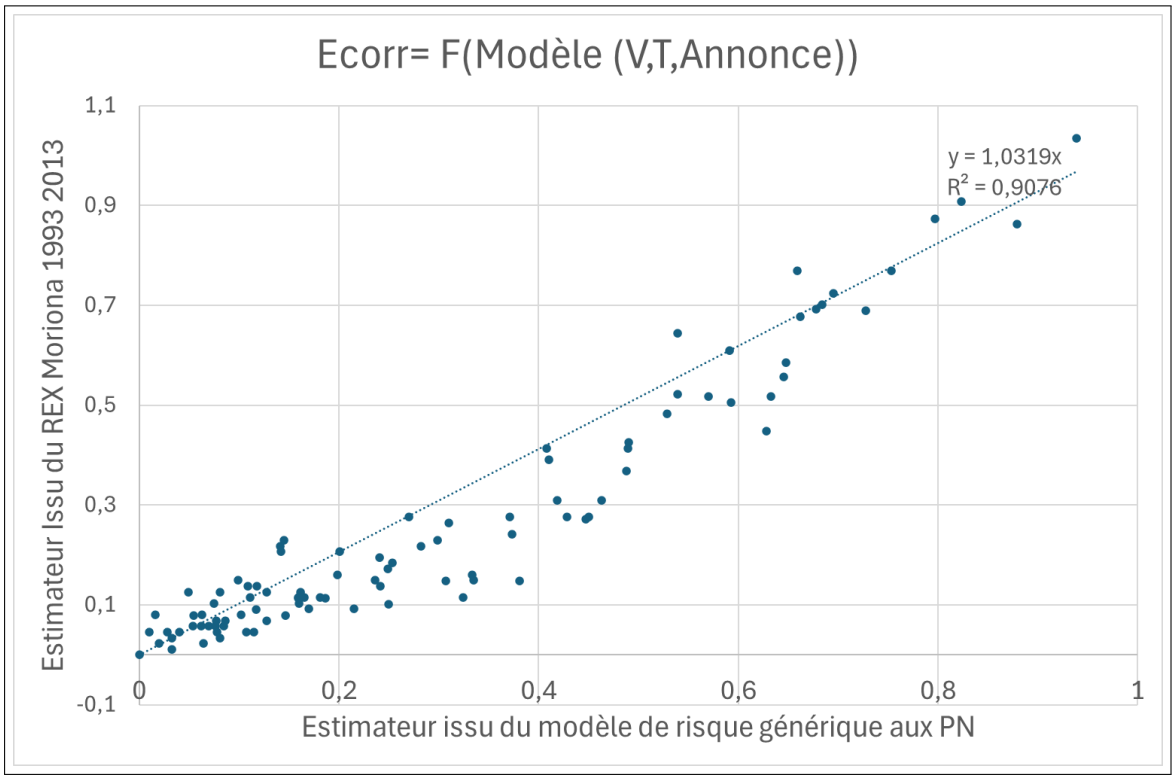



FIGURE 145 – Comparaison de l'estimateur issu du modèle générique d'accidentologie aux PN avec celui issu du retour d'expérience MORIPAN

Nous avons ensuite comparé l'estimateur issu du modèle générique avec la variance issue du retour d'expérience 1993 2013 de MORIPAN pour vérifier qu'il suivait bien, comme les estimateurs de (LIANG 2018), une loi négative binomiale.

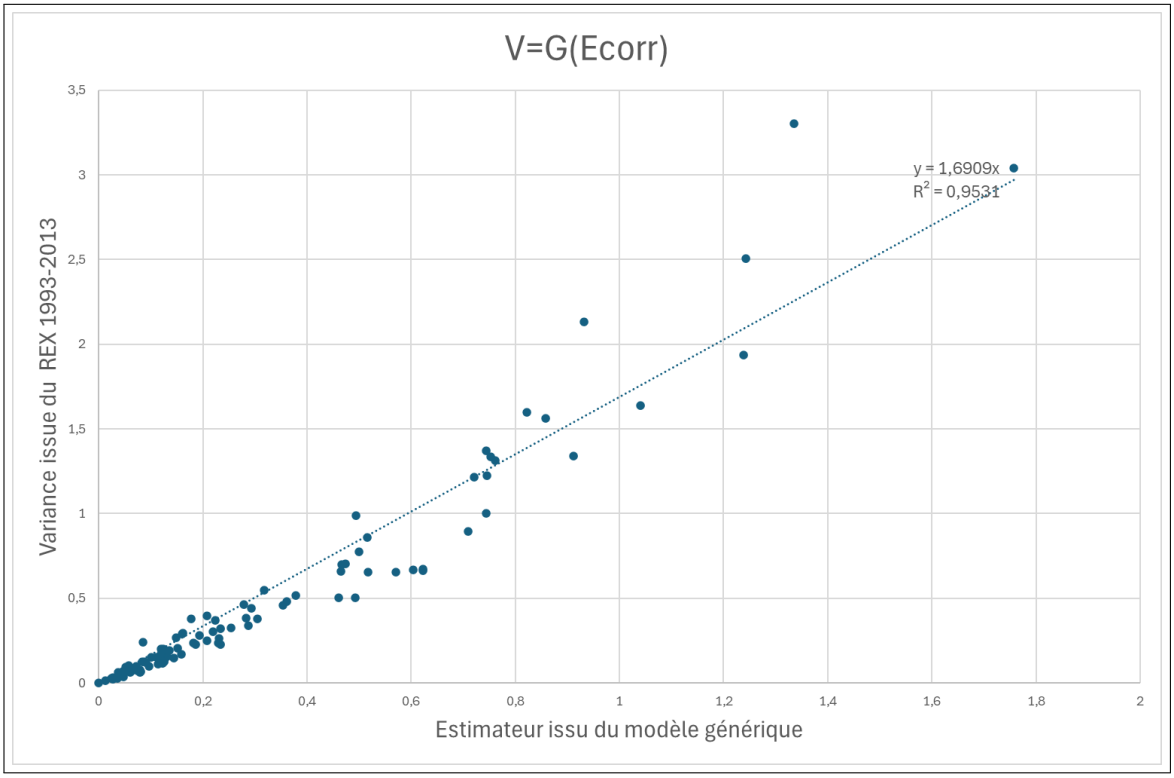



FIGURE 146 – vérification du respect des critères d'une loi binomiale négative pour l'estimateur du modèle générique d'accidentologie aux PN par rapport à la variance du REX MORIPAN

On constate alors (figures suivantes) que si l'on ne prend en compte que les caractéristiques T, V et la durée d'annonce « nominale », le risque aux PN est distribué selon une loi binomiale négative généralisée (loi de Polya) dont l'estimateur $\lambda$ est l'estimateur du modèle prédictif et dont la variance est $\frac{\lambda}{p} = 1,609\lambda$

Par rapport aux résultats obtenus dans MORIPAN, la surdispersion est plus importante : ce qui est logique, car MORIPAN intégrait, dans son estimateur, un certain nombre de paramètres routiers d'une part, que nous n'avons pas intégrés, et que d'autre part l'estimation porte sur 20 ans au lieu de 10.

Mais contrairement à MORIPAN, où on observait une corrélation entre Variance et Espérance relativement médiocre, et ayant tendance à s'affaiblir aux taux élevés (au-dessus de 0,05), la corrélation est correcte ($R2 = 0,95$) quel que soit le taux et elle intègre les SAL 4.

On sait que pour des événements discrets d'occurrence faible, leur distribution de probabilité converge vers une loi de Poisson : **pour un PN « individuel donné », avec des occurrences d'accident entre 0 et 0,1 par an, le risque de collision NE PEUT QUE SUIVRE UNE LOI DE POISSON d'espérance λ, car la loi de Poisson est la loi limite des lois discrètes dont l'espérance tend vers 0.**

Comme la variable aléatoire « accidents aux PN » est distribuée selon une loi de Polya (Loi NB généralisée à paramètres réels) d'espérance $\lambda$ et de variance $\frac{\lambda}{p}$, on peut démontrer que cette distribution est équivalente à une distribution de Poisson d'espérance $\lambda$, $\frac{\lambda}{\lambda_{moy}}$ étant lui-même distribué suivant une loi Gamma de paramètres $\alpha = \frac{p}{1-p}$ et $\beta = \frac{1-p}{p}$.

Le «mélange Gamma Poisson».

On peut donc interpréter cette loi Gamma de paramètres $\alpha = \frac{p}{1-p}$ et $\beta = \frac{1-p}{p}$

comme la distribution statistique du risque « réel » de collision aux PN par rapport au risque « moyen » donné par la corrélation issue du modèle statistique.

### 10.3.3 Ce que l'ébauche de modèle d'accidentologie individualisé peut apporter au modèle prédictif : la distribution de probabilité de l'influence des paramètres « non pris en compte » : configuration routière, hétérogénéité des circulations

Comme vu au paragraphe précédent, nous avons évalué la répartition de $\frac{\lambda}{\lambda_{moy}}$ sur l'ensemble de nos PN à SAL

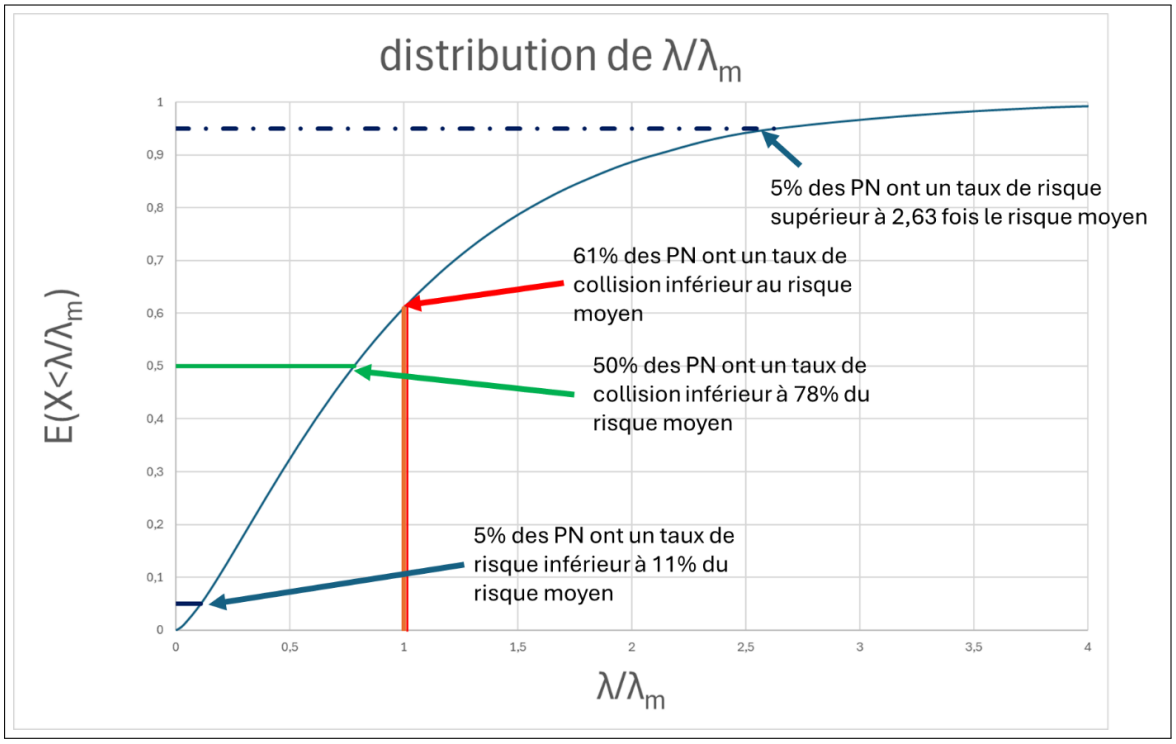



FIGURE 147 – Distribution du risque moyen sur l'ensemble des PN à SAL, issue du modèle générique et de l'interprétation du REX 1993-2012 de MORIPAN – Ebauche de modèle d'accidentologie individualisé au PN

Sur les ≈ 9000 PN à SAL actifs, incluant tous les PN à SAL,

— 5% (≈450) ont un risque « réel » inférieur à 11% du risque modèle, grâce à une configuration routière et des caractéristiques de trains particulièrement favorable (Marche

à vue ? FC ?), ou peut-être tout simplement parce que la durée d'observation n'était pas assez longue.
- 50% (≈4500) ont un risque inférieur à 78% du risque modèle
- 61% (≈5400) ont un risque inférieur au risque modèle
- 5% (≈450) ont un risque supérieur à 263% du risque modèle
- 1% (≈100) ont un risque supérieur à 384% du risque modèle

Cependant, concernant les PN à risque très faible, il peut s'agir d'un artefact : Le PN « moyen » présentant un accident par siècle, sur une observation de 25 ans, des PN ayant un risque nettement plus faible que le risque moyen (20% par exemple) présenteraient un risque de collision tous les cinq siècles, et l'analyse statistique pourrait suggérer qu'ils sont sans accidents.

En fait, l'analyse ci-dessus ne permet pas d'infirmer ni de confirmer l'existence d'un risque zéro, ni plus généralement d'évaluer la valeur minimale du risque s'il y en a une. Elle n'est « précise » qu'en zone centrale, pour les PN à risque très bas la quantité de données est insuffisante.

## 10.4 Identification des facteurs de risques non inclus dans le modèle d'accidentologie individualisé

### 10.4.1 Comparaison avec la littérature technique

Plusieurs études mentionnent l'influence des facteurs d'environnement sur le risque au passage à niveau.

Par exemple :

- Evelyn ZODTL (2004) : **Verkehrsunfälle auf eisenbahnkreuzungen in österreich : 1993-2002 - dringlichkeitsreihung zur sanierung der unfallstellen**. Thesis. Technische Universität Wien
  - Proximité du passage à niveau avec une gare et un point d'arrêt
  - Proximité du Passage à niveau avec un croisement routier
  - Carrefour avec une route prioritaire à proximité du PN
  - Croisement avec un angle aigu
  - Approche du PN en S
  - Mauvaise visibilité du PN
- Mohammad SHAHRIARI (1993) : **Safety at rail-road level crossings**. ISBN : 978-91-7032-842-8
  - Éblouissement par le soleil rasant à l'aube/crépuscule
  - Géométrie de la route complexe
  - Largeur de la route/Largeur du PN
- Jutaek OH, Simon P. WASHINGTON et Doohee NAM (1er mars 2006) : **Accident prediction model for railway-highway interfaces**. In : *Accident Analysis and Prevention*, **38** :2, p. 346-356. ISSN : 0001-4575. DOI : 10.1016/j.aap.2005.10.004

— Durée d'annonce
— Durée de clignotement
— Présence et proximité de commerces

### 10.4.2 Analyse de C. Liang et O. Cazier dans le cadre du projet MORIPAN.

En analysant les « corrections bayésiennes » entre l'a priori et l'a postériori du Modèle de Liang, on peut identifier un certain nombre de configurations particulièrement critiques :

— PN avec une ou plusieurs voiries parallèles à la voie ferrée dans les trajectoires d'approches (PN 11 Saint-Médard, PN 18 de Domene, PN68 Allinges).
— PN avec des carrefours proches et des SAS courts (PN 11 Saint-Médard, PN68 Allinges).
— PN avec une configuration routière d'approche complexe, notamment plusieurs voiries convergeant sur le PN.
— Risques routiers particuliers à proximité du PN : virages routiers serrés, réduction du gabarit de la chaussée à proximité ou dans l'emprise du PN, pente importante (PN 11 Saint-Médard, PN 68 Allinges).
— PN ou paire de PN avec gare ou PANG à proximité ou encadrées par les PN (PN 11 Saint-Médard).
— Variation de largeur de la voirie à proximité ou dans l'emprise du PN (PN 11 Saint-Médard).
— Dos d'âne (par exemple, Accident au PN 51 de Clerjus, PN 11 Saint-Médard sur Ille, PN 68 Allinges).
— Caténaires de hauteur réduite.
— Grande ligne droite routière et PN peu remarquable (SAL 2, ligne non électrifiée).

Certaines configurations temporaires (travaux à proximité du PN, événements festifs à proximité du PN) peuvent aussi modifier significativement le risque (PN11 Saint-Médard, PN 71 de Millau).

En annexe 13.5, le lecteur trouvera un résumé de l'analyse, à la lumière de MORIPAN et de la thèse, des rapports d'accidents du BEA-TT. Les rapports du BEA-TT ne portent pas sur un échantillonnage représentatif des accidents : les accidents de transports exceptionnels, de poids lourds, les accidents « graves » sont par nature surreprésentés.

Cependant, les rapports sont détaillés, et permettent une analyse a postériori de l'origine des accidents, dans beaucoup de cas.

Ces rapports sont cohérents avec nos hypothèses.

## 10.5 Élaboration du modèle d'accidentologie individualisé : une approche des effets de la géométrie et des flux de véhicules a partir des corrections bayesiennes de MORIPAN.

### 10.5.1 Voiries parallèles à la voie ferrée dans la trajectoire d'approche du PN sans carrefour (« S »)

Dans cette configuration, le PN n'apparaît dans la zone de vision centrale du conducteur routier que très tardivement.

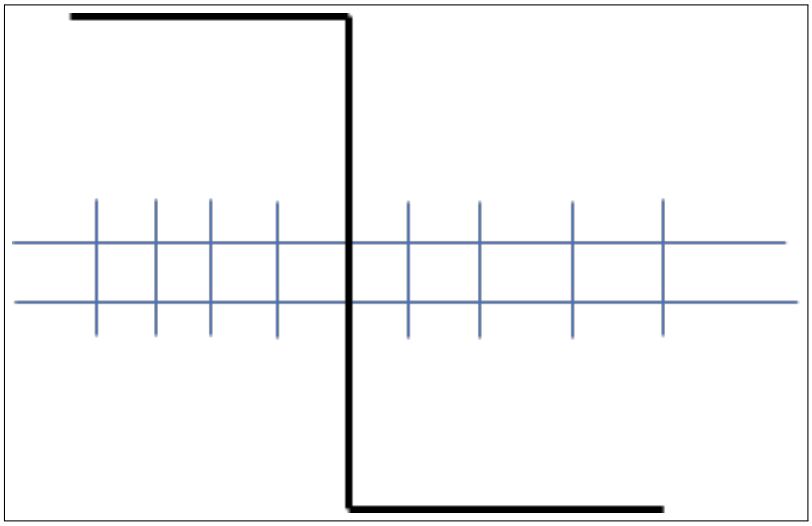


FIGURE 148 – PN « en S »

Les risques supplémentaires identifiés pour cette configuration sont essentiellement de type «cécité d'inattention», et relevant de deux causes :

1. Une vision parfois tardive du PN, qui pourrait augmenter le risque de « looked but not seen » pour des conducteurs peu attentifs. Le modèle routier au 4.2 de cette thèse a exploré ce point, et confirme que même si la distance de visibilité recommandée pour les signaux routiers en «vision centrale» est respectée, elle est probablement un peu faible pour un conducteur distrait dont le risque d'accident, suivant le modèle du 4.2 est au moins 10 fois plus élevé que pour un conducteur alerté.
2. La géométrie du tournant en aval du PN : si elle est difficile à négocier, notamment pour des véhicules à grand gabarit, le conducteur peut accorder l'essentiel de son attention au tournant, sans remarquer que le PN est fermé ou en cours de fermeture.

Des études allemandes (ERKE et WIMBER 1980) confirment le risque accru d'accident dans cette configuration.

Cependant, dans l'analyse des résultats d'accidents par Ci Liang, l'augmentation du risque paraît modérée, et beaucoup de PN avec approche en S sont, en l'absence de facteur de risque supplémentaire, à un niveau de risque égal ou inférieur au niveau du risque moyen, ce qui serait cohérent avec une augmentation du risque de l'ordre de 10% / 15%

pour la vision tardive du PN, ce qui correspondrait à un risque proche du risque moyen, probablement parce que, en l'absence d'un autre risque capable de détourner l'attention du PN, la proportion de conducteur «distraits» est faible.

Dans le cas où il s'agit simplement d'un problème de visibilité d'approche (pas de carrefour à proximité du PN par exemple, ni de difficultés de giration) on pourrait s'inspirer des pratiques japonaises à ce sujet : utilisation de feux R24 multiples ou utilisation de feux clignotants «multidirectionnels» avec une forte luminosité et une visibilité de l'ordre de 8s au moins dans les directions d'approches des véhicules.

Une autre approche, suggérée par le modèle du chapitre 4.2 pourrait être de réduire la VMA, les deux approches n'étant pas incompatibles.

Cette disposition, en l'absence de difficultés de giration, permettrait de supprimer le « sur-risque ».

L'impact de difficultés de giration est plus difficile à quantifier, car il peut varier de façon importante avec la géométrie de la route, mais aussi avec le type de véhicule. Dans certains cas extrêmes de tracé routier avec faibles rayons et fortes pentes, **il pourrait être très élevé.**

Deux possibilités de médiation permettraient d'annuler ce « sur-risque » :

1. Améliorer le tracé de la route
2. Lorsque ce n'est pas possible, interdire le PN aux véhicules à grand gabarit, sachant que l'expérience montre que ces interdictions sont efficaces lorsqu'elles sont appuyées par des moyens « physiques » (portiques G3) avec une possibilité de déviation sur un itinéraire adapté en amont du moyen physique et bien signalé.

*L'interdiction de véhicules à grand gabarit facilite aussi une réduction de la VMA, qui pourrait donner aux conducteurs distraits davantage de temps pour remarquer le PN activé*

### 10.5.2 Carrefours à proximités du PN avec SAS, et rues parallèles

Ce sont ces configurations (voir tableau 14) qui représentent une majorité des corrections bayésiennes « fortes » et qui correspondent à des risques compris entre le risque moyen et 200/250%, voire plus, du risque moyen.

Ces configurations regroupent en fait une synergie entre plusieurs types de risques :

- Pour les véhicules allant vers le PN à partir de voiries parallèles :
  - Le risque de visibilité tardif indiqué plus haut.
  - Le risque de cécité d'inattention accrue, notamment si le carrefour est difficile à négocier.
  - Le risque de remontée de files en cas de carrefour de l'autre côté du PN.
- Pour les véhicules allant vers le PN en provenance de la « route directe »

TABLE 14 – Inventaire des configurations accidentogènes d'environnement routier du PN

| **Configuration complexes voies ferrées / voies routière** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Type 1 | Côté 1 | Route // au PN puis tournant | | |
| | Côté 2 | Route // au PN, route Perp carrefour et tournant (1) | Route// au PN, route perp, carrefour, prolongement route // (2) | Route // au PN puis tournant (0, déjà analysé) |
| Type 2 | Côté 1 | Route // au PN, route perp, carrefour et tournant | | |
| | Côté 2 | Route // au PN, route perp, carrefour et puis tournant (3) | Route // au PN puis tournant (1) | Route// au PN, route perp, carrefour, prolongement route // (4) |
| Type 3 | Côté 1 | Route// au PN, route perp, carrefour, prolongement route // | | |
| | Côté 2 | Route // au PN puis tournant (2) | Route // au PN, carrefour et tournant (4) | Route// au PN, route perp, carrefour, prolongement route //(5) |

— Le risque de cécité d'inattention accrue par l'attention accordée aux véhicules pouvant provenir des routes parallèles.
— Le risque de remontées de file en cas de carrefour de l'autre côté du PN.

Le risque peut être aussi fortement amplifié si la voirie parallèles à la voie ferrée est prioritaire et le sas court.

Les combinatoires possibles étant résumées dans le tableau 14 et les figures schématiques suivantes :

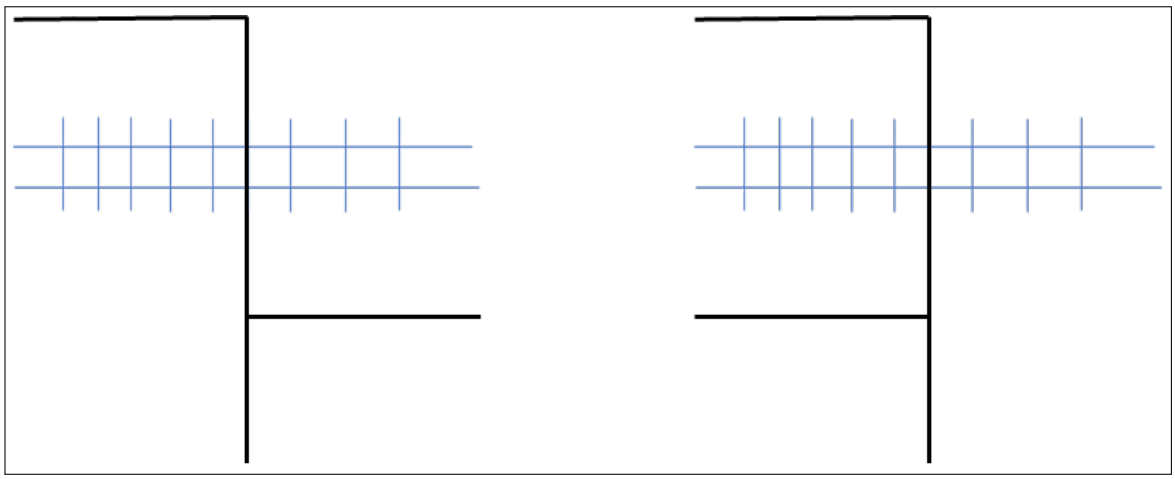


FIGURE 149 – Configuration complexe de type 2 et type 3

Dans cette configuration, on va retrouver les risques de la configuration précédente :

— Visibilité tardive du PN en vision centrale pour les véhicules en provenance de voiries parallèles.

— Difficultés de giration éventuelles pour certains types de véhicules.

Mais aussi d'autres sur risques :

— Risque de cécité d'inattention lié aux priorités routières au niveau du carrefour, le conducteur se concentrant sur un risque routier moins grave, mais plus fréquent et plus « familier ».
— Risque de remontée de files liées aux tournes à gauche sur voirie // (parallèles) de véhicules en provenance du PN ou à des problèmes d'encombrement, conflit de circulation au carrefour.

On rencontre fréquemment cette configuration sur des PN ayant un niveau de risque entre 100 et 150% du risque moyen, le niveau de « surrisquesur-risque » dépendant fortement des flux respectifs des différentes voiries, des plans de circulation et de la longueur du sas entre PN et carrefour.

Dans certains cas extrêmes, où la présence d'un carrefour se conjugue avec d'autres facteurs de risques (sas court, voiries étroites, variation de largeur de passage au niveau ou au voisinage du PN, travaux en Alternat pouvant induire des incompréhensions par les conducteurs) le risque peut être encore plus élevé **: c'était par exemple le cas du PN de Saint-Médard sur Ille (figure 150), avec deux accidents en 10 ans malgré un moment modéré, près de 20 fois le risque attendu.**

FIGURE 150 – PN 11 de Saint-Medard-sur-Ille (crédit photos BEA-TT)

Le PN 11 de Saint-Médard sur Ille était un cas extrême de configuration de type 1, avec un sas de longueur quasi nulle entre PN et carrefour, une variation de largeur de voirie au voisinage du PN, une gare à proximité, des travaux en Alternat. Avec ces caractéristiques, la probabilité « moyenne » de deux accidents en moins de 10 ans était de l'ordre de 1 sur 10000, mais, vu la configuration particulière du PN, elle était en réalité beaucoup plus élevée, sans doute plus de 20 fois (2000%) du risque moyen.

*Même si le modèle du conducteur routier du paragraphe 4.2 ne prenait pas en compte une configuration aussi complexe, il montrait cependant que le risque « conducteur surpris/distrait » était de l'ordre de 20 fois plus que celui du conducteur alerté : comme dans cette gamme de moments, l'essentiel des accidents est dû à la distraction, il suffit que le proportion (infime) de conducteurs distraits augmente de 10% pour que le risque d'accident double. À Saint-Médard, le risque observé au PN serait cohérent avec une proportion de conducteurs surpris/distrait double à quadruple de la moyenne, probablement encore trop faible pour être observée directement.*

C'est pour cette raison que, pour des configurations de type 1, ainsi que pour les autres configurations 2 à 5 ci-après, il est nécessaire de développer des méthodologies d'analyse adaptées aux spécificités des passages à niveau : les risques et les méthodes de remédiation, même si elles sont routières, ne sont pas celles d'un passage à niveau ordinaire.

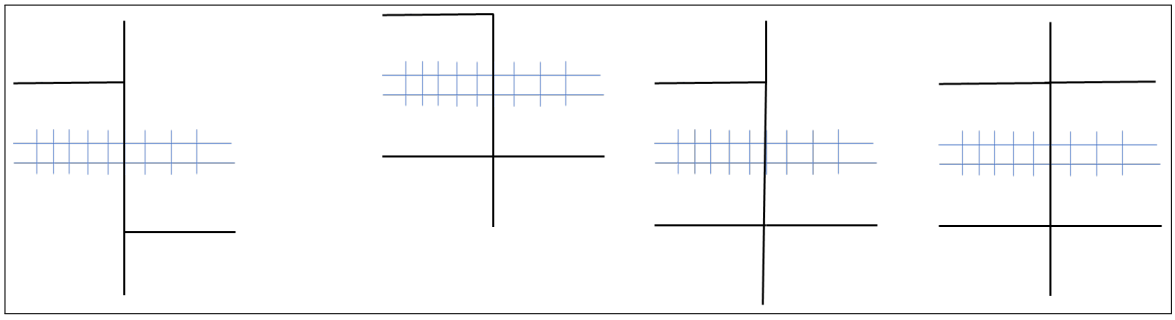


FIGURE 151 – Configurations complexes de types 2 à 5

Les configurations de type 2 à 5 se rencontrent dans des PN avec des corrections bayésiennes de risques de l'ordre de 100 à 200% du risque moyen.

Par rapport au type 1, elles n'introduisent pas de « nouveaux » risques, mais multiplient les points de conflits pouvant faciliter la cécité d'inattention, les tourne à gauche pouvant faciliter la remontée de files, les tournants pouvant entrainer des difficultés de giration. Un exemple extrême de difficulté de giration est l'accident du PN 18 de Domene, sur une configuration de type 4, où un transport exceptionnel, ne pouvant tourner facilement pour franchir le PN, a manœuvré sur celui-ci et s'est retrouvé piégé à l'arrivée du TER, et l'on rencontre assez souvent, dans l'analyse des accidents, le cas où un véhicule de grande taille manœuvre sur le PN, parce que le platelage de celui-ci est plus large que les voiries encadrantes [4].

4. Le cas où le platelage est plus étroit que les voiries est aussi accidentogène, avec plusieurs mécanismes possibles : Cécité d'inattention comme à Allinges, ou le conducteur a été perturbé par des véhicules arrivant en face, arrivée simultanée de deux véhicules lourds et négociation laborieuse du passage par l'un d'entre

De même que le type 1, la remédiation de ce type de surrisquesur-risques passe par une étude de sécurité routière, au cas par cas, effectuée par un bureau d'étude spécialisé, à l'image de ce qui se fait lors des projets de tramway.

Et rappelons encore une fois, qu'en matière de sécurité routière, l'interdiction est rarement efficace, quand elle n'est pas appuyée par des dispositions physiques empêchant ou gênant l'usage, mais on va aussi voir qu'en ce qui concerne les passages à niveau, ce n'est pas si simple.

### 10.5.3 PN à proximité d'une gare

Là aussi, dans les PN avec une correction bayésienne importante, apparaissent des PN à proximité d'une gare ou des couples de PN encadrant une gare. Cependant, de nombreux PN proches de gares semblent avoir un risque voisin, voire inférieur au risque moyen.

Cela peut s'expliquer de plusieurs façons :

- Tout d'abord, une proportion non négligeable de PN voisins de gare ont une configuration complexe, avec carrefours proches du PN et voiries parallèles dont souvent, la voirie donnant accès à la gare.
- La gare va exercer également une influence complexe :
  - Elle va entrainer, de façon limitée sur les véhicules motorisés, plus importante sur les piétons, des passages « un peu tardifs » du PN, avec une augmentation légère du risque véhicule, mais parfois importante du risque modes doux (en cas de fréquence de trains faible, de trains croiseurs sans arrêt)
  - Si la totalité des trains arrêtent en gare, elle va réduire sensiblement le taux d'accident avec des véhicules routiers (de l'ordre de 25/50%, quand le train qui redémarre a vue sur le PN notamment), mais elle peut au contraire l'augmenter quand peu de trains arrêtent, surtout si il y a dans les mêmes plages des trains croiseurs sans arrêt, un peu pour les véhicules, davantage pour les modes doux (où il y a à la fois une combinaison de l'illusion de Leibowitz, qui augmente le risque d'erreur de jugement, et de l'effet Beccaria), on privilégie un risque « fréquent », rater son train à un risque « rare » de se faire écraser, ce qui augmente fortement le risque de cécité d'inattention.

### 10.5.4 Variation de largeur de la voirie à proximité ou dans l'emprise du platelage du PN

Des corrections importantes sont aussi constatées lorsque la largeur de la voirie « utilisable » change au voisinage du PN voire quand la largeur « utile » du platelage est différente de la largeur utile de la chaussée.

L'analyse des accidents sur ces PN montre cependant une grande diversité de causes :

eux, stationnement au 1er endroit disponible juste après le PN avec arrière du véhicule engageant le PN, on en parle un peu plus loin.

— Des véhicules « longs » qui se garent en sortie du PN avec la queue du véhicule engageant le gabarit
— Des véhicules encombrants qui « choisissent » de se croiser sur le PN parce que le platelage est plus large
— Des véhicules longs ou encombrants qui s'engagent dans un PN étroit, parfois avec un tracé difficile ou un dos d'âne, et s'immobilisent sur le PN, souvent parce qu'ils privilégient un risque « fréquent » (frotter sur la chaussée, abimer son véhicule) à un risque « rare » (le choc au PN)

### 10.5.5 Profil difficile, dos d'âne, caténaire de hauteur réduite

Comme les dos d'âne étaient pris en compte dans l'estimateur de MORIPAN, ils n'apparaissaient pas dans les corrections bayésiennes.

L'analyse des accidents de PN montre une cause directe (les véhicules surbaissés) mais aussi une cause indirecte (cécité d'inattention, des véhicules franchissant le PN à vitesse très lente, le conducteur étant focalisé sur le risque d'abimer son véhicule sur le dos d'âne, et ne « remarquant pas » que le PN est activé

Le constat est pratiquement identique pour les caténaires et les véhicules encombrants de grand gabarit.

### 10.5.6 Grande ligne droite routière et PN peu remarquable (SAL 2, ligne non électrifiée)

Tous les auteurs s'accordent à dire que la cécité d'inattention est particulièrement fréquente dans deux cas :

— Lorsque la « charge de travail » est importante : on est dans le cas des carrefours complexes, des risques multiples et concomitants.
— Lorsqu'au contraire elle est très faible : conduite monotone, apparemment sans danger, qui « endort » l'attention.

On est ici dans le second cas.

## 10.6 Première esquisse de modèle individualisé d'accidentologie applicable à la géométrie et aux flux autour du PN

Pour une première tentative de quantification, et tout en convenant qu'elle n'est que préliminaire et qu'elle pourrait faire l'objet de recherches ultérieures, on peut regarder, sur l'échantillon des PN de 2.2.6 [5], quelle serait la distribution d'une « note géométrique » qui serait établie comme suit

— $\frac{2}{3}$ Pour un tracé difficile par sens
— $\frac{2}{3}(\frac{(100-D)}{100})$ Par carrefour et par sens

5. Base de donnée d'une centaine de PN représentatifs du réseau français décrits par O. Cazier

L'hypothèse sous-jacente étant que l'essentiel du risque est de type cécité d'inattention, que faute de mieux, tous les facteurs de risques sont équivalents, et qu'un risque de cécité d'inattention s'atténue en 5/ 8s

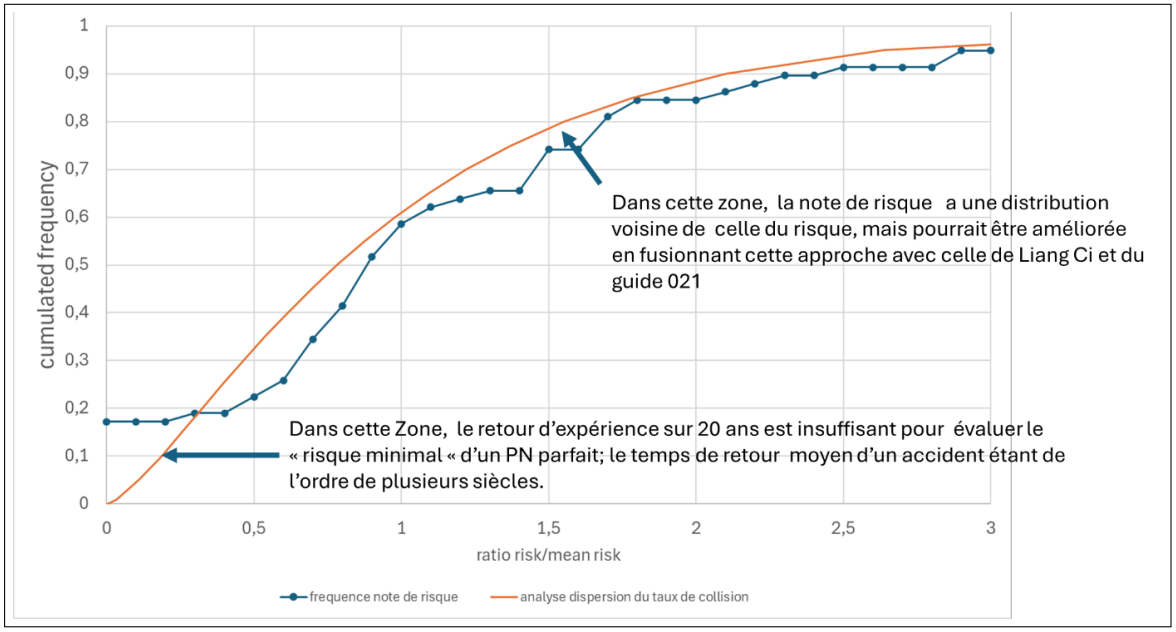



FIGURE 152 – Comparaison de la note de risque modélisée a priori vs la distribution du risque réel évalué, portant sur un échantillon d'une centaine de PN représentatifs du réseau SNCF – ébauche apriori du modèle d'accidentologie individualisé au PN

On voit que cette distribution (figure 152) est relativement proche de celle trouvée par l'analyse de la variance du Modèle individualisé, *sachant qu'une durée d'observation d'une vingtaine d'années est à priori insuffisante pour évaluer avec précision le risque sur des PN avec un risque de 0,2 fois le risque moyen, une collision tous les 500 ans, ce qui peut expliquer la divergence des deux courbes aux risques d'occurrence faibles.*

De même, faute d'information, cette note de risque ne prend pas en compte des éléments tel que profil difficile ou variation de largeur du platelage, dont on sait qu'ils interviennent à la fois sur le risque d'erreur de jugement, mais aussi sur la cécité d'inattention. Elle va donc « sous-estimer » le risque au PN, lorsqu'aux facteurs purement géométriques de tracé s'ajoutent des risques liés aux profil en long, à la variation de largeur, etc.

*Cependant, cette approche conforte les démarches types « guide 021 » de l'EPSF, mais en la nuançant et en suggérant qu'une approche « analyse de risque routier » permettrait de la simplifier et de l'améliorer.*

Mais comme on va voir maintenant, les remédiations classiques des carrefours routiers ne sont pas forcément adaptées aux PN.

Un rapprochement avec les méthodes de sécurisation des tramways pourrait aussi apporter des éléments d'éclairage, et confirmer l'analyse ci-dessous.

### 10.6.1 Principe de Beccaria

Les corrections bayésiennes, qui reflètent des augmentations fortes du risque de collision aux PN, peuvent en grande partie s'expliquer par le principe de Cesare Beccaria : les humains sous estiment l'importance de risques graves mais rares par rapport à des risques moins graves, mais plus fréquents, et dont ils ont pu avoir l'expérience directe ou indirecte.

Quand on a, au même endroit ou très proche, un risque relativement fréquent, plus ou moins grave, que ce soit un risque d'arriver en retard au travail et d'être mal vu de son chef, ou un risque d'accident matériel (rayures sur son véhicule à cause d'un dos d'âne, d'une berme, etc.), voire même de collision routière, et un risque rare et grave comme l'accident au PN presque toujours létal, une majorité, sinon la totalité des conducteurs vont privilégier le risque fréquent, dont ils ont l'expérience, soit directement, soit dans leur entourage.

Cela explique qu'une partie des recettes appliquées depuis 30 ans, sous l'influence de G. Wilde, et qui ont permis de réduire le risque routier ne fonctionne pas toujours dans le cas des PN.

Quand on crée un rond-point à l'anglaise, quand on implante des obstacles en ville pour créer des zones « apaisées », en général, cela réduit le risque routier, mais parce que sur les routes, la loi de Nillson s'applique, le taux d'accident et la gravité sont très fortement corrélés à la vitesse routière.

Malheureusement, il n'y a pas ou très peu de corrélation entre la fréquence et la gravité des accidents de PN et la vitesse routière, voire même une corrélation négative, quand un véhicule lent, lourd et long traverse à très basse vitesse un PN et une corrélation faible avec la vitesse ferroviaire (la fréquence ne dépend pas de la vitesse et la gravité va dépendre beaucoup plus de la position de l'impact et du type de véhicule que de la vitesse ferroviaire, sauf dans le cas de vitesses très basses)

*Au contraire, certaines dispositions « classiques » de sécurité routière visant à réduire la vitesse des automobilistes et à les inciter à la prudence pourraient même, dans le cas des PN, se révéler nuisibles, notamment si pour inciter à ralentir, on met des « obstacles » trop proches du PN et si ces obstacles accaparent l'attention des conducteurs aux dépens des PN.*

### 10.6.2 Principe de sécurisation d'un PN : rendre « proéminent » le risque aux PN par rapport aux risques « concurrents »

#### 10.6.2.1 Encore une fois, l'importance de la cécité d'inattention

Il ressort des considérations précédentes, ainsi que du modèle de comportement des conducteurs en 4.2 que même si la cécité d'inattention est un phénomène rare, elle se traduit par des intrusions tardives, et que dans ce cas, les mécanismes d'esquive sont

inefficaces, avec un ratio incident/accident beaucoup plus élevé que pour les erreurs de conduite.

Les modèles suggèrent qu'il suffit d'une faible variation, « non mesurable », de 10 ou 20% de la proportion de conducteurs « distraits » pour que le risque d'accident double, triple.

*Le taux d'accident est extrêmement sensible à la distraction, et une piste pour sécuriser le PN, c'est de se mettre en situation de conducteur, et d'éliminer systématiquement et le plus complètement possible tout ce qui serait de nature à concentrer l'attention du conducteur, au détriment du risque Passage à niveau, ou à l'inverse, de travailler l'ergonomie du PN pour rendre le risque PN plus « proéminent » et que l'attention du conducteur se « focalise » sur le PN.*

#### 10.6.2.2 Ce qu'apportent les études des psychologues et des ergonomes sur la cécité d'inattention

Même si, à ma connaissance, il n'y a jamais eu d'études spécifiques sur la cécité au changement/ Cécité d'inattention aux PN, il est possible de s'inspirer d'études générales pour identifier les paramètres sur lesquels on peut jouer

On peut citer par exemple les travaux de Michaela Porubanová-Norquist, et Radovan Šikl.

En analysant de façon quantitative les phénomènes de cécité au changement, les auteurs concluaient que :

- Un signal situé en zone centrale était perçu beaucoup plus vite et beaucoup plus surement que le même signal en zone périphérique, la distribution du temps de perception ayant à la fois une espérance significativement plus faible, mais aussi une variance nettement plus faible. Autrement dit, non seulement on remarque plus vite, mais il y a nettement moins de personnes qui mettent longtemps à remarquer le changement.
- Un signal transmettant un message « important » est là aussi perçu plus vite et avec beaucoup moins d'échecs qu'un signal considéré comme sans importance, que ce soit en vision centrale ou en vision périphérique.
- Un signal « attendu », probable est perçu beaucoup plus rapidement qu'un signal considéré comme improbable (ce qui est cohérent avec les mesures de temps de réaction utilisées pour le modèle du paragraphe 4.2).
- Un signal émergeant davantage par rapport au fond (background) est perçu plus rapidement.

Malheureusement, ni les articles, ni la thèse de Mme Porubanova ne donnent les détails des résultats et par exemple, s'il y a ou non synergie entre ces différentes caractéristiques, et on ne connait pas l'écart entre la perception d'un changement qui serait à la fois signalé en vision centrale, important et probable, et un changement périphérique, peu important et improbable.

| | Mean | Standard Deviation |
|---|---|---|
| *Centrality/ Marginality* | | |
| Central | 6.39 | 3.97 |
| Marginal | 14.56 | 7.77 |
| *Context Relevance* | | |
| Relevant | 4.09 | 2.65 |
| Irrelevant | 12.91 | 7.26 |
| *Probability* | | |
| Probable | 5.02 | 2.16 |
| Improbable | 13.35 | 7.81 |

TABLE 15 – D'après (PORUBANOVÁ et al. 2010) The role of various categories of changes in the inducement of change blindness.

On peut aussi utiliser la thèse et les travaux du Dr Marieke Martens, à l'université d'Eindhoven (MARTENS 2007). Les travaux du Dr Martens sont plus spécifiques de la sécurité routière que ceux de Mme Porubanova, mais en revanche, elle n'a pas étudié les délais nécessaires pour que l'on s'aperçoive d'un changement.

Mais elle a fait plusieurs campagnes d'observation, à la fois sur simulateur, mais aussi sur site réel, qui ont permis de confirmer l'importance et parfois de nuancer certains points, en ce qui concerne la cécité au changement et la sécurité routière :

- De la familiarité avec le parcours : lorsqu'un conducteur parcourt plusieurs fois un itinéraire, le risque de cécité de changement augmente rapidement avec les premiers parcours, puis plus lentement.
- De la vision « centrale » : la réalité semble plus complexe, car en fait, la région de visibilité centrale de l'œil a une étendue faible, et l'œil « scanne » son environnement, la zone de vision « centrale » étant plutôt celle où les scans sont plus fréquents et plus prolongés. Mais les observations confirment qu'on a plus de chances de remarquer un changement dans la zone « où l'on fait attention » et qu'on scanne plus fréquemment.
- De l'émergence du signal : plus l'émergence du signal est « brutale », plus le signal est différent du fond, plus le changement a des chances d'être remarqué rapidement : une petite modification d'un panneau passera inaperçu, un signal plus « important », répété sera remarqué.

Cependant, ces études permettent d'expliquer, au moins de façon qualitative :

- Pourquoi la cécité d'inattention/ cécité au changement est importante pour les accidents de PN, notamment le PN à faible moment (la rencontre avec le PN activé est peu probable, et il suffit de quelques passages sur le PN sans rencontrer de train pour qu'une « routine » s'installe.)
- Pourquoi la présence d'autres risques routiers plus fréquents augmente fortement le risque de cécité d'inattention au PN (le message PN activé est à la fois moins pro-

bable, mais aussi moins signifiant qu'un signal de risque avec lequel le conducteur est plus familier).

Et de fournir des pistes pour réduire le risque de cécité d'inattention, et donc le taux de collisions aux PN :

- Rendre le signal PN fermé plus « probable » : le PN normalement fermé.
- Rendre le signal PN plus « important » :
  - En augmentant le risque « subjectif » perçu par le conducteur : Exit Gate dynamic Mode.
  - En éliminant les risques concurrents susceptibles d'être perçus comme plus « importants » que le risque PN : travail sur plan de circulation, simplification d'environnement routier.
- Rendre le signal plus central (dans la zone de route la plus souvent scannée), et plus « saillant » par rapport au fond :
  - Amélioration de la remarquabilité du PN activé (mais pas forcément du PN lui-même),
  - Travail sur l'ergonomie des R24 : émergence (feux à éclats plutôt que clignotement « mou », adaptation de l'intensité à la luminosité de fond).
  - Nombre/position/directions pour couvrir les différentes directions d'approche et les diverses trajectoires/auteurs des conducteurs de tous les modes.

#### 10.6.2.3 « Jouer » sur la conception du PN : Normalement fermé, EGDM ?, amélioration de la « remarquabilité » des PN activés

Ces deux variantes de PN à barrières ont déjà été évoquées dans le chapitre modélisation de la thèse, mais on peut maintenant comprendre le mécanisme de fonctionnement : au lieu d'un risque rare, mais grave de collision au PN, on a un risque apparent plus fréquent, à savoir rayer sa carrosserie en heurtant la barrière, être enfermé entre les quatre barrières qui se ferment simultanément, et un risque de cécité d'inattention réduit.

Si notre modèle permet probablement un bon ordre de grandeur de l'efficacité du PN normalement fermé –de 60 à 70%, mais malheureusement, ce type de solution n'est possible que pour des flux routiers faibles, il est vraisemblable que l'efficacité d'un PN EGDM est sous-estimée (on trouve de 40 à 50% de réduction, alors que la FDA annonce 80%) : une expérimentation spécifique serait nécessaire pour vérifier un changement du comportement des conducteurs et une réduction du risque de distraction/cécité d'inattention.

De plus, les PN EGDM pourraient être très efficaces contre les risques associés aux modes doux, surtout si les barrières sont munies de jupes et les ouvertures autour des moteur « calfeutrées » (comme au Japon ou au Royaume-Uni) dans le cas de PN à proximité de gares.

*L'expérience montre en effet que contrairement aux véhicules motorisés, les modes doux contournent fréquemment les barrières (sous-estimation du danger à cause de l'illusion de Leibowitz) et que les*

*trottoirs sont bidirectionnels Les barrières de sortie, si possible équipées de jupes et une continuité de l'obstruction autour des moteurs et sur une distance significative le long de la voie permettrait à la fois de réduire la cécité d'inattention et, en rendant le franchissement plus difficile, de combattre la prise de risque.*

*De même, une amélioration de la remarquabilité du PN activé, par une étude de visibilité assurant qu'au moins un feu est visible 8s en vision « centrale « sur toutes les trajectoires d'approche de tous les types d'usagers, voire une adaptation de la luminosité du feu en fonction du background lumineux ou de la VMA en fonction de la topographie de la route d'accès devrait réduire le risque de cécité d'inattention.*

Pour un futur proche, deux innovations pourraient réduire de façon importante le risque de cécité d'inattention au PN :

— Concevoir les barrières des PN de façon à garantir une remarquabilité suffisante du PN du point de vue des ADAS, et notamment des lidars/radars à vision avant, utilisés pour les freinages d'urgence
— Envoyer sur les véhicules approchant du PN un avertissement quand le PN s'active

Les recherches du Dr Martens suggèrent**que, en complément des** DOPN**, ces dispositions permettraient une réduction de 90%** [6] ou plus du risque de collision sur les PN à faible moment mais équipé de DOPN pour les véhicules équipés d'ADAS (AEB : advanced emergency braking) si ceux-ci sont activés,*grâce à une forte synergie entre l'effet des DOPN (qui éliminent le risque d'accident de déclenchement précoce) et les AEB (éliminent les accidents à déclenchement tardif)*

#### 10.6.2.4 « Jouer » sur la circulation routière : empêcher « physiquement » l'arrivée des véhicules vulnérables, réduire les franchissements tardifs des modes doux

Lorsque les particularités du PN (largeur de platelage réduite ou variable, tracé routier très sinueux, dos d'âne) induisent un risque particulier pour une catégorie de véhicules (convois encombrants, bus, PL), il peut être utile, plutôt que de laisser le véhicules s'engager sur le passage à niveau, de l'empêcher « physiquement » d'y accéder : cela existe déjà pour les gabarit hauts (portique G3) mais on pourrait aussi imaginer un dos d'âne équivalent à celui du PN, implanté en Amont de celui-ci

Une précaution toutefois s'impose : aussi bien l'analyse précédente que les travaux des ergonomes routiers semblent montrer que, dans le cas d'un PN, si on crée un obstacle trop près du PN (portique G8 ou dos d'âne), il y a un danger que ce risque supplémentaire accapare l'attention des conducteurs, diminue la perception du risque PN et augmente la cécité d'inattention.

6. Evaluation « sommaire » d'après notre modèle routier en utilisant les observations du Dr M Martens pour estimer la réduction de « distraits » si un AEB prend le relais + le DOPN IHI 60 5 11 4 1

Les dispositifs de ce genre doivent donc être implantés sur les accès aux PN, mais suffisamment loin pour ne pas interférer avec la perception du risque principal : 8 VMA (VMA en m/s) pouvant être une référence.

Une exception peut concerner l'utilisation de jupes sous barrières, de barrières de sortie et de calfeutrement autour du PN, pour limiter le risque mode doux : ces dispositions :

— D'une part, ne risquent pas de « concurrencer » la perception du risque PN pour les véhicules motorisés, et pourraient au contraire rendre les barrières et leur mouvement à la dois plus visibles pour les conducteurs et pour les ADAS.
— Les trottoirs étant bidirectionnels, et les jupes/calfeutrement limitent fortement le risque distraction mode doux (selon des expérimentation américaines) mais aussi le risque d'erreur de jugement mode doux (en rendant plus « coûteux » le franchissement tardif.)

Une autre possibilité, qui a été testée récemment (2021/2023) par Infrabel serait la diffusion d'un message d'alarme aux utilisateurs de modes doux qui pénétreraient dans la zone dangereuse après activation du PN.

Il ne semble pas y avoir eu de publication officielle « scientifique » des résultats, mais le communiqué de presse d'Infrabel fait état d'une réduction de 50% des franchissements tardifs de modes doux. À confirmer qu'elle est pérenne sur le long terme.

#### 10.6.2.5 « Jouer » sur le plan de circulation, éliminer les risques « fréquents » concurrents

On a vu précédemment que les configurations routières peuvent jouer de façon importante sur le risque de collision au PN.

En complément de l'approche « top down » du guide 021, on peut utiliser une approche « bottom up » de ce risque, basée à la fois sur les corrections bayésiennes de Moripan et sur les analyses du Bea-TT, et qui suggère que les facteurs principaux qui expliquent les PN à risque élevé sont caractérisés par :

— Soit la présence d'un autre « danger routier », plus fréquent que le risque PN, dont le conducteur a davantage l'expérience, et que le conducteur va prioriser au détriment de sa perception du risque PN (c'est le cas le plus fréquent, et explique le danger élevé des configurations routières complexes)
— Soit une « opportunité », par exemple un élargissement du platelage au niveau ou au voisinage du PN, qui vont entrainer des comportements de type « utiliser le PN pour se croiser avec un autre PL, car c'est le seul endroit ou un croisement est possible dans la zone », ou « se garer pour gérer un problème » lorsqu'il n'y a pas d'autres possibilités de garage
— Soit par des facteurs liés directement au risque cécité d'inattention/cécité au changement ; longue ligne droite croisant une ligne ferroviaire secondaire non identifiée, publicités, travaux à proximité du PN)

#### 10.6.2.6 Ajouter une boucle de rattrapage : le DOPN

Cette solution a déjà été abondamment décrite dans les chapitres précédents, et on efficacité constatée à plusieurs reprises, au Japon en 1996, en Suède en 2004.

Moyennant une durée d'annonce supérieure ou égale à 45s (pour une durée de clignotement de 5s), l'efficacité est de 100% sur les accidents dus à l'imprudence, et de 10/40% pour les accidents liés à la cécité d'inattention, soit entre 20 et presque 100% pour des trains de voyageurs, en fonction de l'annonce et du flux véhicules.

Le DOPN peut aussi être utilisé pour réaliser des PN EGDM comme aux USA, notamment à proximité de gares.

### 10.6.3 Une fausse bonne idée, les SAL 2 avec îlots ?

Dans la liste des solutions proposées pour réduire le risque aux PN, le lecteur sera peut-être surpris de ne pas retrouver les îlots de part et d'autre du PN.

Il y a plusieurs raisons à cela :

— La première est que les observations de MORIPAN n'ont pas mis en évidence de « vraies » chicanes, uniquement des passages tardifs en début de fermetures des barrières, et que les chicanes avérées semblent un phénomène rare, que l'on ne constate qu'en cas de « panne » du PN (raté d'ouverture prolongé, train stationnant dans zone d'annonce, etc.)
— La seconde est que les statistiques d'accident du RFN ne montrent pas de différence significative entre SAL 2 avec et sans îlots.

De plus, l'analyse de certains accidents, comme Millas suggère que les îlots peuvent participer au processus conduisant à la collision, notamment quand ils réduisent la largeur de chaussée utilisable, et que le conducteur se focalise sur le risque de monter sur l'îlot plutôt que sur l'activation du PN.

De plus, parmi les accidents analysés par le BEA-TT, le seul cas de chicane avéré concerne un PN SAL 2 équipés d'îlots (Voir annexe 13.5.10)

Ceci amène aux deux conclusions suivantes :

— *Ne jamais mettre d'îlots sur des SAL 2 lorsque la configuration routière est complexe et qu'il y a des routes parallèles à la voei ferrée.*
— *D'une manière générale, être prudent sur l'usage des ilôts, ne les utiliser que sur des PN simples, des voieries larges, ou encre mieux, ne pas les utiliser*

# Chapitre 11

# Les synergies entre traitement de PN voisins

## 11.1 Effet population

### Table des matières

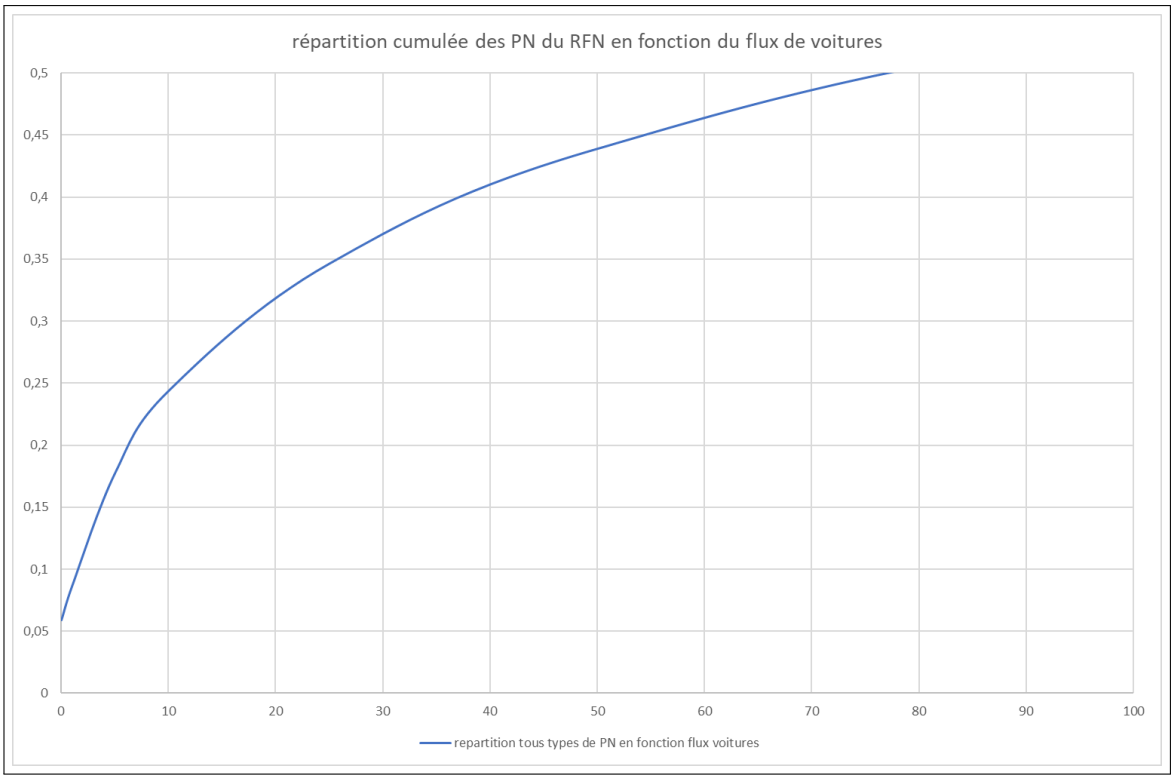



FIGURE 153 – Répartition des PN à faible flux de véhicules sur le RFN

Jusqu'à présent, les PN ont été pris « individuellement », et on a cherché des solutions « individuelles »

Mais en réalité, sur certaines lignes de « dessertes fines des territoires » où l'on n'a pas investi depuis longtemps, la densité des PN peut être élevée, et les moments de ces PN très faibles, notamment en ce qui concerne les flux de véhicules.

Lorsqu'on regarde tous les PN du RFN (cf. figure 153) et non plus les seuls PN à barrières, près de 9% des PN ont moins d'un véhicule routier/jour en moyenne, et près de 24% des PN ont moins de 10 véhicules jour, et 50% moins de 80 véhicules/jour. Par ailleurs, un véhicule jour en moyenne, cela veut dire que les utilisateurs du PN sont peu nombreux, et que pour supprimer le PN, il suffit de supprimer le besoin. L'auteur de cette thèse a pu le constater dans les années 93/97, où, en tant que responsable ingénierie régionale, puis de la division des investissements de SNCF réseau, il a pu supprimer de nombreux PN, essentiellement en achetant un champ d'un cultivateur habitant de l'autre côté qu'il revendait ensuite à un riverain du bon côté, un coût de quelques milliers d'euros, plus parfois des négociations assez longues.

D'autres PN ont pu être supprimés en détournant, sur quelques dizaines ou centaines de mètres, un chemin agricole.

À titre d'exemple, sur la ligne Dreux Granville, il a été possible de supprimer près de la moitié des PN, pour un montant inférieur à la modernisation/adaptation au changement

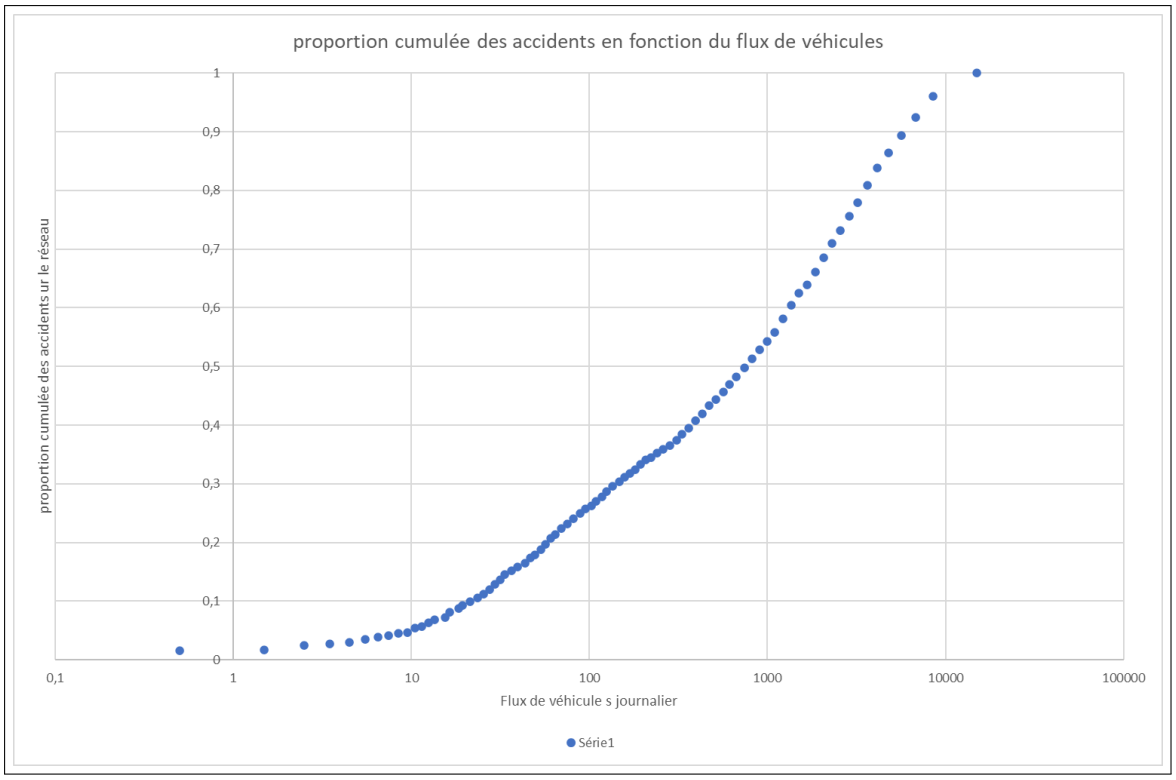



FIGURE 154 – Répartition des accidents en fonction du flux de véhicules sur le réseau ferroviaire français

de vitesse et à l'entretien capitalisé sur 20 ans de ces PN, essentiellement par remembrement, parfois par détournement, donc sans coûts supplémentaires pour le ferroviaire.

Certes, la démographie était favorable (ligne située dans une zone peu dense, beaucoup de PN à croix de Saint-André, beaucoup de PN avec un très faible flux), et il a été possible à la fois d'y consacrer des moyens humains dans le cadre d'un projet de modernisation, et de bénéficier de l'aide et de la bonne volonté du conseil régional, des conseils généraux, de beaucoup de maires qui ont accepté d'être maître d'ouvrage des détournements routiers et d'un jeune directeur départemental de l'équipement de l'Orne, qui en a assuré la maîtrise d'œuvre.

Mais, sur le réseau, et comme le montre la figure 157, *on pourrait raisonnablement penser qu'avec un minimum de bonne volonté des intervenants routiers, on pourrait supprimer par « remembrement » de l'ordre de 10% des PN et par détournement de l'ordre de 15% (25-10) de nos PN, sous réserve, pour ces derniers, qu'il y ait un OA existant ou un PN à proximité.*

Certes, le moment de ces PN est faible, mais ils représentent quand même plus de 5% des accidents comme on le voit sur la figure 154, qui représente la proportion de collisions sur les PN en France en fonction du flux routier du PN.

Un point important : *L'expérience personnelle, en Normandie, de l'auteur de cette thèse, confirme que, s'agissant de travaux routiers, la SNCF est loin d'être la mieux placée pour effectuer ces travaux. L'idéal est une maîtrise d'ouvrage assurée par la collectivité gérant la route, et une maîtrise d'œuvre*

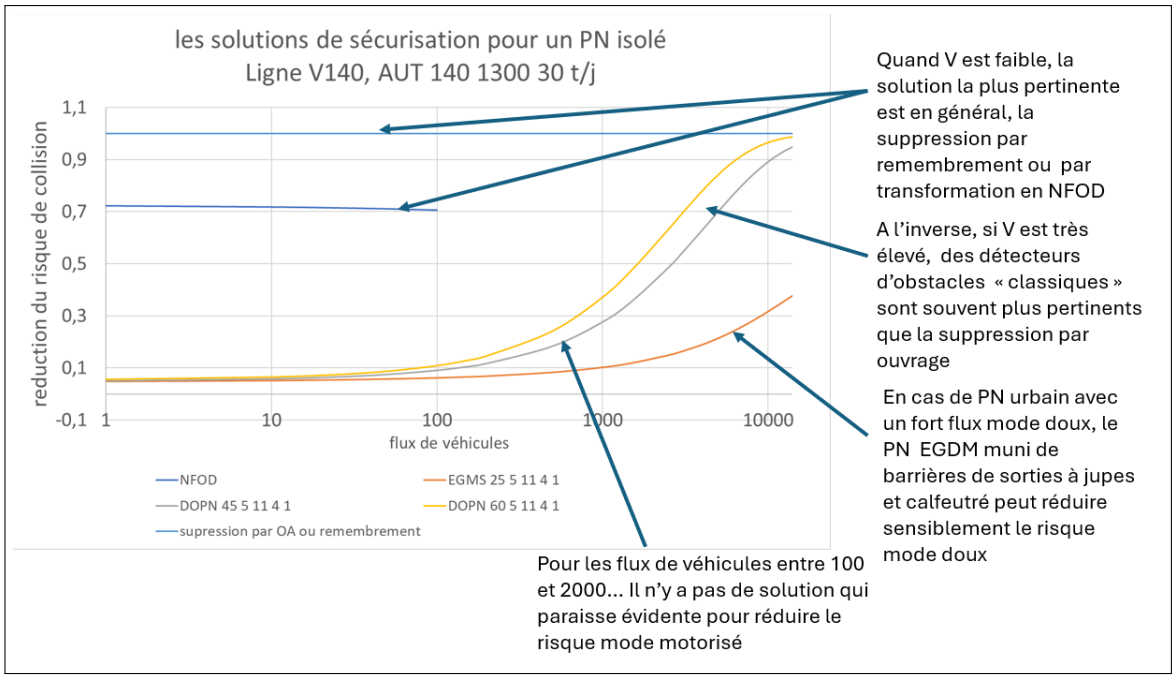



FIGURE 155 – Solutions possibles de sécurisation d'un PN pris «isolément» – Modèle générique d'accidentologie aux PN

*routière : SNCF réseau dont les moyens sont très limités, et qui n'a pas de compétences routières particulières, n'ayant qu'un rôle mineur (dépose du platelage, fermeture des accès).*

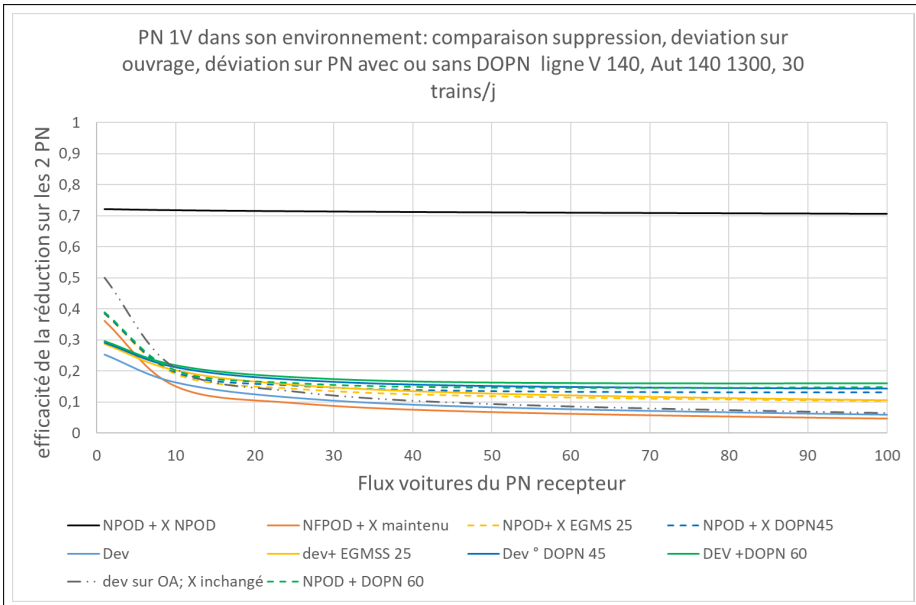
Entre 10 et 100 véhicules par jour, il y a 25% de la population de nos PN avec près de 20% des accidents. La plupart de ces PN sont déjà automatisés en SAL 2, ce qui exclut l'automatisation comme solution « technique » de sécurisation, et les configurations très complexes sont rares, ce qui réduit l'impact des modifications routières.

Mais quelle serait l'efficacité de ces mesures ? Pour un détournement par OA ou un détournement par remembrement, 100% ou presque (le risque de basculement d'un véhicule sur la voie à partir d'un OA existe, mais est faible).

On voit qu'en dessous de 100 v/j ou au-dessus de 2000 v/j, il existe des solutions techniques pour rendre les PN plus performants : Normalement fermé ou ouvert à la demande en dessous de 100 v/j, DOPN « classique » au-dessus de 2000 v/j.

Par contre, pour sécuriser un PN entre 100 et 2000 v/j, la suppression par ouvrage va couter plusieurs millions d'euros, et, si l'on raisonne uniquement en termes de sécurité routière, d'autres méthodes alternatives seraient beaucoup plus efficaces (amendes proportionnelles au revenu en cas d'infraction routière comme en Norvège, limitations de vitesse) : aucune solution « technique » unique ne semble s'imposer (« no magic bullet ») si l'objectif est d'améliorer la sécurité routière.

Une première solution est de travailler, comme le suggère l' EPSF dans son guide 021 l'ergonomie de l'environnement routier.




Dans le cas d'un PN à très faible flux de véhicules, adjacent à d'autres PN à faible flux de véhicules... isauf s'il est possible de supprimer le PN à faible coût par remembrement, il vaut mieux traiter les PN voisins de plus fort moment, à priori plus accidentogènes... par suppression par remembrement si c'est possible, en NFOD si ce ne l'est pas.

FIGURE 156 – Déviation d'un PN 1 V sur un autre PN à faible flux de véhicules ou un ouvrage...et comparaison avec les alternatives – Modèle générique d'accidentologie aux PN

Dans la mesure où une majorité d'accident est due à la distraction, cette approche semble à la fois légitime et efficace. Elle gagnerait cependant à faire l'objet de recherches pour l'optimiser et la conforter.

Une autre approche peut être de voir dans quelle mesure la présence d'un autre PN à proximité, sur lequel on pourrait détourner le flux de véhicules, permettrait d'autres solutions, notamment compte tenu des nouvelles solutions évoquées dans cette thèse.

On peut examiner, à titre d'exemple, trois cas :

— Un PN à très faible flux (1 v/j).
— Un PN à flux moyen (750 v/j).
— Un PN à flux relativement élevé (3000 v/j).

Jusqu'à maintenant, en dehors de la sécurisation routière évoquée plus haut, les solutions techniques étaient peu nombreuses :

— Suppression (par remembrement, par détournement sur PN voisin, par ouvrage)
— SAL 4 au lieu de SAL 2

On voit sur la figure 156 que dévier ou supprimer un PN à très faible flux de véhicules est peu efficace quant à la sécurité routière globale. En revanche, il est souvent assez peu coûteux de supprimer ces PN par remembrement, et les réseaux voisins les ont supprimés massivement.

Le bénéfice est cependant indirect : si l'on supprime tous ces « petits » PN, il devient plus facile ensuite de s'occuper des PN restants.

Pour le PN 750V/j (figure 157), pour le PN isolé, les solutions innovantes évoquées dans cette thèse ne semblaient pas pertinentes.

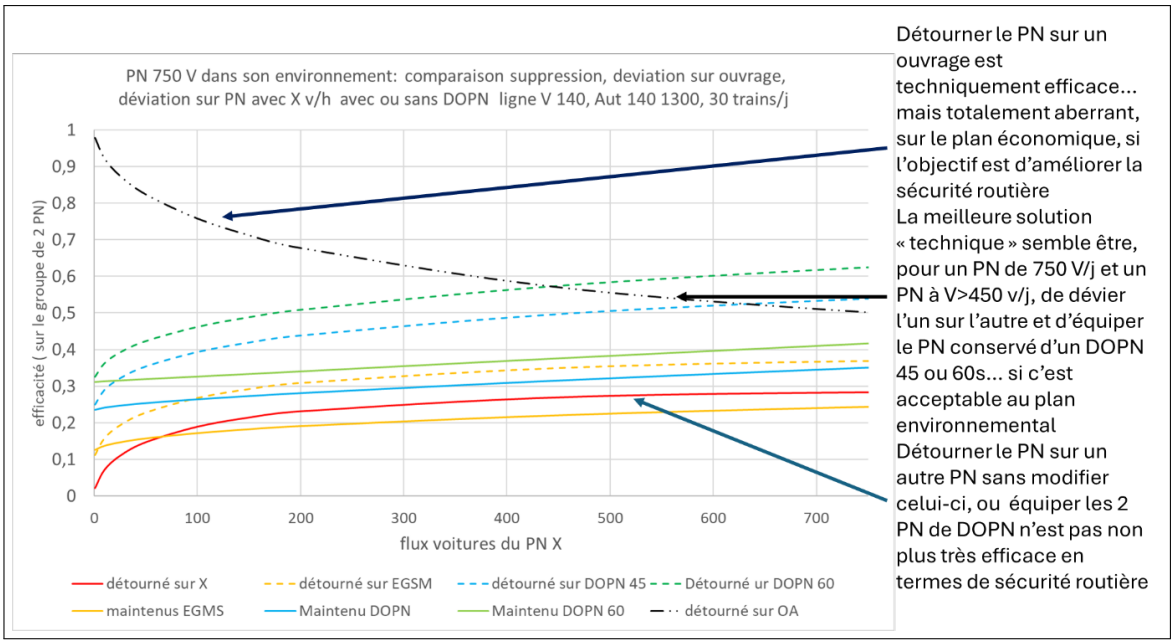



FIGURE 157 – Traitement d'un PN 750v/j:comparaison entre suppression, détournement sur PN voisin, et alternatives – Modèle générique d'accidentologie aux PN

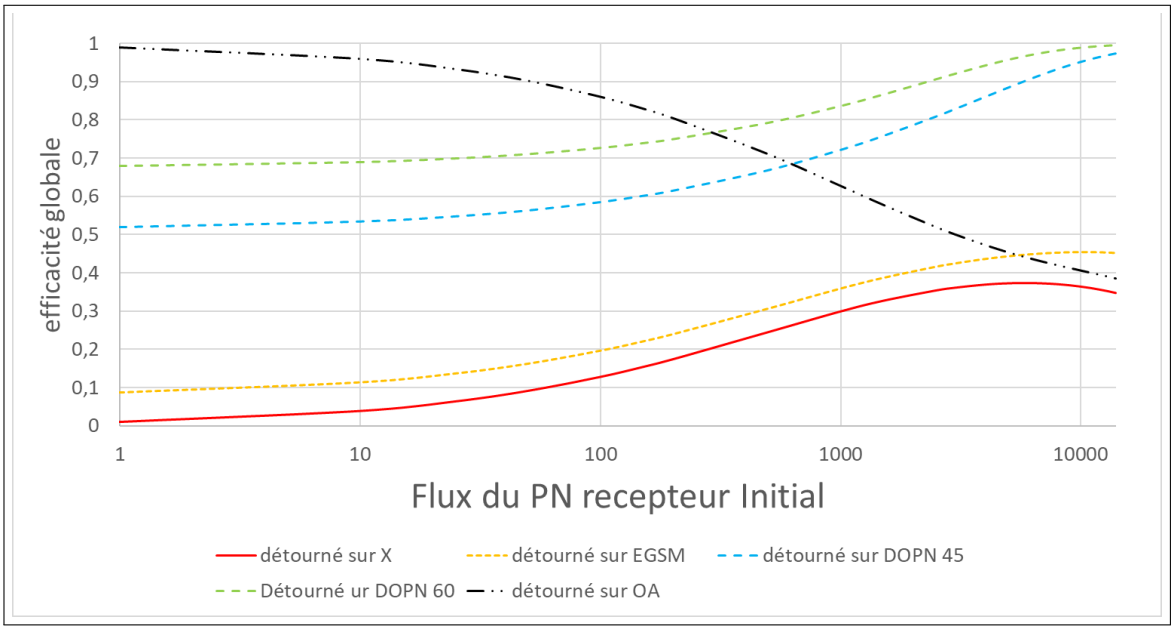



FIGURE 158 – PN à 3000 v/j dans son environnement : comparaison, efficacité de la suppression du PN, déviation sur ouvrage, déviation sur PN avec ou sans DOPN, – ligne V140 30 trains/j – trains AUT 140 1300 – Modèle générique d'accidentologie aux PN -

En revanche, quand on regarde le PN dans son environnement, il semblerait que, dans un certain nombre de cas et sous réserve de faisabilité environnementale, « fusionner » deux ou plusieurs PN voisins par déviation, et traiter le PN conservé avec un DOPN « classique » soit plus efficace que la suppression par ouvrage et le maintien des autres PN, mêmes sécurisés par DOPN.

Sur la figure 158 (PN à 3000 v/j), on pourrait tirer la même conclusion : Il vaut mieux fusionner plusieurs PN à flux élevé et les traiter par DOPN qu'en supprimer un seul par un ouvrage, serait valide pour des PN à flux de véhicules plus élevés ; mais « fusionner » par détournement des PN à fort flux de véhicules risques d'être mal perçu par les riverains. La conclusion est plutôt qu'au-dessus de 1500 v/j, il est plus efficace de traiter par DOPN classique tous les PN que d'en supprimer un par ouvrage et de maintenir les autres sans modifications, sans compter que le cout d'une suppression par ouvrage est de l'ordre de cinq fois celui d'une sécurisation !

En conclusion, si, au lieu de regarder le PN « isolé », on regarde la population des PN d'une ligne, on s'aperçoit que dans un certain nombre de cas, il est plus efficace de traiter « partiellement » le risque sur tous ou presque tous les PN plutôt que d'en supprimer quelques-uns.

Cela suggère une politique :

— Supprimer par remembrement les PN à très faibles flux de véhicules ou, si ce n'est pas possible, les Transformer en PN « Normalement fermés/ouverts à la demande » les PN à faibles flux de véhicules (moins de 100 v/j).
— Détourner les PN à flux moyens de véhicules vers un PN voisin à flux de véhicules égal ou plus élevé, et équiper le PN fusionné d'un DOPN 45 ou 60 5 11 4 1, ou lorsque ce n'est pas possible pour des raisons économiques ou techniques, les équiper en PN EGDM en attendant le renouvellement de la signalisation.
— Équiper les PN à fort flux de véhicules (plus de 3000) de DOPN 45 ou 60, ou, si c'est possible, un coût raisonnable, les supprimer.

Joint à un traitement routier du PN, cela permettrait de réduire de façon importante le risque aux PN pour un coût plus raisonnable que la pratique actuelle. *Même si cela resterait encore très élevé par rapport au coût d'un mort évité sur le réseau routier.*

## 11.2 Importance du traitement routier du PN

Il reste encore un point à regarder, l'impact de l'environnement routier du PN et comment il peut influencer une politique de sécurisation.

On sait déjà, de par l'analyse du REX, qu'il y a au moins un ordre de grandeur d'écart entre le 1er vingtile des PN les moins dangereux et le 20e vingtile (0,23 à 2,3).

Elles sont basées sur l'hypothèse que l'environnement routier influe de la même façon sur l'ensemble des modes d'accidents, ce qui est l'hypothèse la plus cohérente avec la distribution de type Polya observée.

En pratique (figure 159), voici ce que cela signifie, sur l'exemple d'un PN avec un flux de 30 trains/j (AUT 140 1300), une annonce de 25s et un flux de véhicules entre 1 et 14000/j.

On peut s'interroger aussi sur l'impact de l'environnement routier sur les PN alternatifs proposés dans cette thèse : la situation va être effectivement très différente de celle constatée sur les SAL 2,

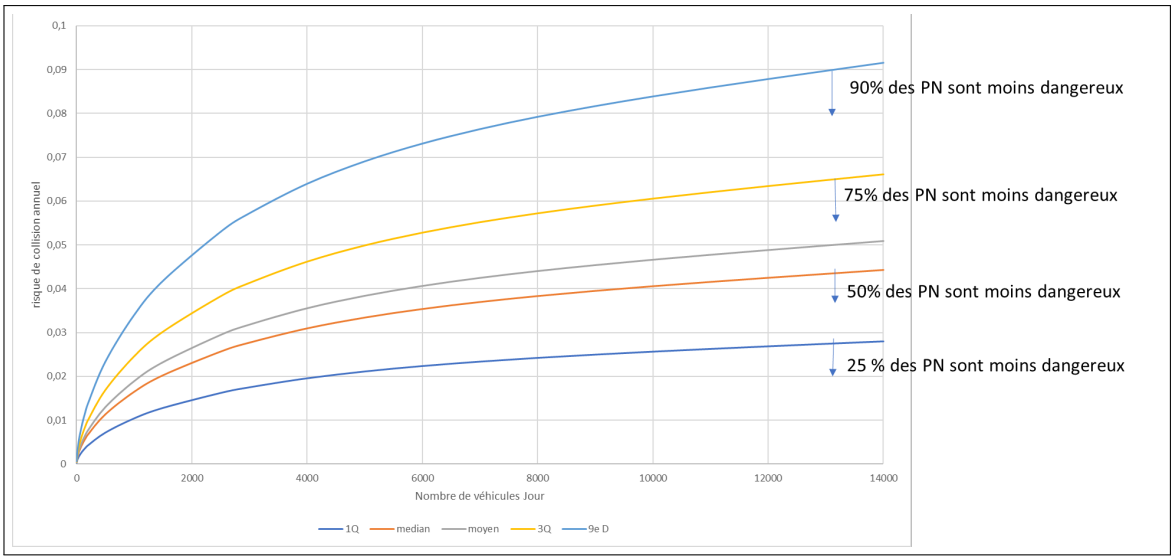



FIGURE 159 – Impact de l'environnement routier et de l'hétérogénéité des trains, SAL 2 25 7 – Modèle générique d'accidentologie aux PN + analyse de la distribution du ratio risque/-risque moyen

Pour le PN normalement fermé ouvert à la demande, la configuration routière a un impact qui varie peu en fonction du nombre de véhicules, mais qui varie fortement avec le nombre de trains, comme on peut voir sur la figure 160, et qu'il semble d'autant plus efficace que la configuration routière est défavorable, ce qui s'explique quand on sait qu'il est surtout efficace contre les accidents dûs à la distraction, qui vont dépendre fortement de la configuration routière.

La figure 161 ci-dessous montre l'influence croisée de l'installation d'un DOPN et de la configuration routière (par rapport au risque moyen).

Dans le cas d'un détecteur d'obstacle, on remarque que l'influence est beaucoup plus forte pour les PN à faible flux de véhicules que pour les PN à fort flux, en ce qui concerne les PN à détecteurs d'obstacles, et que le DOPN est d'autant plus efficace que la configuration routière est favorable.

C'est l'inverse du NFOD, et cela s'explique parce que les détecteurs sont moins efficaces contre la distraction que contre l'erreur de conduite. À fort flux de véhicules, l'effet Stott réduit l'influence de la distraction, ce qui explique que dans ce cas, l'effet du DOPN ne dépend presque plus de la configuration routière.

En conclusion, le détecteur d'obstacle est un outil intéressant pour réduire le risque aux PN, mais si on le met sur un PN à flux de véhicules modéré, ou si on adopte un montage de type EGDM, il est impératif d'engager en parallèle une réflexion sur l'ergonomie du PN, pour réduire le risque de distraction :

*Ergonomie routière et DOPN : de même que durée d'annonce et DOPN ne sont pas indépendants, les risques liés à l'ergonomie routière sont pour la plupart des risques liés à la distraction (la remon-*

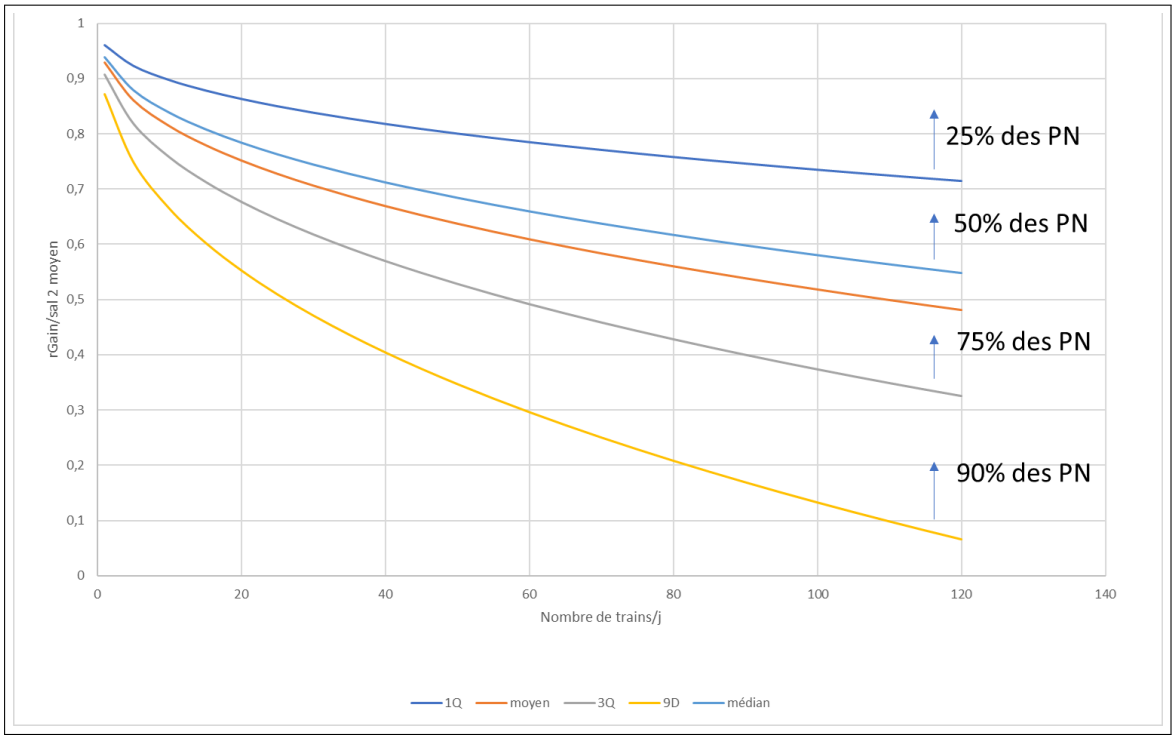



FIGURE 160 – Efficacité croisée d'un PN « Normalement fermé » et de l'environnement Urbain/ référence SAL 2 Moyen 25 7- Modèle générique d'accidentologie aux PN + analyse de la distribution du ratio risque/risque moyen

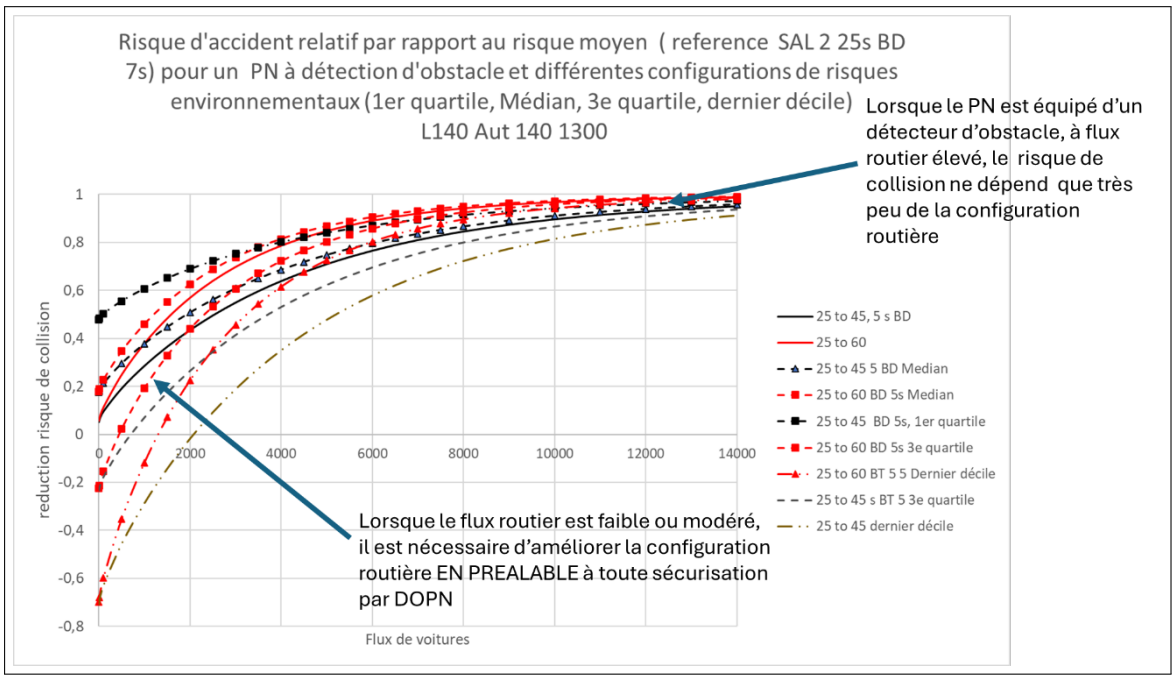



FIGURE 161 – Influence de la configuration routière sur le risque d'accident relatif par rapport au risque moyen (ref SAL 2 25s BD 7s) pour un PN à détection d'obstacle et différentes configurations de risques environnementaux – Modèle générique d'accidentologie aux PN + analyse de la distribution du ratio risque/risque moyen

*tée de file est l'une des seules exceptions), donc améliorer l'ergonomie routière en réduisant le risque de distraction va rendre beaucoup plus efficace le* DOPN.

# Chapitre 12

# Conclusions et perspectives

## Table des matières

12.1 Des nouveaux outils pour comprendre, identifier et prédire l'accidentologie aux PN . . . . . 264

12.2 Questions résolues . . . . . 264

12.3 La nécessité d'une politique « globale » de sécurité routière . . . . . 266

12.3.1 Il reste une question à laquelle la thèse n'apporte aucun élément de réponse . . . . . 266

12.4 Quels objectifs pour une politique réaliste de sécurisation des PN ? . . . . 268

12.4.1 Sécuriser les PN, mais pour les bonnes raisons, et sur les bons passages à niveaux . . . . . 268

12.4.2 Les technologies émergentes : des lueurs d'espoir, mais aussi des causes d'inquiétude . . . . . 269

12.4.3 Mot de la fin . . . . . 270

## 12.1 Des nouveaux outils pour comprendre, identifier et prédire l'accidentologie aux PN

Les objectifs de la thèse étaient :

- Comprendre ce qui se passe à un passage à niveau.
- *Identifier* quels sont les mécanismes d'accident, s'ils sont identiques pour tous les PN ou s'ils sont significativement différents en fonction de la fréquentation, de la configuration routière.
- *Développer un modèle « prédictif » des accidents aux PN.*

Dans cette thèse, plusieurs modèles ont été développés :

- Un modèle pour comprendre le comportement du conducteur de véhicule au PN, qui a nourri les modèles suivants.
- Un modèle statistique générique d'accidentologie aux PN, qui fonctionne tant pour les PN du réseau SNCF français (SAL 2, SAL 4), mais aussi des réseaux d'autres pays (Japon, Suède). Ce modèle, facile à utiliser, permet d'évaluer l'accidentologie de différents types de PN en prenant en compte tant le flux de véhicules que les caractéristiques de la ligne de chemin de fer (vitesse, nb de trains, types de trains). Il permet aussi d'évaluer la pertinence d'améliorations techniques, de nouveaux types de PN ou d'innovations.
- Un démonstrateur en vue du développement d'un modèle bayésien d'accidentologie individualisé par PN, qui intégrerait au modèle statistique générique, des paramètres individuels propres à la géographie de l'implantation du PN et du REX terrain. Les premiers paramètres ont été proposés dans le cadre d'un estimateur préliminaire basé sur le modèle générique et une base de données d'une centaine de PN représentatifs du réseau SNCF, mais de nombreux autres paramètres demandent encore à être étudiés.

Ces différents modèles ont permis de répondre aux questions concrètes sur l'accidentologie aux PN dans le cadre ferroviaire, identifiées en début de thèse :

## 12.2 Questions résolues

Revenons au commencement et aux questions à l'origine de la thèse :

- **Pourquoi la dépendance du risque d'accident aux passages à niveau en fonction de la « probabilité de rencontre » (le moment) n'est pas linéaire ?**

La non-linéarité a plusieurs causes. Certaines été déjà connues au démarrage de la thèse (Effet Stott), d'autres non, comme l'existence d'un mécanisme d'esquive non négligeable pour des annonces de durées moyennes ou élevées, ou comme l'impact dominant de la cécité d'inattention, elle-même très dépendante de l'« apprentissage » du PN comme « dangereux ou non ».

— **Pourquoi, lorsqu'on observe un passage à niveau, on voit essentiellement des accidents dus à l'imprudence, alors que les accidents de PN les plus spectaculaires (Millas, Port Sainte Foy, etc.) sont plutôt de type « looked but not seen » ?**

La réponse à cette question est liée au biais d'échantillon et à la proportion d'accidents liés à la cécité d'inattention (et plus généralement à la distraction) par rapport aux accidents liés à l'erreur de conduite : l'erreur de conduite est majoritaire pour les PN très fréquentés (et les plus observés), alors qu'une majorité écrasante d'accidents est due à la distraction.

— **Pourquoi la dangerosité des SAL 4 semble identique à celle des SAL 2 à petit moment, et significativement plus faible à fort moment ?**

Parce que l'effet de la durée d'annonce est non linéaire : négatif aux faibles flux de véhicules, mais en grande partie compensé par le mécanisme d'esquive ; positif à fort flux de véhicules, car l'effet Stott et l'effet d'esquive « surcompensent » l'augmentation du nombre de véhicules impliqués aux PN.

— Pourquoi le comportement « mesuré » des conducteurs routiers à un PN a l'air très homogène alors que l'accidentologie est très différente entre deux PN de moments « identiques » ?

Parce que l'essentiel de la dispersion vient de la distraction, qui est très sensible à l'environnement routier du PN, mais trop faible pour être directement observable.

**Mais les réponses à ces questions ont été apportées dans la thèse, d'autres questions ont été soulevées.** Pour certaines, il a été possible d'apporter des réponses. Pour d'autres, il reste du chemin à parcourir ; un voyage de mille lieues commence toujours par un premier pas.

Parmi les questions soulevées et répondues :

— Est-ce que la politique d'équipement de passages à niveau en France est correcte ?

  En ce qui concerne les modes motorisés, elle n'est pas loin de l'optimum, avec les solutions traditionnelles utilisées.

Compte tenu d'une proportion relativement élevée de PN à petits moments, le choix SAL 2/SAL 4 est relativement proche de l'optimum.

**Quelles sont les améliorations incrémentales possibles ?**

— **Développer le concept du guide 021 de l'** Epsf : en « fiabilisant » l'évaluation du risque en fonction du moment, en développant un modèle « bayésien » de risque pour mieux prédire l'accidentologie attendue en fonction de la configuration routière, en y associant les gestionnaires de voirie, en utilisant davantage les « théories » issues de la sécurité routière.

— Réduire la durée de clignotement à 5s en conservant l'annonce, au moins pour les PN à flux de véhicules supérieur à 1000 par jour.

— Modifier la règle de choix des durées d'annonce, actuellement en fonction de la vitesse, pour la remplacer par une règle en fonction du flux de véhicules (allonger l'annonce au-dessus de 1000 v/jour au lieu de V 140 km/h).

*Y a-t-il des sauts de performances possibles ?*

— *Une piste de progrès importante, mais encore insuffisante (compte tenu du coût du mort routier, si l'on vise une amélioration de la sécurité routière comme objectif) serait d'utiliser davantage des technologies existantes (DOPN classiques) ou émergentes (NFOD, EGDM* pour maîtriser le risque des PN à très faible flux de véhicules (NFOD) ou à très fort flux (DOPN classiques) et d'utiliser davantage les améliorations d'ergonomie routière.
— *Adapter les PN français aux ADAS.*

Cependant, les modes doux donnent lieu à une « accidentologie émergente », liée à l'augmentation de leur fréquentation, mais aussi à des changements sociaux et culturels (smartphones, profil d'âge de la population, etc.) et deviennent préoccupants.

**L'adaptation des politiques ferroviaires à ces risques émergents devient nécessaire, et cette thèse fournit une piste :** *PN EGDM avec calfeutrement, jupes, etc.*

## 12.3 La nécessité d'une politique « globale » de sécurité routière

La lutte contre les accidents aux PN ne se justifie pas seule, elle doit faire partie d'un effort sociétal pour réduire la mortalité routière.

*À l'heure actuelle, les méthodes utilisées pour améliorer le risque aux PN ne sont pas efficaces : supprimer un PN avec un risque d'accident tous les 10 ans pour 10 M€ n'est pas justifié, et si le ferroviaire en supporte le coût, peut même avoir, comme le disait le Pr. Evans, l'effet pervers d'un transfert de trafic vers la route et au final une augmentation de la mortalité routière (*EVANS et ADDISON *2009). Cependant, cela ne justifie pas que l'on ne fasse rien, mais on ne doit pas le faire à n'importe quel coût : Si l'on s'attaque au problème, il faut s'y attaquer avec les méthodes les plus efficaces au niveau coût/efficacité, et le faire de façon suffisamment « massive » pour qu'on puisse en constater l'impact.*

### 12.3.1 Il reste une question à laquelle la thèse n'apporte aucun élément de réponse

La recherche objet de cette thèse ouvre de nouvelles perspectives qui permettraient de sécuriser plus facilement les passages à niveau.

Cependant, dans le cadre de cette recherche, il a été nécessaire d'étudier les particularités des accidents routiers, *car les accidents de PN sont des accidents routiers* , et ce regard sur la sécurité routière nous amène à poser quelques questions importantes quant à la rationalité et à la cohérence de la politique de sécurité des transports en France.

Un des points de départ de la réflexion a été un échange avec le Professeur Evans ((EVANS et ADDISON 2009)) qui souligne, dans le cas de l'Angleterre, qu'il est impossible de

traiter séparément la sécurité des modes de transport terrestres, et qu'avec des moyens limités, le plus efficace est de les concentrer sur le mode le plus accidentogène.

Pour environ 10% des voyageurs x km, le nombre moyen de décès par an, dans les trains est d'un par an environ (et de 0,1 dans les accidents de PN) contre 3 000 pour la route (90% des vk).

Il manque malheureusement des données qui permettraient de faire un modèle rigoureux et précis, mais il est possible de regarder les ordres de grandeur.

— 3 000 tués sur les routes/an, dont 30 morts/an aux PN
— 10 décès de passagers ferroviaires /an (1 dans les trains et environ 9 aux TVP et aux PN par des accidents en gare)

Le trafic routier représente environ 90% des Km de passagers, y compris le « dernier kilomètre » par les usagers du train.

Le rapport du taux d'accidents est alors de 1 à 7,5 incluant (pour le côté ferroviaire) à la fois les accidents aux passages à niveau et les accidents en gare.

Si $x$ est le rapport $\frac{Train passengers\ km}{total passenger\ km}$

et $a$ le rapport $\frac{Trainpassengerskm}{Trainpassengerskm+lastmiletrainusersothermodespassengerkm}$, on peut estimer le risque total du transport A comme :

$$A = x \times (total\ passenger\ km) \times (a + 7,5(1-a)) + 7,5(1-x) \times (total\ passenger\ km)$$

et

$$A = (7,5 - 6,5ax) \times (total\ passenger\ km)$$

et

$$\frac{\partial A}{\partial x} = -6,5a \times (\textit{total passenger km})$$

C'est une estimation approximative : pour les usagers du train, une partie du dernier kilomètre pourrait se faire en bus, en tram ou à pied, modes moins mortels que les véhicules. Mais avec a=0,9 (dernier kilomètre inférieur à 10% du trajet total), l'augmentation de la part modale du transport ferroviaire de 1% semble diminuer le risque de transport modal de 5% ou plus. Il n'a pas été possible de se procurer auprès du ministère, ni de la SNCF les données de répartition modales des trajets effectués majoritairement en train, mais l'estimation grossière ci-dessus montre qu'il n'est pas possible de raisonner sur la sécurité des transports sans prendre en compte des effets de transfert modal. Une des raisons avancées pour sécuriser les PN est qu'en augmentant le trafic ferroviaire, on augmente le danger routier, mais ce raisonnement est très probablement erroné : compte tenu de la dangerosité relative des deux modes, *l'augmentation du risque de collision au PN est probablement plus que largement compensée par la diminution du risque routier due au transfert modal.*

Cela ne veut pas dire que nous ne devons pas travailler à la sécurisation des PN. En revanche, il est nécessaire de préciser quel est l'objectif de cette sécurisation.

## 12.4 Quels objectifs pour une politique réaliste de sécurisation des PN ?

### 12.4.1 Sécuriser les PN, mais pour les bonnes raisons, et sur les bons passages à niveaux

En effet, on peut imaginer trois objectifs de sécurité pour les passages à niveau :

1. **Améliorer la sécurité routière.** On a vu dans le paragraphe précédent que la sécurisation des PN n'est pas un moyen efficace pour cet objectif, voire qu'il peut être contreproductif. Si l'on veut réduire la mortalité sur les routes, il existe des méthodes efficaces, ne serait-ce que de revenir en arrière sur le rétablissement du 90 km/h pour les routes bidirectionnelles (300 morts par an d'après le REX du Cerema) ou l'abaissement de l'âge du permis à 17 ans (de l'ordre de 30 morts par an) ou des amendes proportionnelles au revenu comme en Norvège.
2. **Améliorer la sécurité des usagers du train,** y compris dans les parcours du dernier km.

On a vu que lerisque pour un usager du train n'est pas dans le train, mais en gare, et encore davantage dans le parcours du dernier km, surtout si celui-ci est routier.

Pour lutter contre le risque en Gare, on peut imaginer traiter les PN en bout de quai des gares, avec des anti-trespass, un calfeutrement autour des moteurs, des PN EGDM avec des barrières équipées de jupes et continuer la démarche de sécurisation des Traversées des voies par le public.

Pour lutter contre le risque de l'acheminement routier, il faudrait travailler avec les autorités organisatrices sur une vraie politique intermodale qui réduirait la part du mode routier dans le transport intermodal au profit des bus ou des trams 10 fois plus sécuritaires que les véhicules individuels.

1. **Réduire le risque d'accident « catastrophique »** : les accidents de PN peuvent, dans certains cas, conduire à des « catastrophes » :

— — Accident entre un train et un bus
— Accident d'un train « léger » avec un mobile routier lourd (camion, engin agricole), avec déraillement et sur-accident ferroviaire éventuel avec un train croiseur
— Accident d'un train avec un transport de matières dangereuses.

On pourrait imaginer des solutions restant dans le domaine ferroviaire, comme des contrerails allongés en aval du platelage (les PN japonais en sont équipés), mais la maîtrise de ce risque passe probablement par une meilleure collaboration avec les autorités organisatrices routières :

— En interdisant les circulations de modes motorisés lourds dès que c'est possible, et en équipant systématiquement de portiques pour assurer que l'interdiction sera respectée (le REX du BEA-TT montrant par ailleurs qu'il faut éviter les interdictions sauf riverains et le modèle suggérant qu'il faut les suffisamment loin en amont les PN pour ne pas créer une source de cécité d'inattention supplémentaire)
— En ayant davantage recours aux achats et échanges de terrains en zone rurale pour supprimer l'usage par les agriculteurs du PN (les engins agricoles lourds sont un sur-risque)
— En concentrant les passages des modes lourds sur un « petit » nombre de franchissements par ouvrages ou PN très bien équipés

Pour toutes ces raisons, il nous semble nécessaire de continuer à travailler sur les méthodes de sécurisation des passages à niveau, *mais pas à n'importe quel prix*, car il y aurait risque, si ces coûts se répercutent sur le client ferroviaire ou retardent des opérations favorisant un report modal vers des modes plus sûrs, d'aggraver la mortalité routière.

En développant des concepts alternatifs (PN NF/OD ; EGDM, DOPN, etc.), cette thèse permet cependant d'espérer une réduction du coût de la sécurisation des PN.

*Mais définir des objectifs clairs, cohérents et réalistes dans le cas d'une politique globale de sécurité des transports pourrait aussi permettre de dépenser à meilleur escient.*

### 12.4.2 Les technologies émergentes : des lueurs d'espoir, mais aussi des causes d'inquiétude

D'autres dispositifs purement routiers, notamment parmi les ADAS les plus simples, devraient permettre une réduction non négligeable des accidents de PN, notamment radar/Lidar avant et FU routière, sous réserve que les radars avant aient la sensibilité nécessaire pour détecter suffisamment loin les barrières des PN comme des obstacles.

Or, les AEB (Advanced Emergency Braking) devraient être bientôt obligatoires en Europe, avec une réduction de 45% des collisions routières d'après les études des assureurs.

Compte tenu qu'en France, environ 80% des accidents de PN (en moyenne) d'après notre modèle sont dus à l'inattention et sont initiés alors que les barrières sont au ¾ fermées, on pourrait estimer grossièrement que, si les AEB étaient capables de les détecter à ce moment, on pourrait éviter jusqu'à 30% des accidents. Attention toutefois que le véhicule ne soit pas immobilisé par l'AEB devant la barrière de sortie d'un SAL 4 après un passage lent. Mais si le PN est un PN DOPN à annonces longues, c'est plutôt 80 ou 90% des accidents qui seraient évités, car Le DOPN prendrait en charge les incidents d'initiation précoce.

Si l'on veut se projeter dans l'avenir, il existe quelques causes d'espoir :
— Le développement des ADAS devrait naturellement réduire l'accidentologie aux PN sous réserve qu'ils détectent les barrières ou, encore mieux, les feux clignotants.

— L'élimination des véhicules ferroviaires anciens, leur remplacement par des véhicules soumis à des exigences de crash test a déjà réduit de façon importante la létalité des accidents (0,1 mort.an est probablement surestimé)

Et des causes d'inquiétude :

— Le rapport Masse Train/Masse véhicule routier risque de baisser avec les trains « légers » en cours de développement. Or, la répartition d'énergie d'un choc inélastique dépend très fortement du rapport de ces masses : un train « léger » nécessiterait des exigences de crash tests plus élevées.
— Des poids lourds ou des trains « électriques à batteries » ou à hydrogène, voire des VL électriques à forte autonomie, pourraient présenter des risques d'incendie ou d'explosion beaucoup plus fréquents qu'aujourd'hui.

### 12.4.3 Mot de la fin

Tout cela suggère, si l'on veut limiter très fortement le risque d'accident catastrophique aux PN dans le futur, une action auprès des politiques, des constructeurs routiers et ferroviaires avec les objectifs suivants :

— *S'assurer que les ADAS prennent bien en compte le risque PN. L'expérience de mon véhicule montre que ce n'est pas le cas*
— *Renforcer les exigences de performance de freinage des futurs trains légers en développement : avec des décélérations de type tramway, l'efficacité des détecteurs d'obstacles serait considérablement augmentée, et la gravité moyenne des chocs très réduite.*
— *Renforcer les exigences anti incendie des véhicules électriques ou à hydrogène.*

De même, si l'on veut limiter le risque transport des usagers du train, dont on a vu qu'il est en grande partie liée à la part modale des modes individuels :

— *De prioriser la sécurisation des modes doux aux PN et celle des TVP*
— *De travailler avec les autorités organisatrices pour*
  — *Améliorer l'intermodalité et réduire la part modale des modes individuels dans les trajets intermodaux*
  — *Développer les moyens de réduire le risque mode doux (EGDM ?), répression/éducation ?*
  — *Eviter les passages des PL, Bus sur des PN par des moyens physiques (Portiques G3, dos d'ânes « plus sévères » que ceux des PN), des engins agricoles (remembrements) et les concentrer sur des passages surs (OA ou PN équipés de Dopn à annonces longues, sans risques routiers particuliers pouvant augmenter la cécité d'inattention, NFOD)*
— *D'équiper les PN de dispositifs anti-déraillement (contre rails) comme au Japon.*

# Chapitre 13

# Annexes

## Table des matières

13.1 Traduction d'extraits de l'ordonnance ministérielle japonaise sur les chemins de fer(version 2018) Articles sur les PN . . . . . 272

13.2 Traduction d'extraits des règlements ferroviaires japonais (version 2018) Articles sur les PN . . . . . 273

13.3 Extraits du retour d'expérience suédois sur les passages à niveau équipés de détection d'obstacles . . . . . 278

13.4 Extrait de «Kartläggning av plankorsningar» (Inventaire des passages a niveau) de TRV (2006) . . . . . 282

13.5 Analyse des rapports du BEA-TT à la lumière des enseignements de MORIPAN et du modèle . . . . . 284

13.6 Les PN comme carrefours . . . . . 317

## 13.1 Traduction d'extraits de l'ordonnance ministérielle japonaise sur les chemins de fer(version 2018) Articles sur les PN

(Intersection with Road)

Article 39. Railway shall not intersect with roads at grade (Roads here mean the roads used by the general public traffic. The same definition shall apply hereinafter.). This definition, however, does not apply to those conventional line that do not operate at high-speed like, Shinkansen, where traffic volume at rail crossing is small or where it is difficult to make a separate crossing from the topographical standpoint.

Article 40. Level crossing roads shall be provided with appropriate consideration for the safe and smooth passage of people and automobiles (hereinafter referred to as "level crossing road passengers, etc.") and with safety facilities prescribed under the Article 62.

Article 62. Level crossing safety facilities shall be able to warn the danger of approaching train to people going across level crossings, and to block the street traffic into the crossing to secure the safety for both train and people. However, for those exceptional cases where the traffic volumes at the crossing is minimal or where it is extremely difficult from the technological standpoint to install the device to shut the street traffic, warning device of an approaching train suffices as protection.

2. Level crossing safety facilities shall take into consideration the train speed, traffic volume of both rail and road, the type of vehicles that go across the crossing and so on. If necessary, safety facilities shall include the device to let relevant trains, etc., be informed of any automobile interfering with the crossing.

## 13.2 Traduction d'extraits des règlements ferroviaires japonais (version 2018) Articles sur les PN

V-2 Related to Article 40 (Level crossing roads)

A level crossing road of an ordinary railway (excluding Shinkansen lines), a trackless electric vehicle or a cable railway shall conform to the following criteria.

(1) The surface of a level crossing road shall be paved.
(2) The angle of intersection between the railway and the road must be at least 45 degrees.
(3) A warning sign must be erected.
(4) The level crossing security facilities stipulated in the Approved Model Specifications of Article 62 shall be provided.

VII-9 Article 62 Related to (Level Crossing Protection Facilities)

1 Level crossing safety facilities shall provide an automatic barrier machine. However, at level crossings where trains pass at speeds of not more than 130 kilometers per hour, in cases where there is minimal amount of traffic on the railway or on the road, or where there is significant difficulty for technical reasons in locating an automatic barrier machine, a crossing warning device may be used instead.

2 an automatic barrier machines and crossing warning devices shall conform to the following provisions:

(1) Devices shall give warnings to passers-by on both sides of the track.
(2) Devices shall be located on the left side facing the level crossing. However, in cases where there are unavoidable circumstances in light of the situation, etc., of facilities, the same does not apply.
(3) Two or more red flashing lamps shall be provided.
(4) The red flashing lamps outlined in (3) shall blink alternately in operation.
(5) The red flashing lamps outlined in (3) shall have a visibility range of not less than 45 meters (not less than 22 meters at level crossings where automobiles, etc., traveling on the road cannot approach at speeds exceeding 35 kilometers per hour due to geographical circumstances.
(6) A cross mark shall be provided.

(7) Devices shall be patterned with yellow and black stripes.

(8) A device to generate warning sounds shall be provided.

(9) A train direction indicator shall be provided at level crossings with two or more tracks.

(10) For overhung-type warning devices, red flashing lamps shall be located not less than 4.5 meters in effective height above the road surface at the level crossing.

3 The barrier device of an automatic barrier machine shall meet the following requirements:

(1) It shall be able to interrupt traffic entering the level crossing over the full width on both sides of the track.

(2) It shall be located on the left side facing the level crossing. However, in cases where there are unavoidable circumstances in light of the situation, etc., of facilities, the same does not apply.

(3) Barrier bars shall be as follows:

[1] At the time of interruption, bars shall be horizontal as standard at a height of 0.8 meters above the road surface (this shall be the height of the upper barrier bar in devices with two bars, measured from the lower barrier bar).

[2] Other than at the time of interruption, bars shall be not less than 4.5 meters in effective height above the road surface.

[3] Bars shall be patterned with yellow and black stripes.

[4] Two or more red flashing lamps or red reflective materials shall be provided in a position easily visible to passers-by.

[4] Two or more red flashing lamps or red reflective materials shall be provided in a position easily visible to passers-by.

[5] Barrier bars of large-scale barrier devices shall be not less than 0.1 meters in vertical length at the portion interrupting the carriageway on a level crossing at the time of interruption.

4 Automatic barrier machines shall operate as follows:

(1) Operation shall be automatically started upon the approach of a train, etc. However, for level crossings staffed with a crossing guard or those in or adjacent to stations (hereafter referred to as "manually controlled level crossings, etc."), the same does not apply.

(2) A continuous closed circuit system or a control system with equivalent or higher performance shall be used. However, for manually controlled level crossings, etc., the same does not apply.

(3) The time period from the start of a warning to the completion of interruption operation shall be 15 seconds as standard. In all cases, this period shall be not less than 10 seconds.

(4) The time period from the start of a warning to the start of interruption operation shall be such that there is no obstruction to the traffic of passers-by. In cases where barrier bars

are provided on both sides of the road, the barrier device on the right side facing the level crossing shall basically start interruption operation after the end of that by the barrier device on the left side facing the level crossing.

(5) The time period from the end of interruption operation to the arrival of a train, etc., shall be 20 seconds as standard. In all cases, this period shall be not less than 15 seconds.

(6) The time period from the start of a warning to the arrival of the train or vehicle shall not vary significantly depending on the speed, etc., of the said train.

(7) The operation of resetting the interruption state shall start after the train, etc., has passed.

(8) At level crossings where there is a risk of problems related to the over-running of trains, etc., interruption operation shall be ended with a time allowance before such trains, etc., can reach the level crossing due to over-run.

5 Crossing warning devices shall operate as follows:

(1) Operation shall be automatically started upon the approach of a train, etc. However, for manually controlled level crossings, etc., the same does not apply.

(2) A continuous closed circuit system or a control system with equivalent or higher performance shall be used. However, for manually controlled level crossings, etc., the same does not apply.

(3) The time period from the start of a warning to the arrival of the train, etc., shall be 30 seconds as standard. In all cases, this period shall be not less than 20 seconds.

(4) The time period from the start of a warning to the arrival of the train or vehicle shall not vary significantly depending on the speed, etc., of the said train.

(5) The warning shall stop after the train, etc., has passed.

6 When a fault is recognized at an automatic barrier machine or crossing warning device located at a level crossing, a staff member in charge shall be located at the level crossing, and alternative measures to warn passers-by shall be taken.

7 Crossing warning time period control device shall conform to the following requirements:

(1) It shall automatically control the start time of automatic barrier machine or crossing warning device (hereafter referred to as "automatic barrier machines") operation by identifying the type or speed of a train, etc.

(2) Those performing control in accordance with the provisions outlined in (1) by identifying the type or speed of a train, etc., shall be as follows:

[1] Speed shall be monitored at two or more positions.

[2] Monitoring positions other than that at the point farthest outward of the automatic barrier machine, etc., (i.e., the position for monitoring train speeds; hereafter, the same shall

apply) shall be those for which the automatic barrier machine, etc., can be operated with safety even when a train, etc., passes a monitoring position outward of this recognition position without operation of the automatic barrier machine, etc., and accelerates thereafter.

(3) There shall be no risk of problems with the operation of automatic barrier machines, etc., even in the event of a malfunction in the crossing warning time period control device.

8 Obstruction warning devices for level crossing shall conform to the following requirements:

(1) Devices shall be provided to indicate fusee signals, flashing light signals and alarm signals (hereafter referred to as "indication devices"). However, with types indicating a stop signal with respect to an adjacent main signal or cab signal, or types providing control information for indicating stop signals, the same does not apply.

(2) Devices shall be a type that can operate an indication device using an operation device or an obstruction detecting device.

(3) The fuses of fusee signals and the principal portions of other indication devices shall be redundant.

(4) Obstruction warning devices for level crossing provided with devices indicating fusee signals shall be a type that can indicate a stop signal with respect to an adjacent main signal or cab signal, a type issuing control information indicating a stop signal or a type indicating a fusee signal again.

9 The operation devices outlined in 8 (2) shall conform to the following requirements:

(1) Operation switches such as press buttons or switches shall be located at both sides of the track. However, at level crossings that are narrow due to location on a single track, or at those where a dedicated crossing guard handles switch operation, the operation switch on one side of the track may be omitted.

(2) Operation switches in accordance with (1) shall conform to the following requirements:

[1] They shall be located in the vicinity of the level crossing and at a point that allows easy handling.

[2] They shall have twin contact or an equivalent or higher level of performance.

[3] They shall have a holding function.

[4] They shall be easily recognizable even at night.

[5] There shall be clearly displayed handling instructions.

(3) Reset switches shall be provided. However, with switches that automatically reset the holding state upon the passing of a train, etc., the same does not apply.

(4) The reset switches outlined in (3) shall be a type that unauthorized people, i.e., those other than the person in charge, cannot easily operate.

10 The obstruction detecting devices outlined in 8 (2) shall conform to the following requirements:

(1) They shall use a closed circuit system or a control system with an equivalent or higher level of performance.

(2) In cases where an automobile (excluding two-wheeled vehicles) obstructs a level crossing, and a train, etc., comes close to this level crossing, the situation shall be automatically detected using light, electromagnetic waves or sound waves.

(3) Basic operation shall be performed with respect to automobiles (excluding two-wheeled vehicles) within the structure gauge of tracks at level crossings.

(4) Automatic resetting of indication device operation shall be performed once problems with respect to level crossings are resolved.

(5) Operation shall not be triggered by trains, etc., passing a level crossing.

## 13.3 Extraits du retour d'expérience suédois sur les passages à niveau équipés de détection d'obstacles

### 13.3.1 Résumé

En 2005, Banverket a effectué un retour d'expérience sur les passages à niveau, incluant les passages à niveau équipés de détecteur d'obstacles

De 1980 à 2005, il y a eu un seul accident sur les PN à quatre barrières équipés de DOPN et avec une annonce de 60s

Depuis 2005, il n'y aurait pas eu d'autres accidents (communication de Ole Mornell)

Vous trouverez ci-après

- Une traduction des passages du rapport les concernant
- Une comparaison de l'accidentologie de ces passages à niveau par rapport au risque moyen en France.

### 13.3.2 Retour d'expérience Suédois (texte original et Traduction)

4.7 Olyckor i plankorsningar med hinderdetektor Hinderdetektor finns eller har funnits på sammanlagt drygt 100 anläggningar under 15 års tid. Det finns tre fall där kollisioner har förekommit. En av dessa inträffade i plankorsningen Jungmansgatan i Lidköping när en personbil körde igenom de redan fällda bommarna och tåget befann sig mycket nära plankorsningen. Vid denna händelse skadades två personer allvarligt. Det här är den farligaste situationen eftersom tåget vid bomgenomkörningen kan befinna sig mycket nä-

ra plankorsningen och då finns det då ingen möjlighet att vare sig bromsa eller stanna i tid. De andra två olyckorna har inträffat vid plankorsningen Standards AB i Ale kommun. Denna anläggningstyp är en den enda kvarvarande halvbomsanläggningen som är försedd med hinderdetektor. Denna anläggningstyp går inte att förse med ATC-övervakning eftersom den har för korta bromssträckor. Vid en av händelserna hade detektorn upphört att fungera. Denna var av en äldre modell som saknade fellarm. Den här plankorsningen kommer att försvinna i samband med ett vägprojekt. Vid dessa kollisioner skadades ingen person. Det förefaller som att plankorsningar med hinderdetektorer i stort sett är fria från olyckor. I Bilaga 4 Händelser med hinderdetektor finns en förteckning över inträffade händelser

### Accidents aux passages à niveau avec détecteur d'obstacles

Les détecteurs d'obstacles existent ou existent dans plus de 100 installations depuis 15 ans. Il y a trois cas où des collisions se sont produites. L'un d'eux s'est produit au passage à niveau Jungmansgatan à Lidköping lorsqu'une véhicule a franchi les barrières déjà abaissées et que le train était très proche du passage à niveau. Dans cet incident, deux personnes ont été grièvement blessées. C'est la situation la plus dangereuse parce que le train au moment du passage de la véhicule peut être très proche du passage à niveau et qu'il n'y a alors aucune possibilité de freiner ou de s'arrêter à temps.

Les deux autres accidents se sont produits au passage à niveau Standards AB dans la municipalité d'Ale. Ce passage est la seule installation à demi-barrière qui est équipée d'un détecteur d'obstacles. Ce type d'installation ne peut pas être équipé d'une surveillance par detecteur car elle a des distances de freinage trop courtes. Lors de l'un des événements, le détecteur avait cessé de fonctionner. Il s'agissait d'un modèle plus ancien qui manquait d'alarme de panne. Ce passage à niveau disparaîtra dans le cadre d'un projet routier.

Dans ces collisions, personne n'a été blessé. Il semble que les passages à niveau équipés de détecteurs d'obstacles soient en grande partie exempts d'accidents.

L'annexe 4 Événements avec détecteur d'obstacles fournit une liste des événements qui se sont produits

> 5.2 Tillbud i plankorsningar med hinderdetektor
>
> *5.2 Tillbud i plankorsningar med hinderdetektor*
>
> *Som framgår i avsnitt 4.7 är det ovanligt med olyckor i plankorsningar där det finns hinderdetektor. Det förekommer dock ett antal tillbud vilket framgår av Bilaga 4 Händelser med hinderdetektor. En relativt vanlig tillbudssituation är när ingångsbommarna går ner över ett fordon som blockerar korsningen. Hinderdetektorn och även den avbrutna bommen stoppar visserligen tåget men bommen går sönder och förorsakar trafikstörningar och reparationskostnader. Plankorsningen i Åkarp har så intensiv tågtrafik att den är stängd långa stunder. När varningssignaleringen startar händer det att vägtrafikanterna skyndar sig att hinna över ibland med resultatet att en bom bryts av. Denna korsning kommer att ersättas med en planskild när finansieringen är löst.*

### 5.2 Incidents aux passages à niveau équipés de détecteurs d'obstacles

Comme le montre la section 4.7, les accidents sont rares aux passages à niveau où il y a un détecteur d'obstacles. Cependant, il y a un certain nombre d'incidents, comme le montre l'annexe 4 Événements avec détecteurs d'obstacles.

Un incident relativement courant est lorsque les barrières d'entrée tombent au-dessus d'un véhicule bloquant l'intersection. Le détecteur d'obstacles et la barrière cassée arrêtent le train, mais la barrière tombe en panne et provoque des perturbations de la circulation et des coûts de réparation. Le passage à niveau d'Åkarp a un trafic ferroviaire si intense qu'il est fermé pendant de longues périodes. Lorsque le signal d'avertissement se déclenche, il arrive que les usagers de la route se précipitent parfois pour rattraper leur retard, ce qui entraîne la rupture d'une barrière. Cette intersection sera remplacée par un pont une fois que le financement sera accepté.

### Appendice 4

Antal numero

Händelseförlopp circonstances de l'accident

Plankorsning PN

Döda morts (0 au total)

Skad blessés (2 au total)

Skydd type de DO

Tillbud Incident

Olyckor accident

Vägf type vehicule

Bilist var ouppmärksam och körde upp på spåret framför tåg

L'automobiliste a pénétré sur le PN quand le train était proche

## Bilaga 4 Händelser med hinderdetektor

| Antal | Datum | Händelseförlopp | Händelse | Kmtal | Plankorsning | Kommun | Skydd | Döda | Skad | Vägf | Släp |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11 | 1995-06-29 | | Tillbud | 463+635 | Surte Glasbruk | Ale | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 11 | 1999-01-04 | Avkörd bom. BIS olyckor 1444 | Tillbud | 463+635 | Surte glasbruk | Ale | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 11 | 1999-02-19 | Okänd bilist kör på och skadar bomanläggning. Bilisten avviker | Tillbud | 463+635 | Surte Glasbruk | Ale | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 11 | 1999-08-23 | Vägbom påkörd av okänd lastbil BIS olyckor 1391 & 1440 | Tillbud | 463+635 | Surte Glasbruk | Ale | AH | 0 | 0 | Tung lastbil | Nej |
| 11 | 1999-12-03 | Bom på bil vid passage. | Tillbud | 463+635 | Surte glasbruk | Ale | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 11 | 2001-04-19 | Okänd bilist körde in i bomanläggningen | Tillbud | 463+635 | Surte Glasbruk | Ale | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 11 | 2002-11-05 | Fällda bommar påkörda av vägtrafikant. | Tillbud | 463+635 | Surte glasbruk | Ale | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 11 | 2002-11-21 | Lastbil körde på plk.anl. Och skadade vägbom. | Tillbud | 463+635 | Surte glasbruk | Ale | AH | 0 | 0 | Tung lastbil | Nej |
| 11 | 2003-04-22 | Bom i vägskyddsanläggning påkörd och skadad. BIS olyckor 1996 | Tillbud | 463+635 | Surte glasbruk | Ale | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 11 | 2004-02-01 | Lastbil fastnade i bom till plk. anl. Bommen skadades. BIS olyckor 1969 | Tillbud | 463+635 | Surte Glasbruk | Ale | AH | 0 | 0 | Tung lastbil | Nej |
| 11 | 2004-06-11 | Vägskyddsanläggning påkörd och skadad. | Tillbud | 463+635 | Surte Glasbruk | Ale | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 8 | 1999-12-05 | Bilist var ouppmärksam och körde upp på spåret framför tåg | Olycka | 92+34 | Jungmansgatan | Lidköping | AH | 0 | 2 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 8 | 2000-02-25 | | Tillbud | 92+034 | Jungmansgatan | Lidköping | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 8 | 2000-09-05 | Bommar genomkörda | Tillbud | 92+34 | Jungmansgatan | Lidköping | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 8 | 2003-03-05 | Bompåkörning Ljungmansgatan | Tillbud | 92+34 | Jungmansgatan | Lidköping | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 8 | 2003-08-14 | Bompåkörning Jungmansgatan. Smitning | Tillbud | 92+034 | Jungmansgatan | Lidköping | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 8 | 2003-09-08 | Bompåkörning Vk Jungmansgatan km 92+034 | Tillbud | 92+034 | Jungmansgatan | Lidköping | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 8 | 2004-01-03 | Bompåkörning på Ljungmansgatan km 92+034 | Tillbud | 92+034 | Jungmansgatan | Lidköping | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 8 | 2004-03-09 | Bompåkörning Ljungmansgatan km 92+034 | Tillbud | 92+34 | Jungmansgatan | Lidköping | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 7 | 1994-10-22 | | Tillbud | 445+262 | Kåhögsvägen | Partille | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 7 | 1996-01-04 | | Tillbud | 445+262 | Kåhögsvägen | Partille | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 7 | 1998-11-09 | | Tillbud | 445+262 | Kåhögsvägen | Partille | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 7 | 2003-01-04 | Bilisten bländades av solen. Bilist uppfattade ej att plk. Kåhög aktiverats av annalkande tåg. Körde igenom det ena bomparet. Tåget fick restrektivt Atc- besked och närmade sig plk med siktfart. | Tillbud | 445+262 | Kåhögsvägen | Partille | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 7 | 2003-01-17 | Bomanläggnig påkör och skadad | Tillbud | 445+262 | Kåhögsvägen | Partille | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 7 | 2003-05-23 | Buss blev stående på plankorsning. Ett tåg från vardera håll stoppades i tid. | Tillbud | 445+262 | Kåhögsvägen | Partille | AH | 0 | 0 | Buss | Nej |
| 7 | 2003-06-03 | Buss på plk. då bommarna gick ner. Körde på och tryckte undan bommen för att komma från spåret. | Tillbud | 445+262 | Kåhögsvägen | Partille | AH | 0 | 0 | Buss | Nej |
| 6 | 1999-09-28 | Bommar gick ej ned p.g.a. bil på spåret | Tillbud | 609+240 | Alnarpsvägen | Burlöv | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 6 | 1999-11-22 | Bil innanför bommar, Alnarpsvägen | Tillbud | 609+240 | Alnarpsvägen | Burlöv | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 6 | 2002-05-10 | Bil under/i bommar? Förare på tåg anmälde 4H i huvudindikator. | Tillbud | 609+240 | Alpnarsvägen | Burlöv | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 6 | 2003-08-11 | Lastbil kör igenom bom Alnarpsvägen | Tillbud | 609+240 | Alnarpsvägen | Burlöv | AH | 0 | 0 | Tung lastbil | Okänt |
| 6 | 2004-03-08 | Enligt uppgift från privatperson stod en bil mellan bommarna i på "Alnarpsvägen"Åkarp.Bilen med passagerare stod kvar då tåg passerade."Någon " vickade på bommen så att man kunde knuffa ut bilen från plankorsningen.Då bommarna gick upp körde bilen. | Tillbud | 609+240 | Alnarpsvägen | Burlöv | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 6 | 2004-06-17 | Postbil står hinderfritt intill nedspår på plankorsning Alnarpsvägen med bom liggande på taket. Postbilen avviker sedan från platsen. | Tillbud | 609+240 | Alnarpsvägen | Burlöv | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 6 | 1993-03-19 | | Tillbud | 453+960 | Standards AB | Ale | BH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 6 | 1998-02-12 | | Tillbud | 453+960 | Standards AB | Ale | BH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 6 | 1998-08-04 | | Olycka | 453+960 | Standards AB | Ale | BH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 6 | 1999-03-14 | Okänt fordon kör på och skadar bomanläggning | Tillbud | 453+960 | Standards AB | Ale | BH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 6 | 2004-08-27 | Lastbil med släp påkördes av tåg 691. Släpet träffades i bakpartiet. Närvarodetektor har troligtvis inte indikerat hinder i spåret. | Olycka | 453+960 | Standards AB | Ale | BH | 0 | 0 | Tung lastbil | Ja |
| 6 | 2004-12-21 | Tåg 3251 höll på att köra på en lastbil som stod i spåret | Tillbud | 453+960 | Standards AB | Ale | BH | 0 | 0 | Tung lastbil | Nej |
| 5 | 1994-06-27 | | Tillbud | 418+454 | Västra Bodarne | Alingsås | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 5 | 1995-12-12 | | Tillbud | 418+454 | Västra Bodarne | Alingsås | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 5 | 1997-02-04 | | Tillbud | 418+454 | Västra Bodarne | Alingsås | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 5 | 2000-07-12 | Bompåkörning i Västra Bodarne orsakad av grävmaskinstrailer | Tillbud | 418+454 | Västra Bodarne | Alingsås | AH | 0 | 0 | Tung lastbil | Ja |
| 5 | 2004-01-01 | Lastbilstrailer på 24 m fastnad i plankorsning och skadade vsi- anläggningen. | Tillbud | 418+454 | Västra Bodarne | Alingsås | AH | 0 | 0 | Tung lastbil | Ja |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 2001-01-30 | Bil körde på bom vid plankorsning 0felia 76102 bdcm Bis olyckor 1528 kostnaden uppskattad 2000 | Tillbud | 82+654 | Östra Långgatan | Hultsfred | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 3 | 2001-11-01 | Personbil körde genom en av bommarna vid vägkorsning Östra Långgatan. Föraren säger sig bländad av solen. BIS Olyckor 1659 | Tillbud | 82+654 | Östra Långgatan | Hultsfred | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 3 | 2004-02-23 | Bom påkörd vid Ö.Långgatan. 0felia 243882 BIS Olyckor 1910 polisanmält. Uppskattad kostnad 8000 kr | Tillbud | 82+654 | Östra Långgatan | Hultsfred | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 2 | 2004-10-07 | En bom av i Liatorp Södra på uppspåret Vsi Visar Rött i Liatorp,Ej heller Vfsi Norr är Ok En Bom av på 3/4 enl tåg 529 | Tillbud | 468+30 | Liatorp n | Älmhult | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 2 | 2004-10-08 | Någon har kört av ena bommen på plankorsning "Liatorp Norr". Upptäcktes av tåg 529. | Tillbud | 468+030 | Liatorp N | Älmhult | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 2 | 1999-08-31 | Okänt fordon kör på bom vid plk Korkfabriken | Tillbud | 447+218 | Korkfabriken | Ale | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 2 | 2002-11-28 | Okänd bil körde på och skadade vägbom i plk "Korkfabriken" i Älvängen. | Tillbud | 447+218 | Korkfabriken | Ale | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 2 | 2004-03-22 | Bommarna i plankorsningsanl. "Ångkraftverket" påkörda och skadade.Vägskyddsanläggning påkörd av okänt vägfordon. Anläggningen skadad. Fordonet var stulet och avvek från platsen. Vittne noterade reg. nr. BIS olyckor 1972 | Tillbud | 49+333 | Ångkraftverket | Stenungsund | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 2 | 2004-06-21 | Vägfordon har kört på och skadat bommar i vägskyddsanläggning. BIS olyckor 1979 | Tillbud | 49+333 | Ångkraftverket | Stenungsund | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 2 | 2004-05-21 | Bompåkörning Edholmsgatan BIS olyckor 2072 | Tillbud | 270+325 | Edsholms | Grums | AH | 0 | 0 | Tung lastbil | Okänt |
| 2 | 2000-01-03 | Plogbil backar av bom, blir instängd och måste köra igenom bom då tåg är på väg. | Tillbud | 127+615 | Norrängsgatan | Sala | AH | 0 | 0 | Motorredskap | Nej |
| 2 | 2001-04-05 | Bompåkörning | Tillbud | 70+706 | Lyviksvägen | Ludvika | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 2 | 2003-10-24 | Bil körde på bomanläggningen vid Lyviksvägen | Tillbud | 70+705 | Lyviksvägen | Ludvika | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 2 | 2002-09-27 | Lastbil blev fast på plankorsningen p.g.a. köbildning på plk "Skolhusallén", när bommarna gick ned. Larm till Fjtkl via SOS-alarm. Fjtkl utförde nödfrånkoppling. Tåget stannade innan plankorsningen. Oklart om tåget stannade av spänningslös kontaktledning | Tillbud | 348+151 | Skolhusallén | Sundsvall | AH | 0 | 0 | Tung lastbil | Nej |
| 2 | 2003-09-15 | Okänd bilist körde igenom bommarna på Skolhusallén. | Tillbud | 348+151 | Skolhusallen | Sundsvall | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 2 | 2001-01-04 | Lastbil körde mot rött knäckte bommar. Anmält av Tkl, Östersund. | Tillbud | 586+678 | Hamngatan | Östersund | AH | 0 | 0 | Tung lastbil | Nej |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 2004-05-04 | Bil kvar mellan bommar vid bomfällning. Bilen körde genom bommarna. | Tillbud | 586+678 | Hamngatan | Östersund | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 1 | 1999-08-25 | Skadad bom uppspår. | Tillbud | 571+568 | Sjöholmen | Eslöv | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 1 | 2003-08-05 | Avkörd bom Båtsmansgatan | Tillbud | 62+524 | Båtsmansgatan | Ystad | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 1 | 1999-11-23 | Sk. Bondfängare påkörd vid plankorsning Gripenbergs Slott km.305.367. | Tillbud | 305+367 | Gripenbergs Slott | Tranås | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 1 | 2004-11-07 | Personbil körde genom bommar. 0felia 278662 BIS Olyckor 2037 uppskattad kostnad 15000 sek. Olyckan anmäld av polis. | Tillbud | 21+413 | Vetlandavägen | Eksjö | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 1 | 2002-02-21 | Bompåkörning Vittenevägen, smitning | Tillbud | 402+178 | Vittenevägen | Vårgårda | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 1 | 2002-03-18 | Bompåkörning vid Läckögatan, smitning. | Tillbud | 94+111 | Läckögatan | Lidköping | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 1 | 1999-05-07 | Personbil instängd mellan bommar, körde rakt igenom Högtorpsgatan Hallsberg BIS olyckor 1226 | Tillbud | 199+935 | Högtorpsgatan | Hallsberg | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 1 | 2003-06-02 | Bompåkörning Askersundsvägen i Vretstorp | Tillbud | 214+210 | Vretstorp | Hallsberg | AFH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 1 | 2003-04-01 | Bompåkörning Salstagatan BIS olyckor 1880 | Tillbud | 111+324 | Salstagatan | Flen | AFH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 1 | 2002-02-23 | Bompåkörning | Tillbud | 8+785 | Sulkyvägen | Sundbyberg | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 1 | 1999-11-15 | Bommar avkörda vid Bergsbrunnavägen. | Tillbud | 59+270 | Bergsbrunna | Uppsala | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 1 | 2003-03-18 | En buss får motorstopp mitt på övergången Banelund. Får bommen i taket när anläggningen börjar gå. Man huinner dock få bort bussen innan tåget anländer. | Tillbud | 130+430 | Banelund | Sala | AFH | 0 | 0 | Buss | Nej |
| 1 | 2001-05-31 | Bil under bom på Stifrgårdsvägen. | Tillbud | 5+047 | Stiftsgårdsvägen | Nyköping | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 1 | 2004-01-22 | Bil körde genom bommar i plankorsning Axmarstig. | Tillbud | 155+890 | Axmarstig | Gävle | AH | 0 | 0 | Pb/Lätt lastbil | Nej |
| 1 | 1994-12-15 | | Tillbud | 260+547 | Törebodavägen | Töreboda | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 1 | 2002-02-17 | Någon har kört på bommarna i vägskyddsanläggningen Stationsgatan/Överbergsvägen. Den som kört på bommarna smet från platsen. | Tillbud | 258+607 | Stationsgatan/Överbergevägen | Hudiksvall | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 1 | 1995-03-20 | | Tillbud | 286+712 | Mariestadsvägen | Töreboda | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 1 | 1995-03-24 | | Tillbud | 297+974 | Bankällavägen | Skövde | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |
| 1 | 1996-01-30 | | Tillbud | 327+941 | Storgatan | Skövde | AH | 0 | 0 | Okänt | Okänt |

## 13.4 Extrait de «Kartläggning av plankorsningar» (Inventaire des passages a niveau) de TRV (2006)

Hinderdetektor (8.2.2)

*Syftet med en hinderdetektor är att upptäcka fordon som finns i korsningsområdet när bommarna ska fällas i plankorsningen. Det finns två fall där det idag finns skäl att installera en hinderdetektor. Det ena fallet är vid korta fordonsmagasin där det kan uppstå en bilkö över plankorningen. Det andra är när tågens hastighet är över 160 km/h och vägtrafiken är frekvent.*

*När detektorn upptäcker ett fordon slutförs inte bomfällningen eftersom fordonet annars skulle bli instängt mellan bommarna utan att kunna lämna korsningsområdet. När bommarna inte är fällda kommer alla signalbesked mot tåget att vara restriktiva och tvinga det att stanna före plankorsningen.*

*Dagens hinderdetektorer har slingor som upptäcker metall. Några anläggningar använder infraröda ljusstrålar. På försök finns också en anläggning med laserteknik. Detektorerna med slingor är känsliga för störningar och måste installeras med stor omsorg för att de ska fungera felfritt.*

**Détecteur d'obstacles**

Le but d'un détecteur d'obstacles est de détecter les véhicules qui se trouvent dans la zone dangereuse lorsque les barrières doivent être abaissées au passage à niveau. Il y a deux cas où l'on installe des détecteurs d'obstacles :

— Un cas concerne les sas courts (entre PN et carrefour proches) où il peut y avoir un embouteillage pendant le cycle du PN
— Le deuxième cas est lorsque la vitesse des trains est supérieure à 160 km/h et que le trafic routier est fréquent.

Lorsque le détecteur détecte un véhicule, la fermeture des barrières de sortie n'est pas terminée, sinon le véhicule serait coincé entre les barrières sans pouvoir quitter la zone d'intersection. Lorsque les barrières ne sont pas abaissées, tous les signaux à l'encontre du train seront fermés et l'obligeront à s'arrêter avant le passage à niveau.

Les détecteurs d'obstacles d'aujourd'hui ont des boucles qui détectent le métal. Certaines installations utilisent des faisceaux infrarouges. Une installation dotée de la technologie laser est également mise à l'essai. Les détecteurs à boucle sont sensibles aux interférences et doivent être installés avec le plus grand soin pour s'assurer qu'ils fonctionnent parfaitement.

Hinderdetektor (9.4)

D

*et har visat sig att hinderdetektorn har förhindrat olyckor. Hinderdetektorer finns eller har funnits på drygt 100 vägskyddsanläggningar under 15 års tid. Några enstaka hinderdetektorer har dock funnits sedan 1970-talet.*

*Det finns tre kända fall där kollisioner har förekommit. En av dessa inträffade i en plankorsning där en personbil körde igenom de redan fällda bommarna då tåget befann sig mycket nära plankorsningen. De två andra kollisionerna har skett vid en och samma plankorsning. Denna korsning är en tidig försöksanläggning och den enda kvarvarande halvbomsanläggningen med hinderdetektor och är inte försedd med vare sig ATC eller fellarm. Att den inte uppgraderats till en bättre standard beror på att korsningen kommer att byggas bort i samband med en upprustning av järnvägen.*

*Det finns inget sätt att registrera alla de tillfällen där hinderdetektorn har förhindrat en kollision. Tidningsnotiser, vittnesuppgifter men framförallt frånvaron av olyckor (frånsett de som nämns ovan) visar att hinderdetektorn har varit en mycket framgångsrik satsning. Se även avsnitt 8.2.2 Hinderdetektor.*

Détecteur d'obstacles

Il a été démontré que le détecteur d'obstacles a permis d'éviter les accidents. Des détecteurs d'obstacles existent ou ont existé dans plus de 100 installations de protection routière depuis 15 ans.

Certains existent depuis les années 1970.

Il y a trois cas connus où des collisions se sont produites. L'un d'eux s'est produit à un passage à niveau où une véhicule a franchi les barrières déjà abaissées car le train était très proche du passage à niveau. Les deux autres collisions ont eu lieu au même passage à niveau. Cette intersection est une installation expérimentale précoce et la seule installation à demi-barrières avec détecteur d'obstacles et n'est équipée ni d'ATC ni d'alarmes de défaut au train. Le fait qu'il n'ait pas été amélioré est dû au fait que le passage à niveau sera supprimé dans le cadre de la rénovation du chemin de fer.

Il n'y a aucun moyen d'enregistrer toutes les occasions où le détecteur d'obstacles a empêché une collision. Des articles de journaux, des témoignages mais surtout l'absence d'accidents (en dehors de ceux mentionnés ci-dessus) montrent que le détecteur d'obstacles a été une entreprise très réussie.

### 13.4.1 Évaluation de la « probabilité d'accident » des passages à niveau Suédois équipés de détecteurs d'obstacles et comparaison au risque moyen d'accident en France

En France, le taux d'accident moyen des années de référence est d'environ 0,01/an

Sur les passages à niveau Suédois équipés de détecteurs d'obstacles, il y a eu un accident pour 83 PN depuis 40 ans

En admettant (hypothèse classique) que la probabilité d'accident est distribuée selon une loi de Poisson, on obtient

- Une probabilité d'accident « la plus vraisemblable » réduite de 90% par rapport à la probabilité moyenne d'accident en France
- Un intervalle de confiance (5/ 95%) de la probabilité d'accident sur les PN suédois équipés de Dopn réduite de 72,5% à $\approx$ 100% par rapport à la probabilité moyenne d'accident en France.

## 13.5 Analyse des rapports du Bea-TT à la lumière des enseignements de Moripan et du modèle

### 13.5.1 Préambule

Ce qui suit est une analyse « rétrospective » des rapports d'accidents établis par le Bea-TT sur une proportion, malheureusement assez faible, des accidents de PN en France.

Les accidents étudiés par le BEA-TT ne sont malheureusement pas « représentatifs » des accidents de PN, notamment parce qu'il y a un biais « gravité/spectaculaire », qui explique le nombre élevé d'accidents de transports exceptionnels dans l'échantillon.

Cependant, les rapports sont souvent d'excellente qualité, et permettent presque toujours une analyse rétrospective des causes.

### 13.5.2 Quasi-accident PN Bizanos (quasi-accident d'un bus immobilisé sur PN) – mai 2022

Même si l'on ne peut pas affirmer que la cécité d'inattention ait joué un rôle dans les causes immédiates de l'accident, l'analyse du BEA-TT montre que la séquence ayant conduit à l'accident a commencé par le conducteur s'engageant dans un itinéraire non approprié... parce qu'il suivait son GPS et ne remarquait pas les panneaux ou qu'il les interprétait mal.

À noter que ce dernier point est manifestement un problème récurrent, puisqu'on le rencontre dans trois des accidents analysés par le BEA-TT : Bizanos, Montauban, Sillé...

Dans les trois cas, interdiction aux PL, ou aux cars, mais autorisation pour les bus ou les VOM.

Le « message » conscient ou inconscient est que l'interdiction n'EST PAS LIEE à la sécurité, mais à la tranquillité des riverains... et cela affaiblit fortement le message

Il est cependant possible que la cécité d'inattention ait joué un rôle dans la cause immédiate, les suspensions n'ayant pas été relevées (selon les témoins) ou insuffisamment (selon le conducteur) pour une cause non identifiée.

### 13.5.3 Accident PN Hericy sur PN Piétons (novembre 2021)

L'accident a eu lieu vers 8h du matin, en automne, par temps de brouillard, avec une visibilité réduite (100m)

Le train ne circulait pas à son horaire habituel.

La visibilité physique, par temps favorable, serait de l'ordre de 600m dans un sens (18s), de 310 m dans l'autre (9s)

Avec une visibilité réduite à 100 /150 m, le temps entre visibilité et impact est de 3 à 4,5s, la distance à parcourir dans l'emprise ferroviaire est de 12 m entre les portillons.

À noter, à titre de comparaison, que la durée de rouge de dégagement d'un feu tricolor est dimensionnée par la largeur de la traversée ou plus exactement, par la durée de traversée d'un piéton à la vitesse de 1m/s.

L'adolescent victime de l'accident est parti à son heure habituelle, mais a oublié ses clés. Il a donc dû retourner chez lui, et était en retard pour arriver à son établissement d'enseignement.

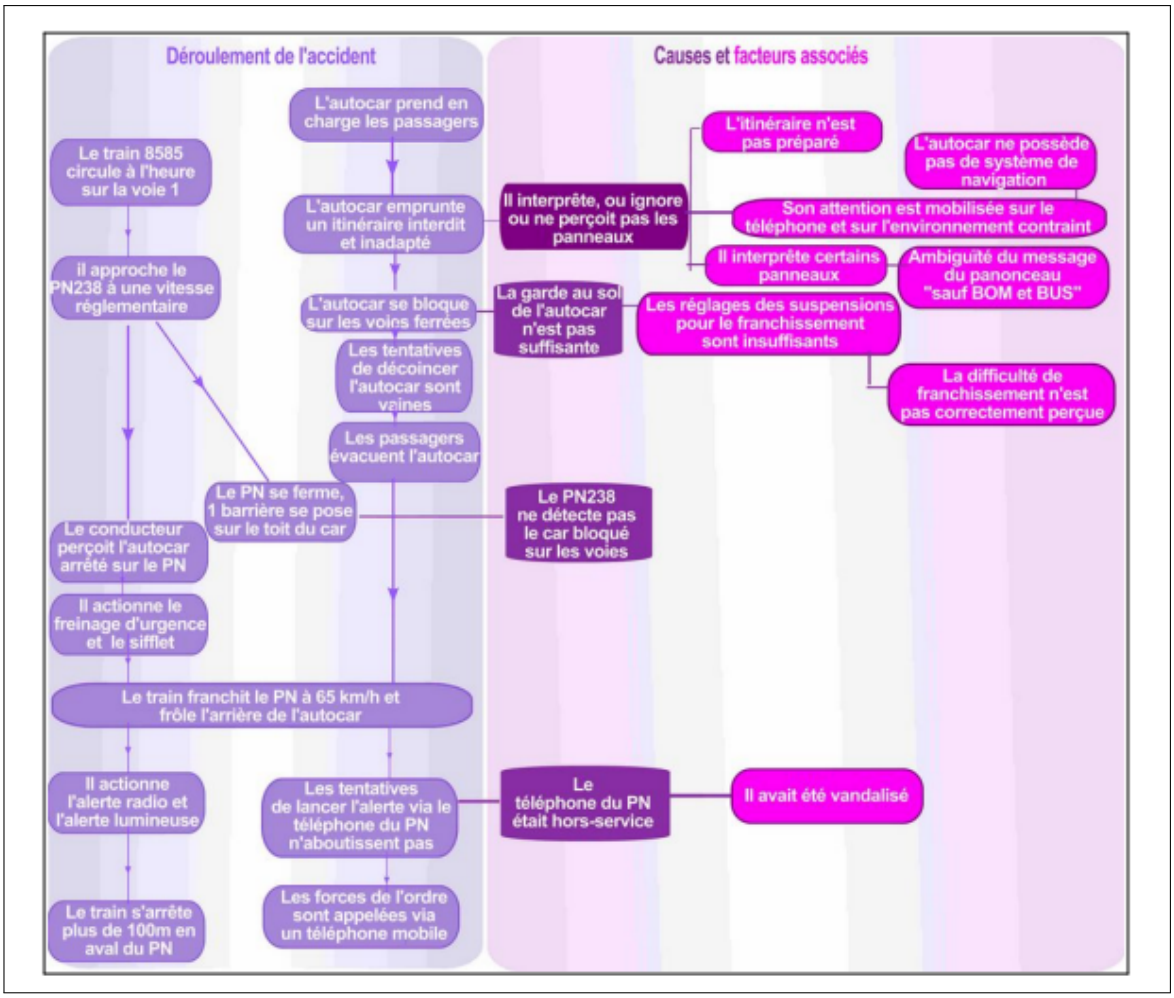



FIGURE 162 – Arbre des causes accident de Bizanos (source BEA-TT)

Il existe un passage dénivelé (passerelle) à proximité et un passage inférieur, mais le PN 27a permettait un itinéraire plus court et sans dénivellation.

L'enquête n'a pas vérifié s'il écoutait de la musique ou utilisait son téléphone au moment des voies, mais la victime a assuré que non. Toutefois, la température était basse (1°C) et sa cagoule de protection contre le froid a pu gêner la visibilité

Dans son enquête, le BEA-TT a établi un arbre des causes, qui semble effectivement refléter les analyses faites dans le cadre de MORIPAN et de cette thèse.

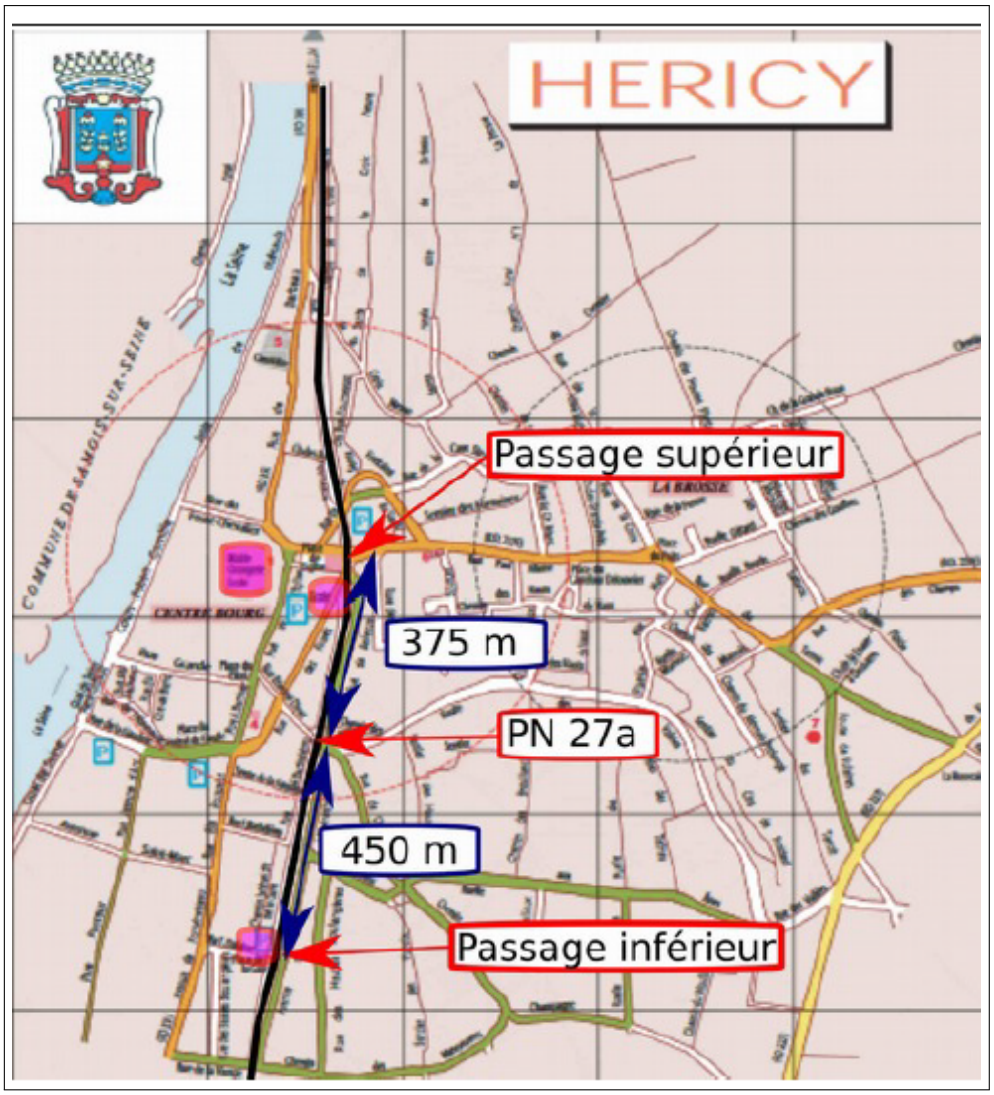
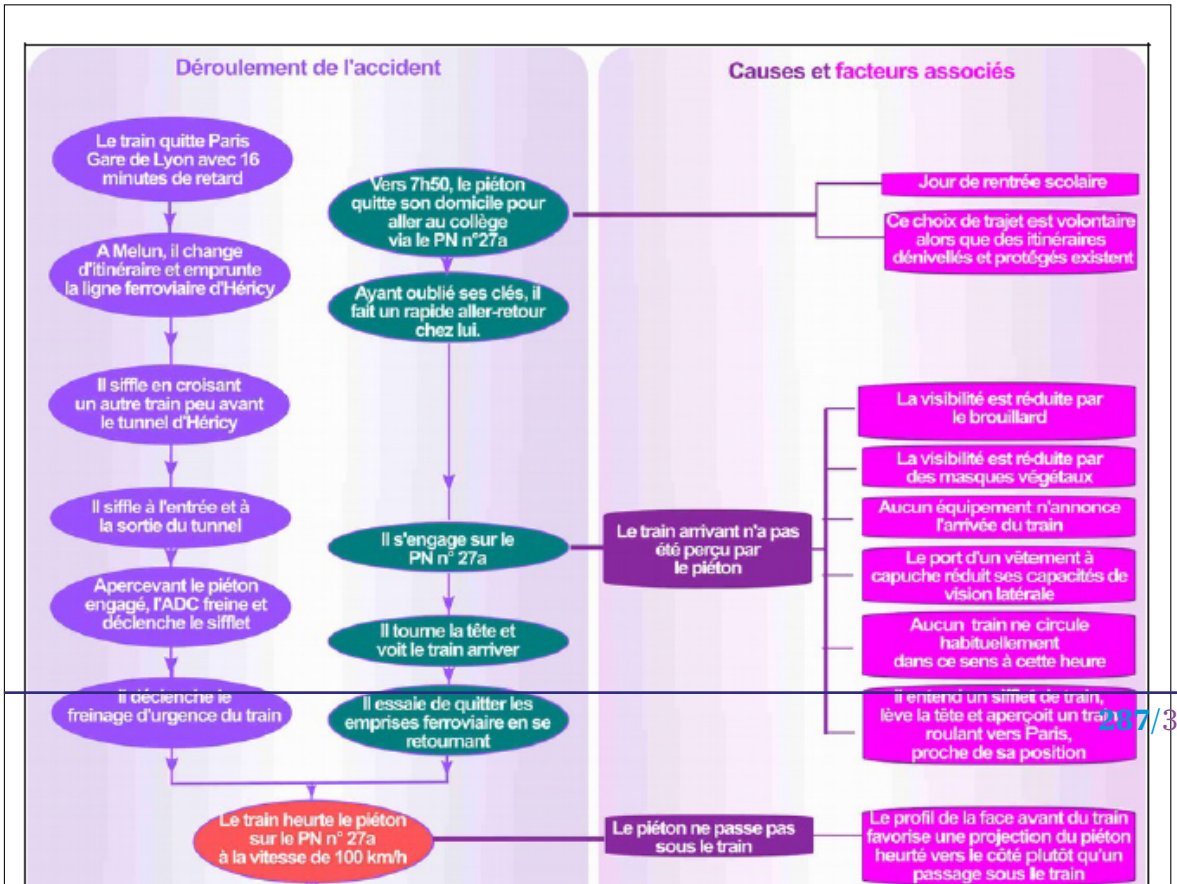



FIGURE 163 – Passages alternatifs (source BEA-TT et mairie d'Hericy)



#### Notre interprétation

La cause de l'accident est probablement la cécité d'inattention, favorisé par certaines particularités du PN

- Le train ne circulait pas à son horaire habituel
- Le piéton était en retard, pressé, a probablement vérifié rapidement l'arrivée d'un train
- Un facteur aggravant est la mauvaise visibilité (dans tous les cas, la visibilité de ce PN était insuffisante, et le brouillard la réduisait encore), même si le PN était conforme à la réglementation

Ce type de PN est vulnérable à la fois à l'erreur de jugement (illusion de Leibowitz) et à la cécité d'inattention, et même si la visibilité était améliorée, le risque resterait élevé.

Des dispositifs d'annonce permettraient une amélioration, mais limitée.

Nous rejoignons donc l'analyse du BEA-TT ainsi que sa conclusion (recommandation de fermeture)

### 13.5.4 Accident Trains de MD Transport exceptionnel au PN de Rumigny (juin 2021)

Les causes de cet accident sont multiples..., notamment le non-respect de la réglementation routière

Même si le PN présentait un certain nombre de facteurs aggravants (tracé en plan difficile, visibilité, configuration routière complexe), la seule cause contributive est le profil en long...

Mais le profil en long n'était pas considéré comme difficile.

Il faut aussi noter qu'un second accident a eu lieu la même année sur ce même PN... or l'un des enseignements de MORIPAN est que plusieurs accidents rapprochés sur un PN sont une anomalie statistique qui indique qu'un PN est dangereux, et devrait déclencher une réflexion de sécurisation.

Si améliorer le tracé parait difficile, un détecteur d'obstacle permettrait d'éviter ce type d'accidents, même si, le moment étant assez faible, il faudrait une annonce longue pour obtenir une efficacité maximale.

Une autre possibilité serait l'installation, en amont et en aval, de dos d'âne au moins aussi difficiles que le PN (l'équivalent bas d'un portique G8) et à une distance suffisante (mais pas trop importante) du PN.

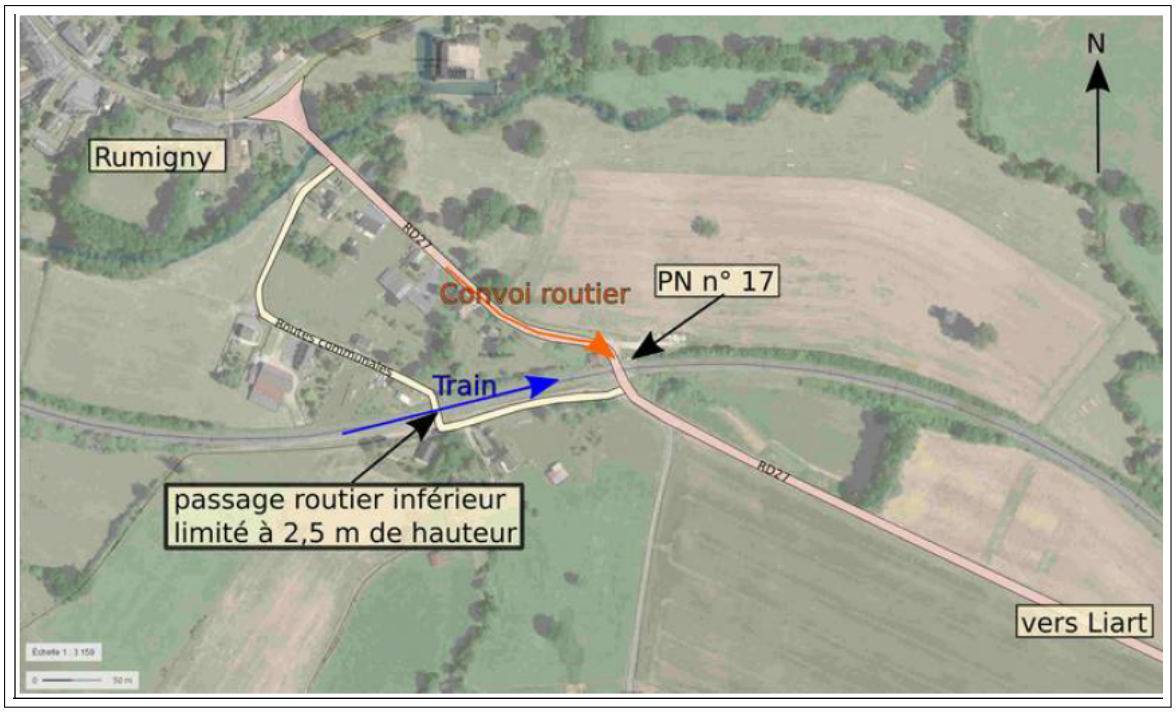



FIGURE 164 – Environnement du PN de Rumigny source BEA-TT

### 13.5.5 Accident PN Péronnas – janvier 2021

Cet accident illustre malheureusement la difficulté de reconstituer les circonstances d'un accident lorsque la conductrice (et unique occupante) est décédée, qu'il n'y a pas de témoins, et que le véhicule est en très mauvais état, quasiment pulvérisé.

Le passage à niveau ou a eu lieu l'accident présente un tracé routier médiocre, avec une très mauvaise visibilité des R24, ainsi qu'un rétrécissement important (de 6,15 à 4,3 m) de la chaussée circulable au niveau du platelage.

Avec 26 trains et 1400 v/j, ce PN se situe un peu en dessous de la médiane des PN du RFN en termes de fréquentation.

Mais grâce à un travail remarquable, le BEA-TT a réussi a éliminer la plupart des possibilités de scénarii d'accident, notamment la chicane classique (dont on a vu dans MORIPAN qu'elle était beaucoup plus rare que les franchissements tardifs)

La conductrice était familière avec l'existence de ce passage à niveau, et ses caractéristiques, qu'elle empruntait quotidiennement pour ses parcours domicile travail. Elle savait donc que, compte tenu du tracé, il est impossible de franchir le PN sans déborder de la ½ chaussée, ni de se croiser sur le PN... bien que la vitesse autorisée au franchissement soit de 80. Compte tenu du tracé difficile et de l'impossibilité de croisement, la vitesse réelle est probablement beaucoup plus faible, et qu'une grande partie de l'attention de la conductrice ait été accaparée par les difficultés de circulation et la crainte de rencontrer un véhicule croiseur (cf notre interprétation de l'accident d'Allinges)

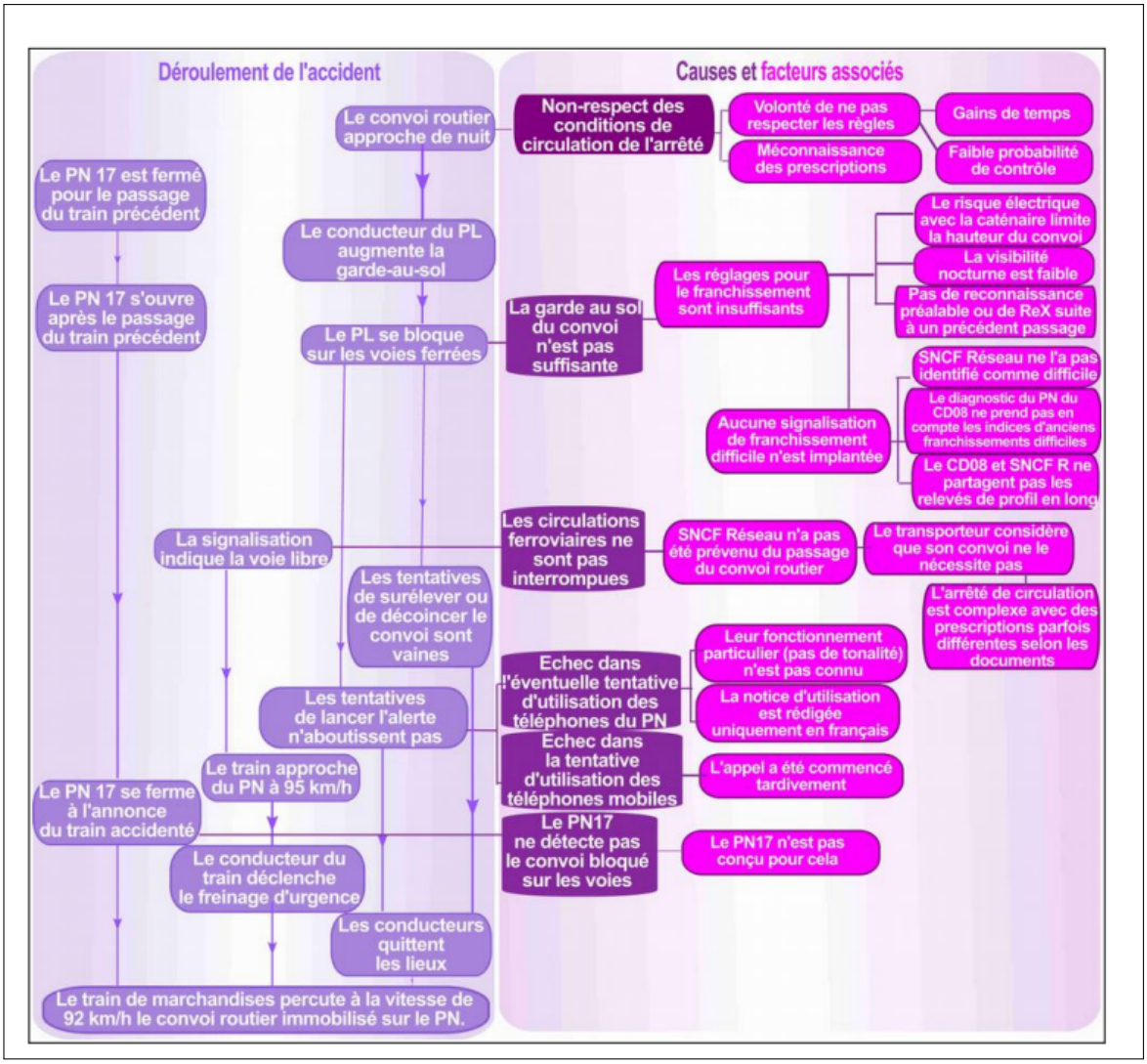



FIGURE 165 – Arbre des causes accident de Rumigny d'après BEA-TT

La visibilité du PN activé est de plus, médiocre à cause de la végétation, ce qui augmente fortement le risque de pénétration tardive dans le PN d'après notre modèle.

Ces caractéristiques avaient été identifiées comme accidentogènes dans MORIPAN.

Les éléments en possession du BEA-TT ne lui ont pas permis de conclure, mais il est plausible qu'une combinaison de médicaments facilitant la distraction, et des difficultés de conduite (tracé sinueux, rétrécissement de chaussée au franchissement du PN) aient facilité la non perception du PN en cours de fermeture, puis que la conductrice se soit trouvée enfermée dans le PN (les demi-barrières ne permettaient pas une sortie facile, car plus longues que la ½ chaussée), se soit affolée et n'ai pu redémarrer à temps.

La cause la plus vraisemblable de l'accident de Peronnas, pour nous, est donc la cécité d'inattention, fortement favorisée par un tracé routier, une faible visibilité du PN activé et une difficulté de croisement qui ont pu mobilier l'attention de la conductrice au détriment du risque PN proprement dit.

À noter parmi les recommandations du BEA-TT :

> **Recommandation R1 adressée à la direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) :**
>
> **Porter devant les instances internationales l'intérêt qu'aurait l'inclusion du cas de détection des barrières abaissées des passages à niveau dans la liste des cas d'usage pour l'homologation des systèmes automatiques de freinage d'urgence.**

Il ne semble pas que ce soit le cas.

### 13.5.6 Accident PN Bourg en Bresse – octobre 2020

Il semble s'agir, d'après le BEA-TT d'une panne mécanique ayant immobilisé le véhicule sur les voies.

Nous ne partageons pas cette analyse :

- Il est peu probable que la véhicule soit tombée très précisément en panne au milieu du platelage du PN. Il est en revanche beaucoup plus probable que la véhicule se soit arrêtée sur le PN, pour une autre raison, et qu'elle n'ait pas pu redémarrer à temps.
- Les conducteurs étaient très âgés, et la cécité d'inattention s'aggrave avec l'âge.
- Le scénario le plus vraisemblable nous paraît être un PN remarqué « un peu tard », un freinage d'urgence et le véhicule cale sur le PN, le mauvais état du véhicule expliquant l'impossibilité de redémarrer.

À noter aussi que la préconisation d'un îlot par le BEA-TT ne nous paraît pas adéquate, et pourrait, si elle est mal réalisée, aggraver le risque.

### 13.5.7 Accident TER Ensemble routier surbaissé de Bouzicourt – octobre 2019

La raison principale de l'accident est le non-respect des règles élémentaires par le transport exceptionnel.

Cependant, il faut noter que,

- Le PN a une configuration routière complexe
- Il a un dos d'âne marqué, et la largeur du platelage et beaucoup plus faible que celle de la route.

Même lorsque ces éléments ne sont pas à l'origine de l'accident directement, ils peuvent, en focalisant l'attention sur d'autres risques que le PN, faire négliger celui-ci... par exemple, faire oublier au conducteur du véhicule surbaissé de relever les suspensions de la remorque en sus de celles du tracteur avant de s'engager sur le PN... et non après s'y être engagé.

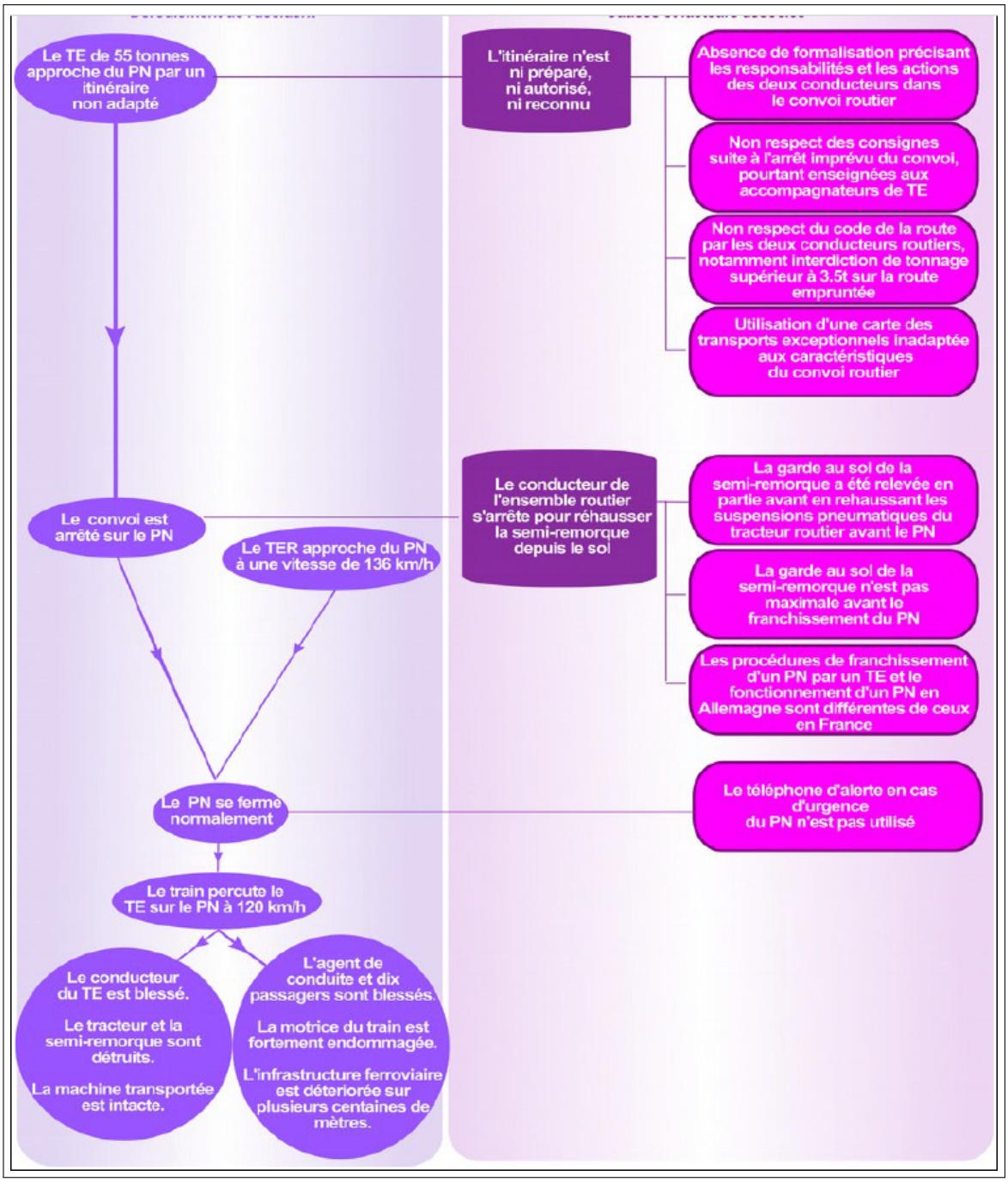



FIGURE 166 – Arbre des causes de l'accident de Boutricourt (source BEA-TT)

### 13.5.8 Accident PN Avenay Val d'Or – juillet 2019

On voit que, comme très souvent, il s'agit d'une configuration complexe, avec une mauvaise visibilité des feux du PN et des équipements de celui-ci (visibilité de 60 et 70 m selon le BEA-TT).

Il faut noter aussi que des fermetures prolongées peuvent se produire, notamment à cause de la gare d'Avenay, mais elles n'ont pas joué de rôle dans l'accident.

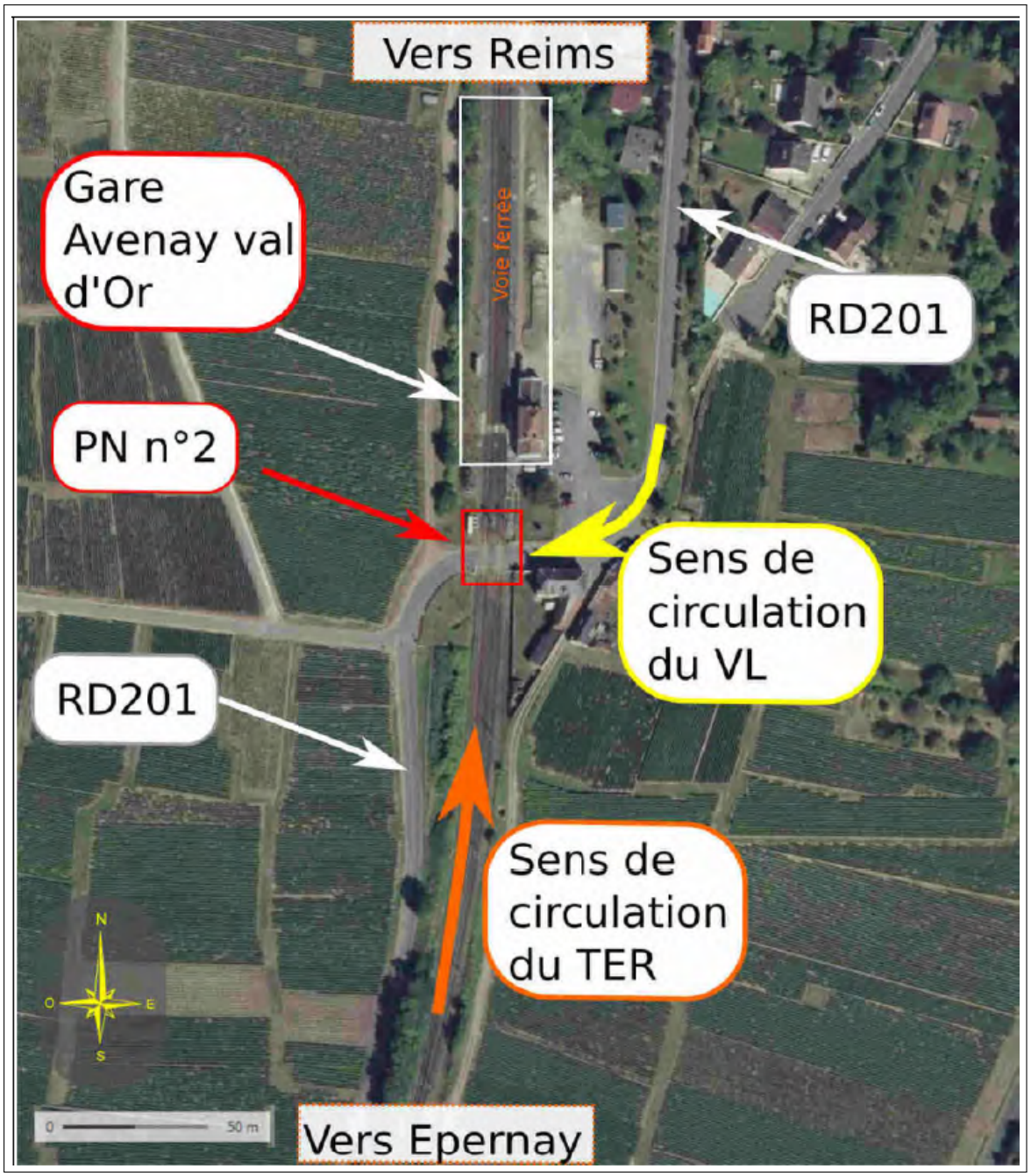



FIGURE 167 – Carte de l'accident (source BEA-TT)

Typiquement, il s'agit d'un accident de cécité d'inattention, avec comme circonstances favorisantes

- La mauvaise visibilité routière du PN
- La complexité de la route
- La prise de médicaments par la conductrice

À noter aussi que l'AEBS ne s'est pas déclenché. J'ai aussi constaté que la barrière de PN n'était pas détectée comme obstacle par le radar avant de l'AEBS de mon véhicule.

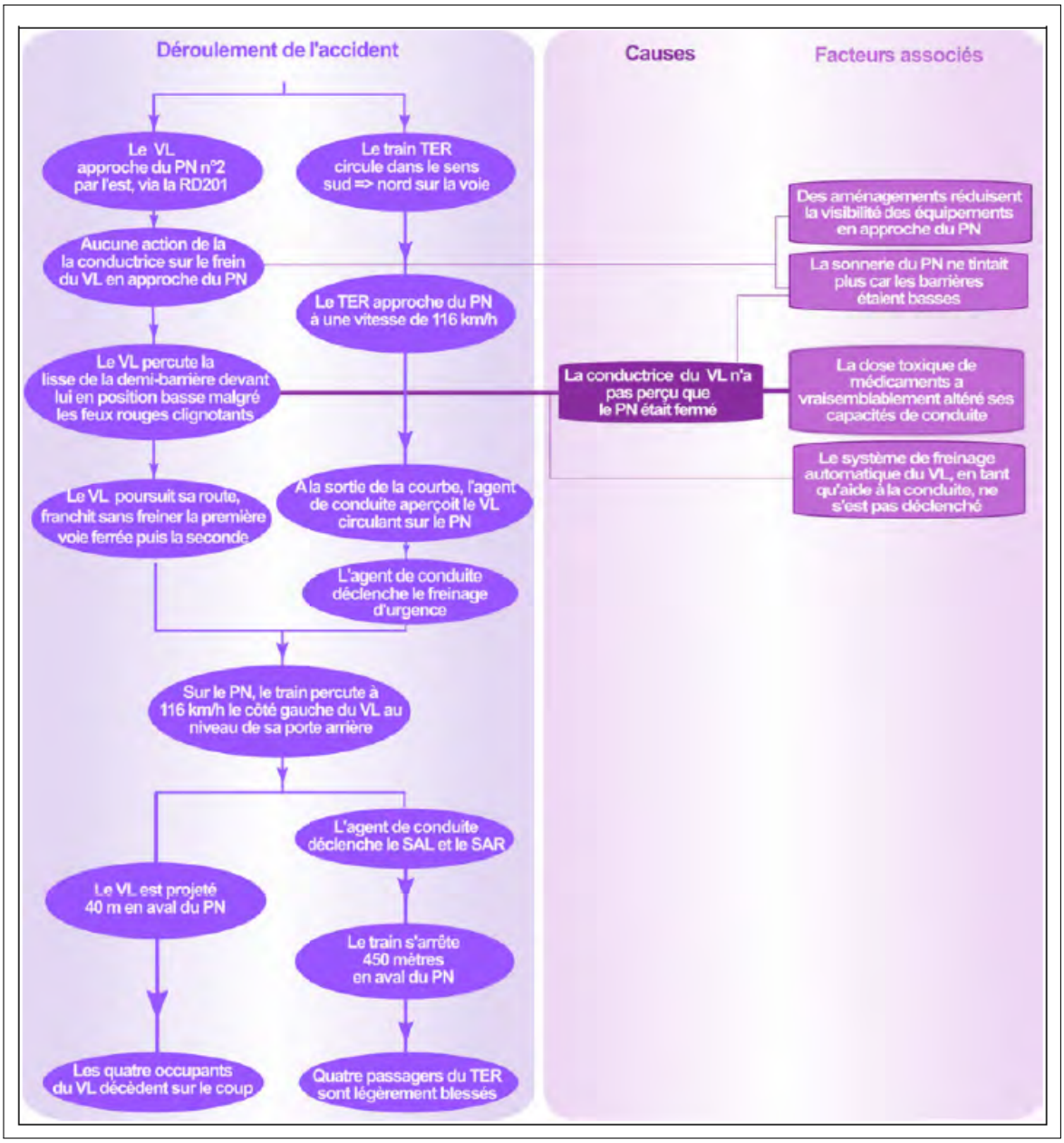



FIGURE 168 – Arbre des causes accident d'Avenay

### 13.5.9 Accident PN Roissy-en-Brie – septembre 2019

Dans leur rapport, le BEA-TT a établi un arbre des causes, qui est presque une illustration parfaite du mécanisme par lequel une configuration routière complexe augmente le risque de cécité d'inattention, et de l'existence d'un mécanisme d'esquive qui, dans ce cas précis, n'a pas fonctionné.

L'attention du conducteur, qui était peu expérimenté, se porte essentiellement sur des risques routiers « banaux » correspondant à son expérience, aux dépens du risque PN

Elle ne perçoit pas la fermeture du PN en cours :

— Parce que son attention est attirée par d'autres risques plus courants

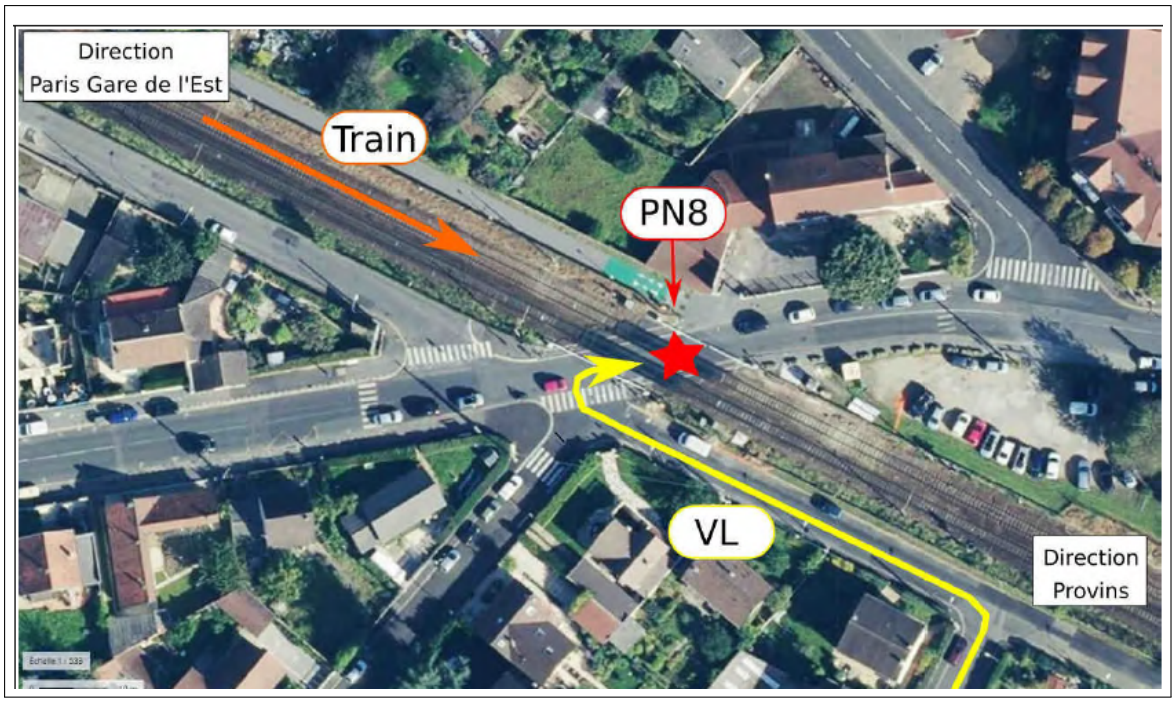



FIGURE 169 – Accident de Roissy-en-Brie (source BEA-TT)

— Parce qu'elle a peur d'une erreur de direction et suit son GPS

### 13.5.10 Accident PN Saint-Étienne (Chicane sur PN à îlots) – Mai 2019

Cet accident n'est pas représentatif des chicanes « traditionnelles », qui sont soit

— Des passages tardifs peu après le début de descentes des barrières
— Des passages, souvent groupés (effet de troupe) après une fermeture longue, et des automobilistes qui considèrent que le PN est « en panne » et que l'indication d'annonce est erronée

Dans ce cas, il s'agit d'un conducteur peu expérimenté (âge 20 ans), probablement préoccupé par d'autres sujets (il passait un examen), confronté à une configuration complexe et « améliorée » par une jungle urbaine de végétation, d'affichages et de signalisations apparemment contradictoires, conduisant en suivant son GPS et qui a confondu la voie à contre sens matérialisée par l'îlot du PN avec la bifurcation dans la direction qu'il cherchait...

Comme disent les fiabilistes... KISS : Keep it super simple. Un système fonctionnera d'autant mieux, sera plus fiable s'il est simple, si l'utilisateur n'a pas de questions à se poser.

### 13.5.11 Accident PN Pavilly – avril 2019

L'analyse du BEA-TT est que le véhicule est arrivé à très basse vitesse sur le PN, que les feux se sont déclenchés alors que la véhicule était pratiquement au niveau des barrières d'entrée, et que, compte tenu de la vitesse très faible, qu'elle était encore dans l'emprise du PN lorsque les barrières de sortie se sont fermées.

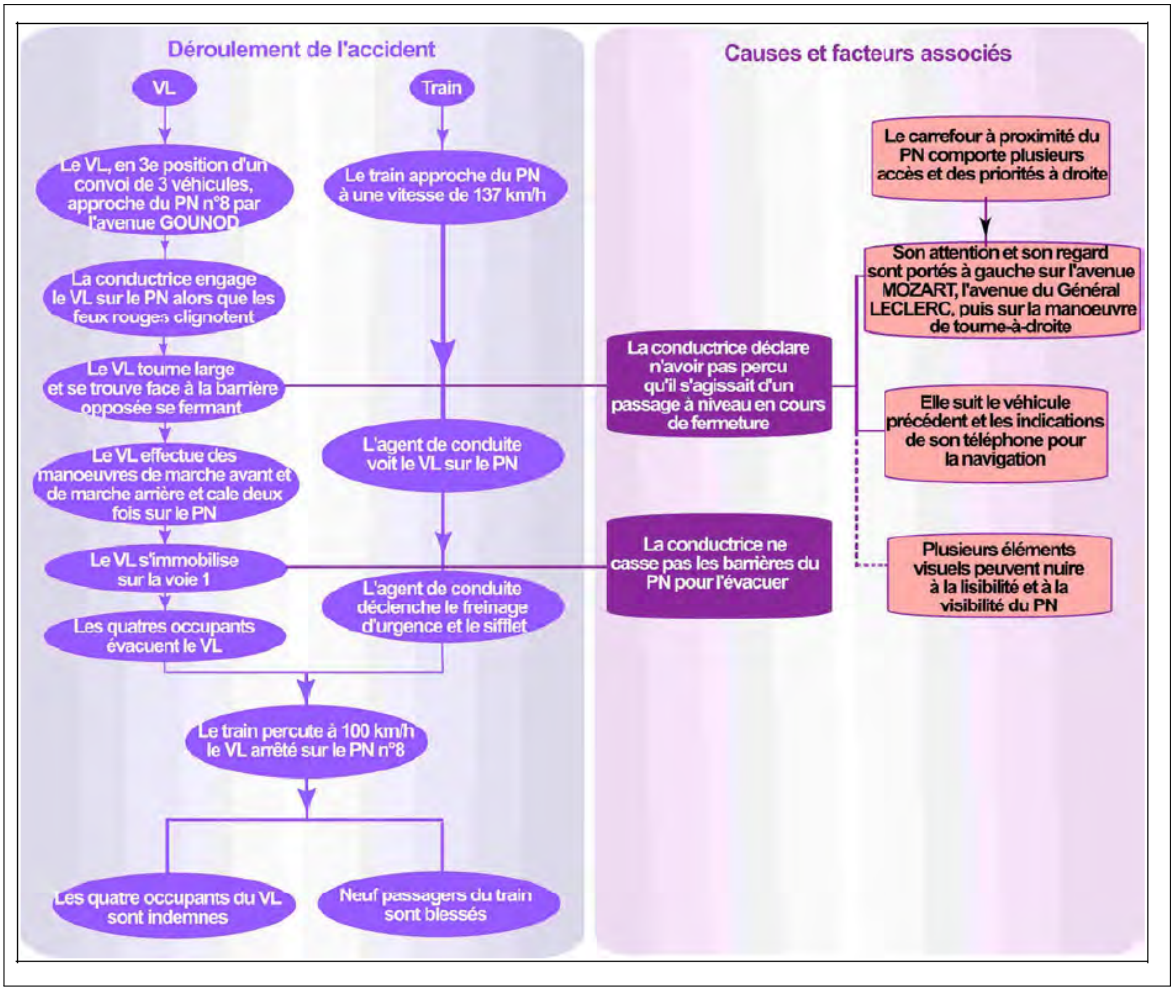



FIGURE 170 – Arbre des causes accident Roissy-en-Brie 2019 (source BEA-TT)

Ce scénario est possible, mais nécessite une vitesse de la véhicule de l'ordre de 1 m/s, en l'absence de bouchon, et nous paraît peu plausible

Il nous paraît plus vraisemblable que le VL est arrivé alors que les feux clignotaient, mais que les barrières n'étaient pas encore en cours de fermeture, et que la conductrice n'a pas remarqué les feux (qui sont d'ailleurs assez peu visibles et peu longtemps avec les courbes d'accès au PN, comme d'ailleurs souligné par le BEA-TT)

### 13.5.12 Accident PN Coulogne – avril 2018

[

Facteurs de risques routiers] Facteurs de risques routiers

- PN en Alignement, mais 64 trains par jour... Suffisamment pour réduire le risque de cécité d'inattention
- Rétrécissement (léger) avant PN

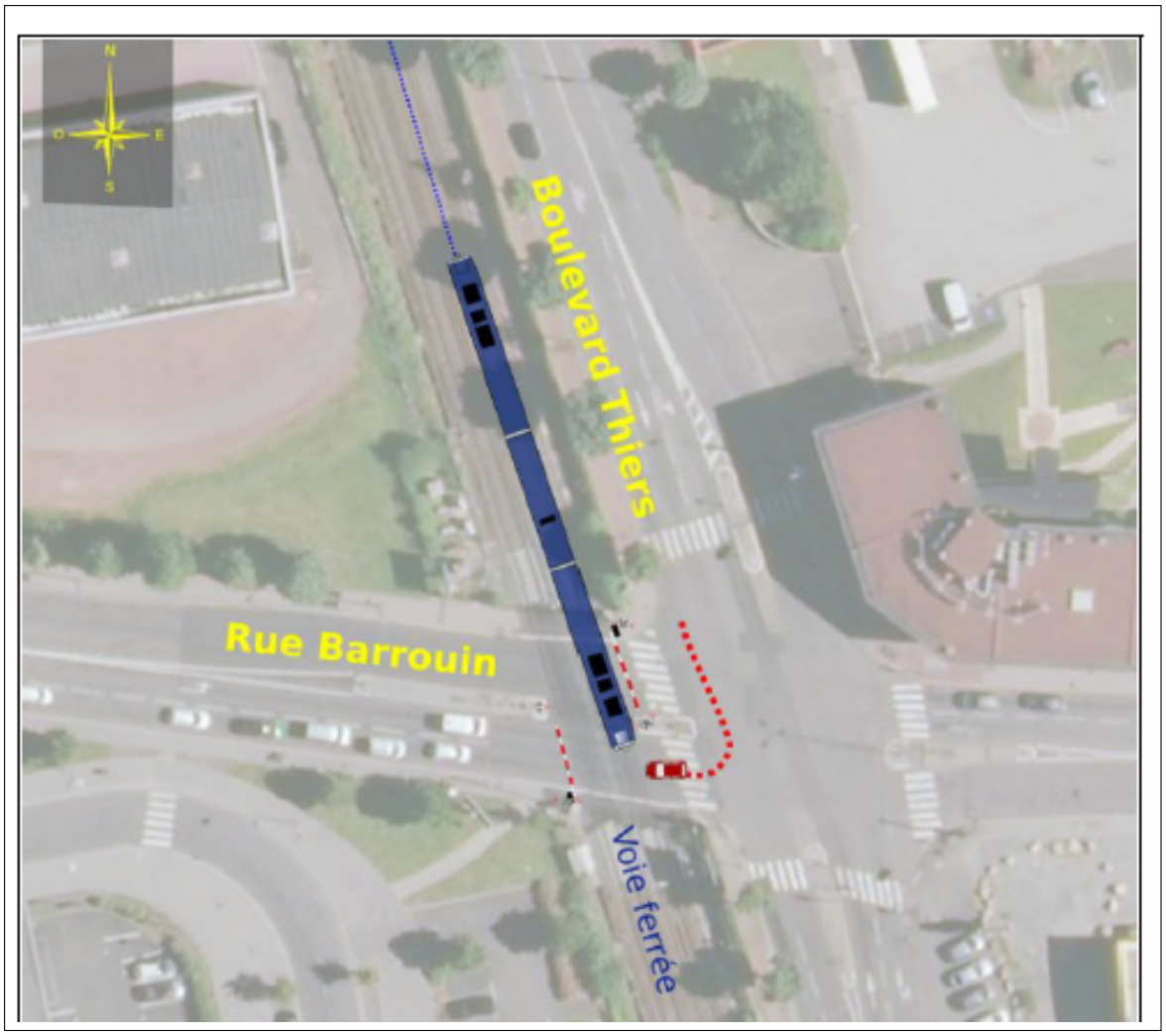



FIGURE 171 – Configuration des lieux de l'accident de Saint-Étienne

Dans l'ensemble, PN qui paraîtrait peu accidentogène au vu des critères que l'on a pu développer dans MORIPAN (pas de carrefours proches, pas de gare), le seul facteur de risque routier étant le léger rétrécissement et l'alignement).

Cependant, au moment de l'accident, le PN n'était pas dans sa configuration normale (alternat et travaux).

La victime était une personne âgée (80 ans), qui semble avoir contourné la barrière qui était baissée, et le PN activé, après avoir attendu au niveau du feu routier de signalisation temporaire.

La conductrice étant décédée dans l'accident, elle n'a pu être interrogée. Cependant, les mesures de MORIPAN montrent que les « vrais » contournements de barrières sont rares.

#### Mon interprétation

Les travaux se faisant en Alternat, et la véhicule devant se déporter de l'autre côté de la chaussée de l'autre côté du PN, il est possible que la conductrice ait interprété que la cir-

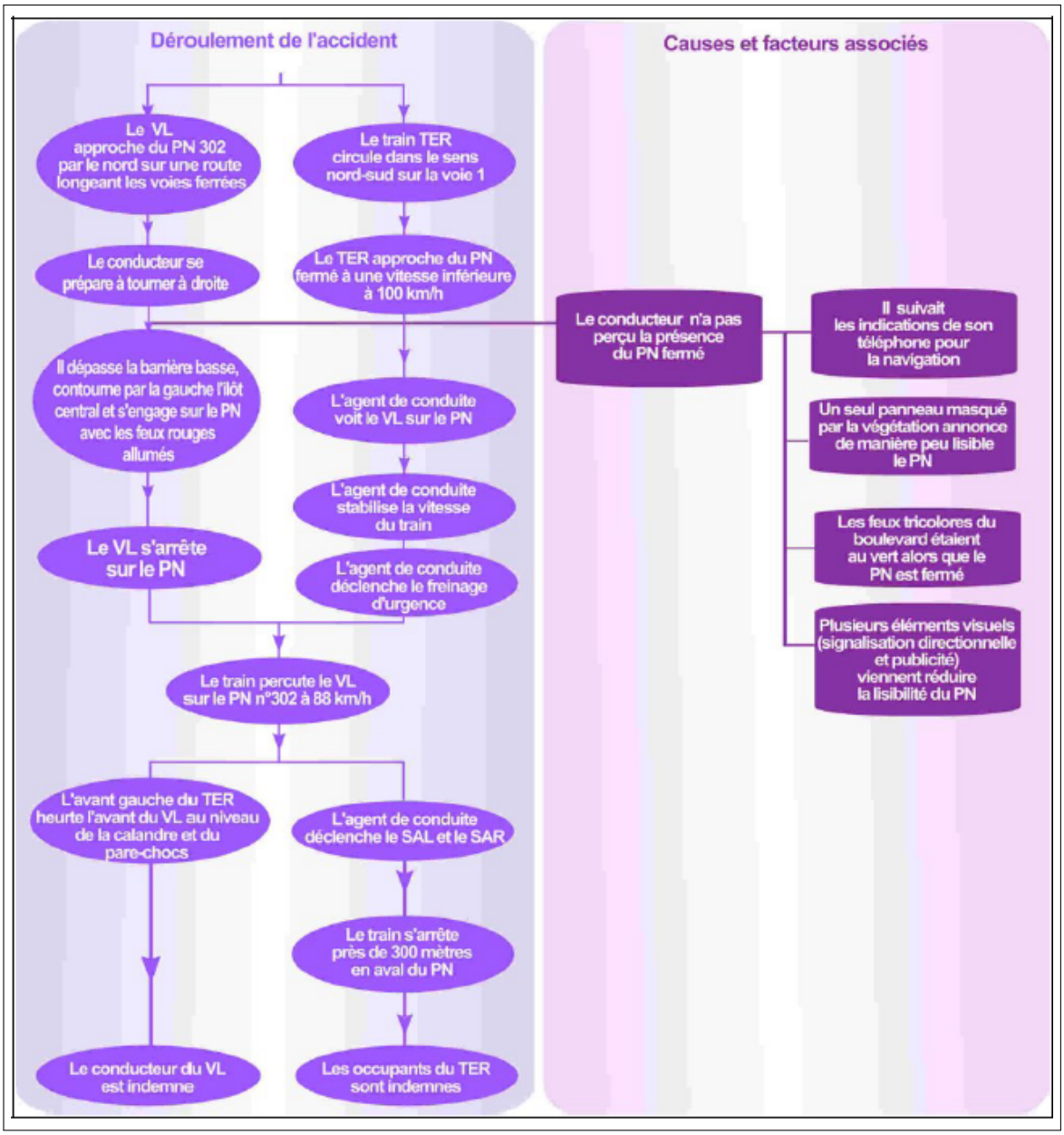



FIGURE 172 – Arbres des causes de la « chicane » de l'accident de PN de Saint-Étienne

culation sur voie unique démarrait au niveau du PN et que le passage à niveau fermé faisait partie du dispositif de sécurisation routier du chantier (victime de 80 ans ! ce profil de victime (âgée, féminin) est plus typique de l'erreur d'interprétation ou de la cécité d'inattention que de la délinquance routière.)

D'une manière plus générale, la présence de travaux dans la zone des PN semble être un facteur aggravant important du risque (erreur d'interprétation de la signalisation ou facteur aggravant du risque de cécité d'inattention, et présent dans plusieurs accidents analysés par le BEA-TT (dont un accident à Saint-Médard))

### 13.5.13 2 Accidents PN Auxerre – décembre 2010 et novembre 2018

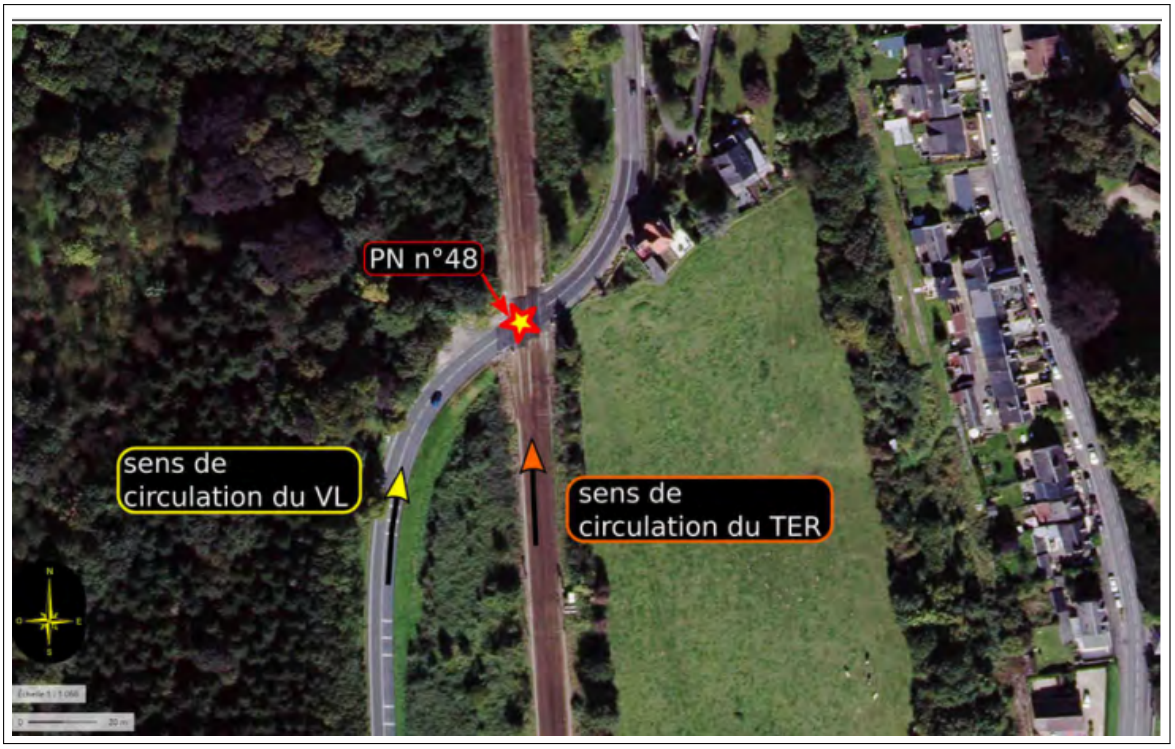



FIGURE 173 – Accident de Pavilly (avril 2019)

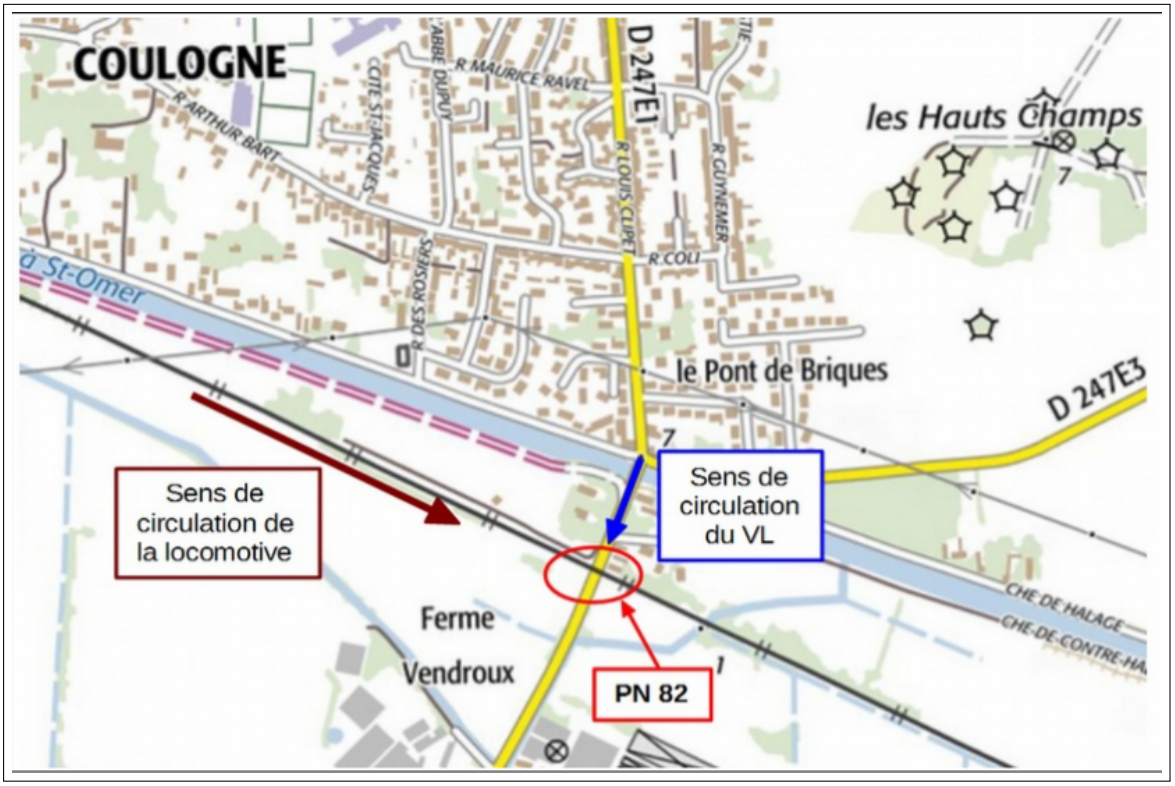



FIGURE 174 – Accident de Coulogne (avril 2018)

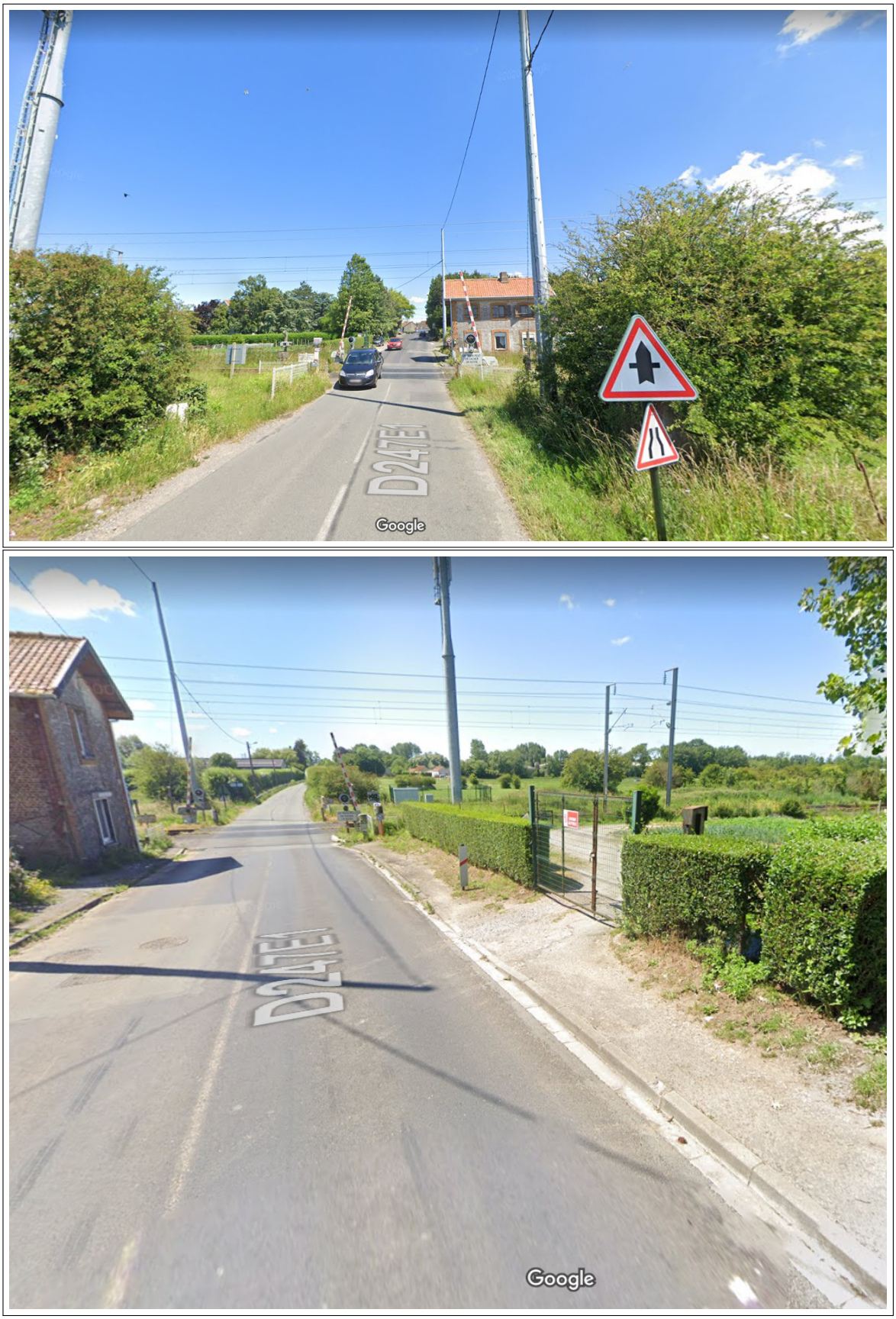



FIGURE 175 – Accident de Coulogne (photos PN)

FIGURE 176 – Accident de Coulogne (photo travaux)

### Accident PN Auxerre – novembre 2018

PN à SAL 2, a moment élevé, mais ayant eu trois accidents en moins d'une vingtaine d'années, ce qui implique l'existence de facteurs accidentogènes à identifier.

Ce PN présente effectivement plusieurs facteurs de risques tels qu'identifiés dans MORIPAN :

- Présence d'un carrefour proche (rue neuve)
- PN en alignement côté Rue Neuve, voie non électrifiée, trafic ferroviaire modéré
- Sur-largeur au niveau du PN (bateau côté gauche et sur-largeur vraie côté droit)

La dangerosité de ce PN étant connue, il est remarquablement équipé (4 feux, radar de franchissement)

### Les constatations

Pas de bris de barrière

Pas de positionnement suggérant une « vraie chicane »

La conductrice semble avoir été distraite par un coup de téléphone.

Elle s'est engagée tardivement sur le PN, mais à un moment ou les barrières étaient suffisamment hautes (pas encore en baisse d'après les témoignages, a minima suffisamment haute pour que le véhicule passe sans heurt).

FIGURE 177 – PN Auxerre

FIGURE 178 – PN Auxerre – équipements

Il est vraisemblable, comme le suggère le BEA-TT, qu'elle ait vu tardivement le PN activé, et qu'elle ait freiné trop tard, le véhicule s'immobilisant sur le PN.

Elle a tenté une manœuvre d'esquive, en reculant pour s'appuyer sur la barrière.

Après quelques secondes, ne voyant pas de train arriver (mauvaise visibilité, illusion d'optique du train vu plus près et plus lent ?) et comme le PN étant un SAL 2 sans barrière de sortie, elle a cru pouvoir redémarrer et s'échapper.

Elle a donc redémarré et a été prise en écharpe par le train.

#### Notre interprétation

Ce scénario conforte les modèles en cours de mise au point :

- Arrivée relativement tardive sur le PN, mais pas de « vraie chicane »
- Incident/problème provoquant l'immobilisation sur la voie ferrée
- Manœuvre d'esquive
  - Dans une majorité des cas le temps restant est suffisant pour une manœuvre d'esquive. Il faut noter que si le VL était resté appuyé sur la barrière d'entrée, il n'y aurait pas eu impact
  - Contrairement à une idée reçue, il semble, d'après notre modèle que le temps de cycle des SAL 2 est parfois trop court pour la manœuvre d'esquive (soit parce que le conducteur met du temps à se décider, soit parce qu'il change d'avis comme ici) et que le risque de heurt avec un SAL 2 est au moins aussi grand qu'avec un SAL 4 à cycle plus long, malgré les barrières du SAL 4. Dans le cas de cet accident, il est même possible que l'absence de barrières du SAL 2 ait conduit la conductrice à chercher une « meilleure manœuvre d'esquive », et que s'il y avait eu des barrières de sortie, même avec un cycle court, il n'y aurait pas eu d'accident.

#### L'accident de 2010, sur le même PN

À la suite d'une altercation entre passagers, le chauffeur s'est arrêté juste après le passage à niveau (garé sur le trottoir)

À noter que dans cette zone, seul l'emprise du PN, ainsi que l'accès à une propriété privée sont les deux seuls endroits où il est possible de monter sur le trottoir avant plusieurs centaines de m.

Il semble que ce soit le « bateau » au niveau du PN que le bus ait utilisé pour monter sur le trottoir, plutôt que le bateau correspondant à l'accès à la propriété privée.

#### Notre interprétation :

Sans critiquer l'analyse faite en 2010 (Les données MORIPAN n'étaient pas disponibles) l'analyse de l'époque (le chauffeur a mal maitrisé la longueur de son véhicule) ne tient pas compte du fait que le PN est l'endroit qui, dans les deux sens de circulation, permet de se garer le plus facilement sur le trottoir

FIGURE 179 – PN Auxerre (Bateau)

Dans l'urgence, le chauffeur a utilisé – littéralement – la première opportunité qu'il avait de se garer.

En conclusion, le PN 19 d'Auxerre présente, selon l'analyse de MORIPAN, trois facteurs de danger

1. Présence d'un carrefour proche (rue neuve)
2. PN en alignement côté Rue Neuve, voie non électrifiée, trafic ferroviaire modéré

Qui favorisent la cécité d'inattention (en 2018, le téléphone portable a peut-être aussi joué)

1. Sur-largeur au niveau du PN (bateau côté gauche et sur-largeur vraie côté droit) qui favorise le risque d'erreur de conduite (manœuvre ou stationnement sur la voie ferrée)

Les dispositions prises après 2010 (radar contre la délinquance routière) visent un mode d'accident qui n'a pas été constaté dans MORIPAN.

Tant que les causes facilitant l'accident ne seront pas traitées (élimination de la sur-largeur, allongement du délai d'annonce ou DOPN, travail d'amélioration de la remarquabilité du PN activé), ce PN restera accidentogène.

### 13.5.14 Accident PN Bonneville sur Touques – Novembre 2017

S'agissant d'un PN à croix de Saint-André, il n'était pas couvert par MORIPAN, dont l'analyse portait essentiellement sur les SAL 2, et peu sur les SAL 4 et les croix de Saint-André.

Pas d'éléments supplémentaires par rapport à l'analyse du BEA-TT, mais on pourrait suggérer que, avec moins de véhicules que de trains, un PN normalement fermé, à batterie pourrait être plus pertinent qu'un PN classique

### 13.5.15 Accident PN Beuveille – Janvier 2016

Pas de vraie enquête du BEA-TT (problème de verglas) et pas assez d'éléments pour réanalyser.

Toutefois, le PN de Beuveille présente quelques caractéristiques des PN sensibles aux problèmes de cécité d'inattention (voie unique non électrifiée et faible nombre de trains, voirie en quasi-alignement, voiries latérales) qui ont pu contribuer à détourner l'attention du conducteur et à faciliter un freinage tardif.

### 13.5.16 Accident PN Nangis – Avril 2015

#### Critères de danger routier identifiés

Proximité de gare

Voiries parallèles à la voie ferrée

Dos d'Âne prononcé (MORIPAN n'identifiait pas le dos d'Âne en tant que tel, car il n'augmente pas l'accidentologie globale, mais il réduit l'accidentologie VL- en incitant à la prudence – mais augmente celle des PL

L'existence du dos d'âne n'était pas indiquée par la signalisation routière.

Il avait été relevé sur le PN des traces de frottement avec des véhicules bas avant l'accident.

#### Causes de l'accident

Le véhicule de transport exceptionnel s'est engagé dans un chemin interdit aux véhicules de plus de 3,5 tonnes. Il semble qu'une fois l'erreur commise, faire demi-tour ait été difficile

Le profil du PN était difficile, et a pu être aggravé par des travaux d'entretien récents

Le véhicule s'est immobilisé sur le PN pendant plusieurs minutes. L'alerte a été donnée tardivement (le téléphone du PN n'a pas été utilisé)

Le conducteur n'a pas réussi à relever la remorque pour augmenter la garde au sol

#### Notre interprétation

Les modèles de simulation de PN en cours de développement (O. Cazier/ M. Ghazel) sont basés sur plusieurs mécanismes d'accident, mais le mécanisme le plus fréquent sur ce type de PN est le suivant :

- Pénétration d'un véhicule dans la zone du passage à niveau.
- Immobilisation, suite à un premier incident, du véhicule dans la zone dangereuse
- Manœuvre d'esquive.
- Dans une grande majorité des cas (90%), la manœuvre d'esquive permet d'éviter l'accident.

— Dans quelques cas, la manœuvre d'esquive est inadéquate, ou trop tardive, et l'accident a lieu.

Le délai de réaction du conducteur et la durée de la manœuvre d'esquive sont très variables, avec un mode entre 7 et 10 s, mais avec des durées qui peuvent être très courtes (notamment pour les modes doux) mais pouvant parfois être très longues (1 mn, voire même beaucoup plus comme à Nangis) notamment sur des véhicules motorisés ou lourds.

Il faut notamment tenir compte qu'en situation de danger, notamment lorsqu'il est peu familier et non anticipé, les réactions des opérateurs peuvent être inadéquates : il n'est pas surprenant que, dans l'affolement, le conducteur n'ait pas réussi à relever la remorque, ni qu'il n'ait pas pensé à utiliser le téléphone du PN : en situation de Danger, et en urgence, la réaction « normale » est d'agir immédiatement, même si cette action n'est pas optimale et si elle aggrave parfois la situation.

Contrairement au monde ferroviaire, ou les mécaniciens sont relativement peu nombreux, et peuvent donc faire l'objet à la fois de formations régulières, et d'une surveillance du maintien de leur compétences, le monde routier est beaucoup plus divers, et on ne doit pas supposer que, en situation de stress, face à un danger non prévu, un conducteur routier réagira toujours rationnellement. Il faut prendre des dispositions pour éviter qu'il se retrouve dans cette situation, ou, le cas échéant, que la chaine d'alarme soit rapide et ne passe pas par le conducteur routier.

**Notre analyse : les modifications à apporter à Nangis.**

FIGURE 180 – PN Nangis (Gare)

**La présence de la gare** Le PN est déjà de type SAL 4. Ce type de PN permet de façon relativement efficace, de dissuader les passages tardifs de modes doux, voire de VL (cycle allongé, barrières de sortie...)

On peut considérer que le risque présence de gare est correctement traité, surtout si il y avait un dispositif de rétention d'annonce aux PN.

FIGURE 181 – PN Nangis (Carrefour)

**La complexité urbaine (voiries parallèles, carrefours, etc)** La complexité urbaine est importante des deux côtés de la voie ferrée, et mériterait une analyse spécifique pour améliorer les plans de circulation et réduire le risque de cécité d'inattention.

Le risque spécifique lié au dos d'âne et au non-respect de la limite des 3,5 t.

Il a été évoqué plus haut.

**Les pistes de solutions** Concernant le risque PL, on pourrait envisager, dans des situations analogues, de créer dans les accès, à une distance suffisante du PN, des dispositifs de type « Portique G3 + Dos d'âne limite ».

L'idéal serait de les mettre à tous les accès de la zone interdite aux 3,5t, à des emplacements ou le demi-tour est aisé.

Compte tenu du contexte urbain, ces dispositifs peuvent être habillés (Portiques « Bienvenue au centre-ville », comme dans certaines villes du Japon.)

Concernant le risque Urbain, la complexité du site fait que des mesures de circulation ne sont pas forcément possibles ni suffisantes. Un équipement de type détecteur d'obstacles pourrait cependant être particulièrement pertinent dans cette situation, car il réduit le risque de façon « générale ».

Il nécessite cependant une adaptation des règles françaises de reprise des circulations après alarmes.

Enfin, concernant le risque gare, il serait bon de vérifier la présence d'un dispositif de type rétention d'annonces.

### 13.5.17 Accident PN Montauban- Décembre 2014

Croisement de deux poids lourds au niveau du PN.

**Facteurs de risques identifiés :**

- 1 Voiries parallèles, presque un chemin de terre
- Rétrécissement au niveau du PN d'après le BEA-TT, mais sur Google Maps on constate en fait que la largeur « circulable » (platelage) est plus large que celle de la chaussée qui, elle est encadrée par des rambardes (Pont ?).

Cependant, non loin, à une dizaine de mètres du PN), il existe d'autres sur-largeurs (voirie secondaires et ancienne voirie)

FIGURE 182 – PN de Montauban

126 trains par jour, circulation routière modérée dans l'absolu, mais élevée sur ce type de route

La visibilité des feux et de la signalisation est inférieure aux exigences.

Interdiction aux 3,5 t « sauf riverains »

Compte tenu de ces caractéristiques, il peut y avoir un sur risque de cécité d'inattention, mais faible.

Cependant, la « sur-largeur » a niveau du PN fait partie des facteurs de risques identifiés par MORIPAN.

En revanche, le risque d'erreur de circulation est probablement élevé, compte tenu de l'étroitesse de la rue, de la présence de véhicules volumineux malgré l'interdiction aux plus de 3,5 t « sauf riverains ».

Il n'y a pas eu d'accidents récents sur ce PN.

### Mécanisme de l'accident

Deux poids lourds de grand gabarit se sont retrouvé « face à face » de chaque côté du Passage à niveau.

Ils ont « décidé » de se croiser au niveau du PN. L'un est avancé et s'est immobilisé à cheval sur le PN, l'autre a démarré, a croisé le 1er et a dégagé le PN.

Au moment où le 1er aurait dû redémarrer, les barrières se sont fermées, et le chauffeur n'a pas osé redémarrer.

Il a essayé de relever la barrière, de demander aux passagers d'une véhicule de lui tenir la barrière relevée (les barrières d'entrée et les barrières des SAL 2 sont à l'équilibre fermées), puis a renoncé à redémarrer au moment où il a vu le train arriver.

### Analyse

Avec 5 à 6% de PL sur cette route interdite aux plus de 3,5T, « sauf riverains », il est inévitable que, de temps en temps, deux camions se retrouvent face à face au voisinage du PN

La largeur du Chemin du Quart est de 6 m, toutefois, au voisinage du passage à niveau, elle se réduit à 5 m (alors que la largeur du platelage du PN est de 7,1 m)

Il est donc « tentant », pour des camions volumineux arrivant dans la zone du PN, avec une chaussée de 5m, de « décider » de se croiser au niveau du platelage qui est 2,1 m plus large, surtout de nuit ou une manœuvre de recul pourrait être perçue comme délicate, et ou la distance de visibilité est limitée.

Comme dans beaucoup d'accidents il aurait été évitable si le camion avait fait une manœuvre d'esquive adaptée, quitte à casser avec son camion la barrière du PN.

Mais dans l'affolement, son esquive a été inefficace.

À noter que, s'agissant d'un impact d'un TER relativement léger sur un camion lourd, il y a eu déraillement, heureusement, pas coté voie opposée (mais dans certaines conditions, le suraccidentsur-accident est possible)

#### Médiations possibles

L'«idéal» serait d'interdire la circulation aux plus de 3,5t, mais compte tenu de la fréquentation actuelle, d'une usine riveraine, etc., cela paraît difficile... peut être devrait on adapter la chaussée à son trafic réel, notamment en l'élargissant et en la renforçant ? En tout cas, « interdit aux PL sauf cas particuliers » est à éviter au niveau du PN car c'est un risque sécurité, qui ne souffre pas d'exceptions

S'il était possible de desservir l'usine et les autres riverains nécessitant les 3,5 t par un seul côté de la voie, et d'utiliser les emprises tierces pour un demi-tour, on pourrait imaginer un dispositif physique de type portique pour rendre physiquement impossible l'accès au PN.

Sinon, à l'image du PN ci-dessous, deux autres dispositions sont possibles :

- prolonger les bordures de trottoir à l'intérieur du PN, dans les zones hors gabarit bas
- installer un DOPN (sous réserve de règles adaptées de reprise du trafic après alarme)

-

Dans certains pays, des dispositions sont prises pour « empêcher » le croisement au niveau du PN, en supprimant la sur-largeur.

Les capteurs visibles entre les voies sont des détecteurs d'obstacles d'un modèle déjà ancien (rayons IR entrecroisés)

À noter aussi le contre rail prolongé au-delà du PN : en cas de choc, il est plus difficile que le véhicule ferroviaire déraille et vienne engager le gabarit de la voie opposée.

À noter (exemple d'Allinges, mais cela ne figure pas dans l'analyse du BEA-TT, mais dans celle des experts judiciaires, plutôt moins expérimentés sur le sujet PN que le BEA-TT) que les bordures de trottoir peuvent, dans certain cas, être accidentogènes.... Mais peut-être pas plus que les roues dans le ballast.

### 13.5.18 Accident PN Saint-Rémy de Sillé – octobre 2013

Accident entre un TGV et un porte-char au niveau du PN128.

Pas de risque particulier lié à l'environnement routier, sauf dos d'âne

Route interdite aux PL de plus de 6 t, « sauf cars et livraisons »

FIGURE 183 – PN au Japon sur la Chuo Central avec bordures de trottoir (photo O. Cazier)

### Mécanisme de l'accident

Un PL surbaissé s'est engagé avec prudence sur le PN non activé, et s'est « coincé » sur le dos d'âne

Il n'a pas pu se libérer avec le relevage hydraulique

### Analyse

À quoi bon interdire aux PL un itinéraire s'il est autorisé aux cars et aux livraisons ? Ce genre de dispositions affaiblit le discours, et laisse penser qu'en fait, l'itinéraire est apte aux PL. et d'ailleurs, le chauffeur routier s'était vu recommander l'itinéraire par les locaux.

C'était le même cas sur Montauban.

### Médiations possibles

Détecteur d'obstacles

Interdiction totale du PL aux plus de 6 t doublée d'une interdiction physique (portique G3, Dos d'âne hors ZD)

### 13.5.19 Accident PN Marseille l'Estaque – Avril 2013

Accident avec un camion arrêté au PN, dont la grue débordait sur le PN.

FIGURE 184 – PN de Marseille l'Estaque- photo

#### Risques identifiés

Voiries parallèles

Immobilisation d'une grue mobile sur le PN, le fait que la rue au-delà du PN N'était pas apte au passage de véhicules de ce gabarit n'étant pas signalé.

Il semble que l'interdiction soit signalée aujourd'hui, au niveau du croisement avec la rue Albert Cohen.

Cependant, la dérogation « véhicules de secours et VCOM » peut laisser penser que cette interdiction n'est pas liée à un problème de sécurité au niveau du PN.

Au niveau même du PN, le panneau de limitation de tonnage a disparu, et on pourrait interpréter l'interdiction d'arrêt comme « sauf Véhicules des secours et VCOM »

D'une manière plus générale, il est interdit d'arrêter sur les voies. Le panneau risque là aussi d'affaiblir cette interdiction sur les PN qui n'auraient pas ce signal.

#### Médiations possibles

Détecteur d'obstacles (sous réserve modification des consignes de redémarrage des trains après alarme)

### 13.5.20 Accident PN Amilly- octobre 2012

Problème non routier (deshuntage)

FIGURE 185 – PN Marseille l'Estaque (panneaux)

### 13.5.21 Accidents PN Saint-Médard- novembre 2007 et octobre 2011

Compte tenu de son histoire, ce PN présente une accidentologie anormale.

60 t/j : suffisamment pour éviter un problème d'habitude.

Cependant, environnement routier complexe (voiries proches, voiries parallèles, signaux de dos d'âne, gare, côte) ayant pu favoriser une cécité d'inattention

Dos d'âne. (favorisant accident de PL, mais pas l'accident de VL)

#### Analyse de l'accident de 2011

- Il s'agit d'un accident typique de cécité d'inattention : le chauffeur du poids lourd n'a pas « remarqué » le PN en cours d'activation, peut-être parce que concentré sur le risque dos d'âne, et que les véhicules sur l'autre voie lui laissaient peu de largeur de passage au PN.
- Ce PN est considéré comme difficile à franchir pour les PL très étroit, d'où une forte concentration du conducteur sur les dangers de conduite, au détriment du risque PL.
- Il s'est engagé sur le PN activé, s'est rendu compte du problème, et s'est immobilisé.
- Il aurait entamé une manœuvre d'esquive (marche arrière), mais c'est arrêté car la barrière d'entrée bloquait le passage
- Il n'a pas eu le temps de faire une manœuvre d'esquive en redémarrant vers l'avant.

#### Analyse de l'accident de 2007

En 2007, un alternat routier chevauchant le PN avait été mis en place pour protéger un chantier de réfection des bordures de trottoir.

Le conducteur était très familier du PN, qu'il passait plusieurs fois par jour.

Il s'est arrêté à l'alternat routier, a redémarré lorsqu'il est passé au Jaune, sur la voie en sens inverse du sens de circulation normale. Il a été gêné au PN par un tracteur qui venait sur la même voie, mais en sens inverse.

Le plus vraisemblable est que les travaux étant en cours d'achèvement pour la journée, le chantier ait rétabli la double circulation, mais que le chauffeur routier ayant franchi l'alternant dans la journée, ait cru être encore en alternant. (le tracteur dit être passé au jaune cli), et « aidé » dans sa décision par les difficultés connues de passage des PL, qui incitent les PL à « déborder » sur la voie en sens inverse.

**Médiations possibles**

Tout d'abord, il devrait être interdit de travailler sous alternat routier chevauchant ou proche d'un PN, à cause du risque de confusion *(une autorisation de passer en alternant ne signifie pas qu'on peut franchir le PN en chicane !)*

Compte tenu de l'exiguïté du site, une amélioration routière semble illusoire, le DOPN et un travail d'ergonomie routière du PN semblent les solutions les plus rapides à mettre en œuvre.

À noter que le passage est en cours de suppression par un passage à gabarit réduit...il est plus facile d'exclure les PL d'un ouvrage que d'un PN... mas cette interdiction aurait pu avoir lieu dès 2007.

### 13.5.22 Accident PN Mesvres – mai 2011

Même si cela ne semble pas avoir joué dans l'accident, le PN de Mesvres présente quelques-unes des caractéristiques des PN accidentogènes (voiries parallèles proches, Dos d'âne)

Il est aussi situé en milieu « urbain » et à proximité d'une gare, ce qui part contre peut avoir joué.

Dans le cas précis de Mesvres, le véhicule de TE s'est immobilisé alors qu'il n'avait pas entièrement franchi le PN ? peut-être à cause d'un véhicule d'accompagnement.

Ce type d'accident est difficile à empêcher. La remédiation la plus simple et la plus sure serait probablement un détecteur d'obstacles. Si en plus la durée d'annonce était allongée, cela laisserait un peu plus de temps à l'obstacle pour s'échapper.

### 13.5.23 Accident PN Balbigny – janvier 2011

Il s'agit là aussi d'un accident de transport exceptionnel, sur un PN avec dos d'âne mais ne présentant pas de dangerosité particulière.

Ce type d'accident est difficile à empêcher. La remédiation la plus simple et la plus sure serait probablement un détecteur d'obstacles. Si en plus la durée d'annonce était allongée, cela laisserait un peu plus de temps a l'obstacle pour s'échapper.

### 13.5.24 Accident PN Laluque- septembre 2009

Chantier SNCF

Camion manœuvrant sur les voies....

No comment

### 13.5.25 Accident PN Nevers (février 2009)

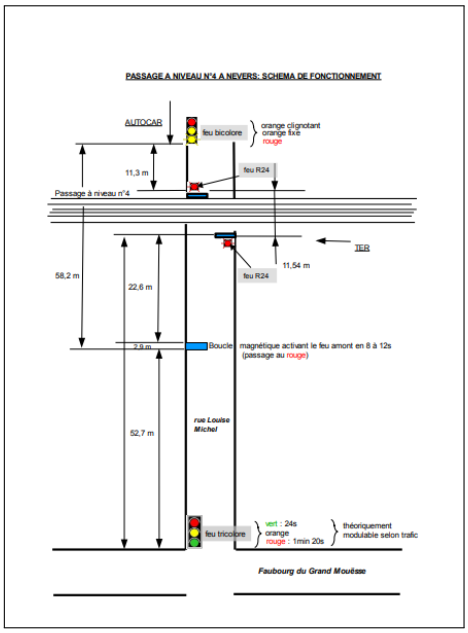



FIGURE 186 – Schéma PN Nevers

Elément de risque identifiés : Route en alignement ainsi que voiries parallèles

Particularités :

Présence d'un système de synchronisation des feux routiers basée sur détection par boucle magnétique

Conception du système de synchronisation des feux n'empêchant pas une remontée empiétant sur le PN, dans certaines configurations

On peut s'interroger sur l'efficacité de la détection de remontée de file : si comme cela semble être le cas, elle peut, dans certains cas ne pas donner l'alarme, quel est le risque qu'elle « désarme » l'attention du conducteur routier ?

### 13.5.26 Accident PN La Roche en Brenil- Juillet 2008

Passage à niveau à croix de Saint-André et Stop

Dans cet accident, le conducteur du camion routier a franchi à 25 km/h, le PN, sans ralentir et encore moins en marquant l'arrêt : cas typique de distraction.

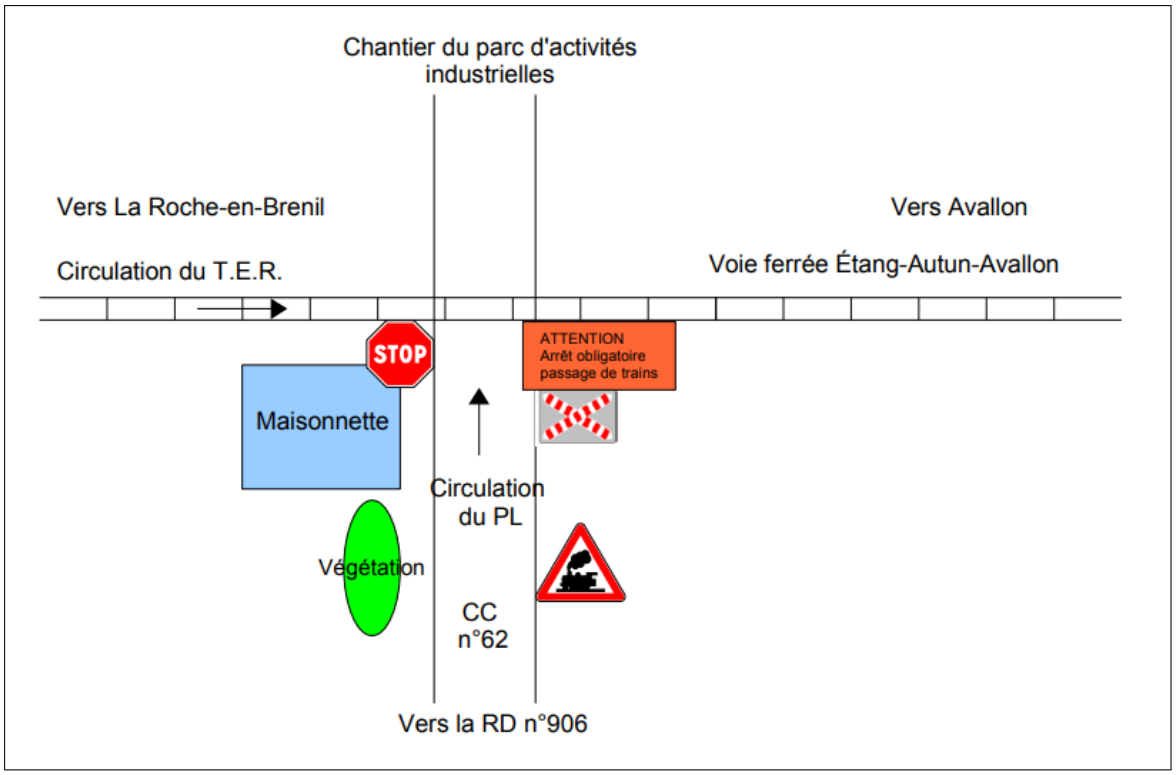
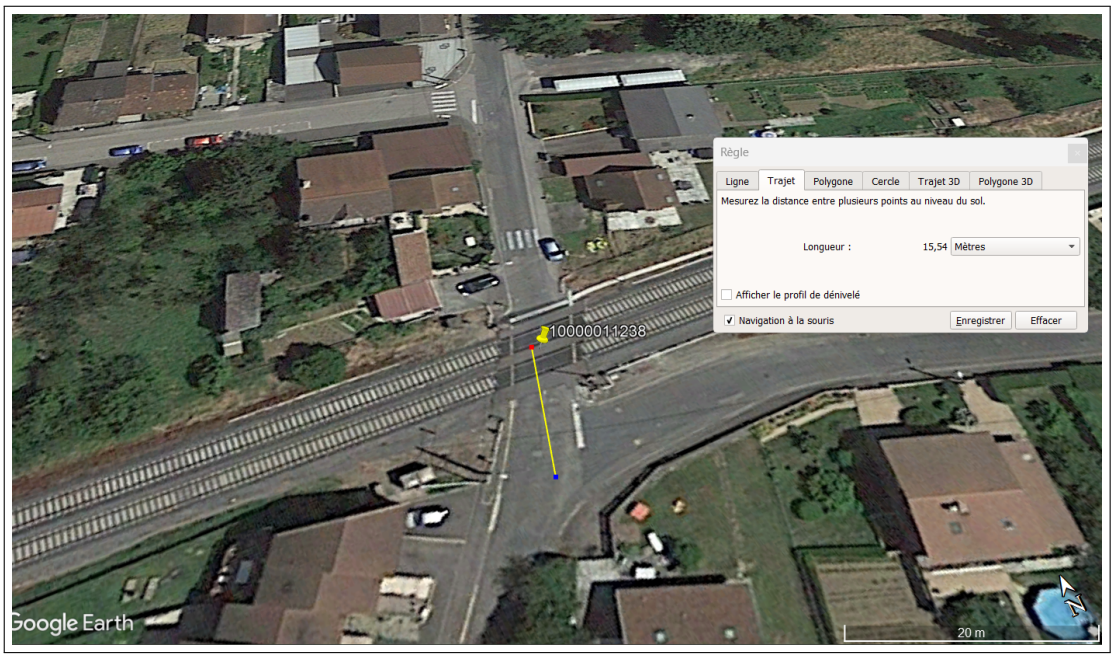
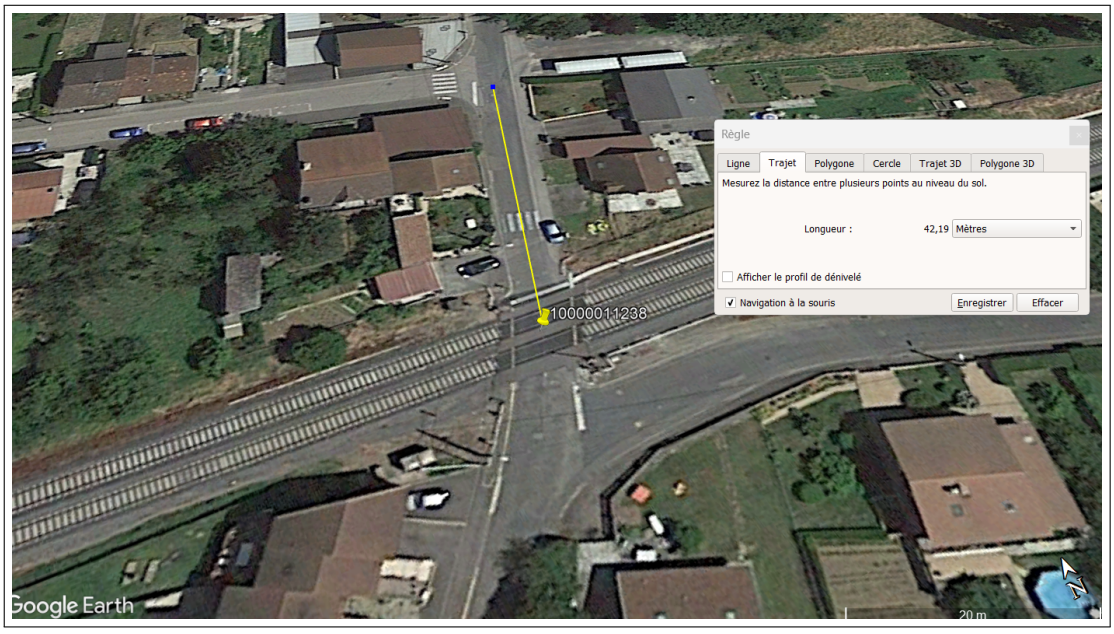


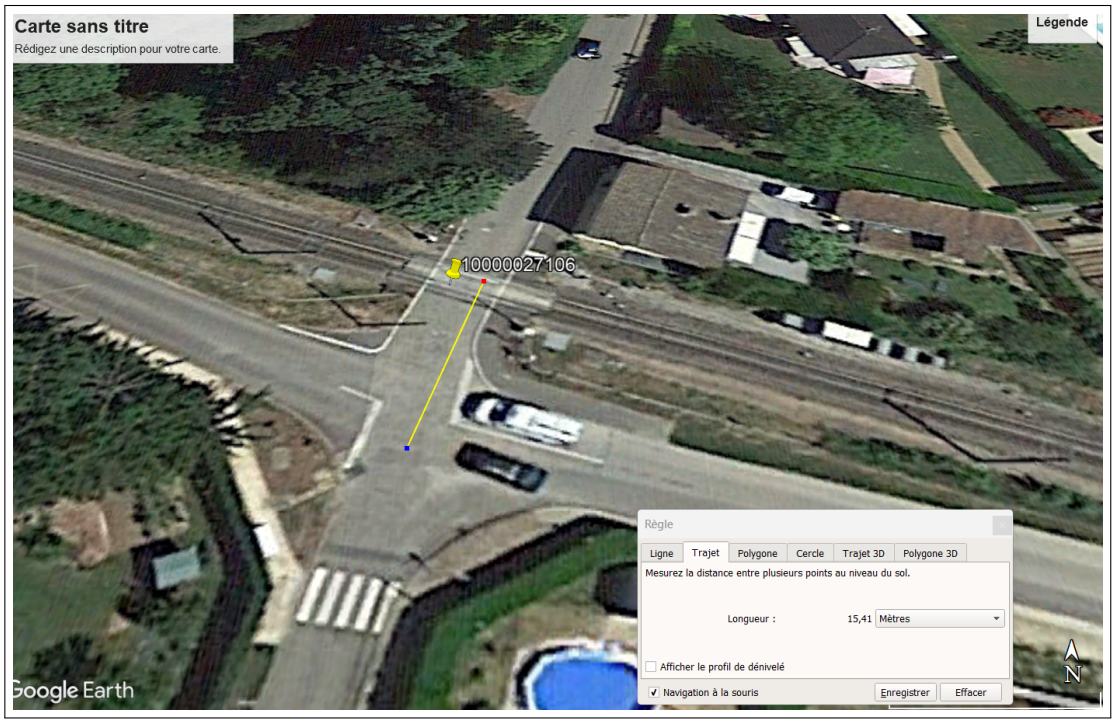

FIGURE 187 – PN La Rocher en Brenil (schéma)

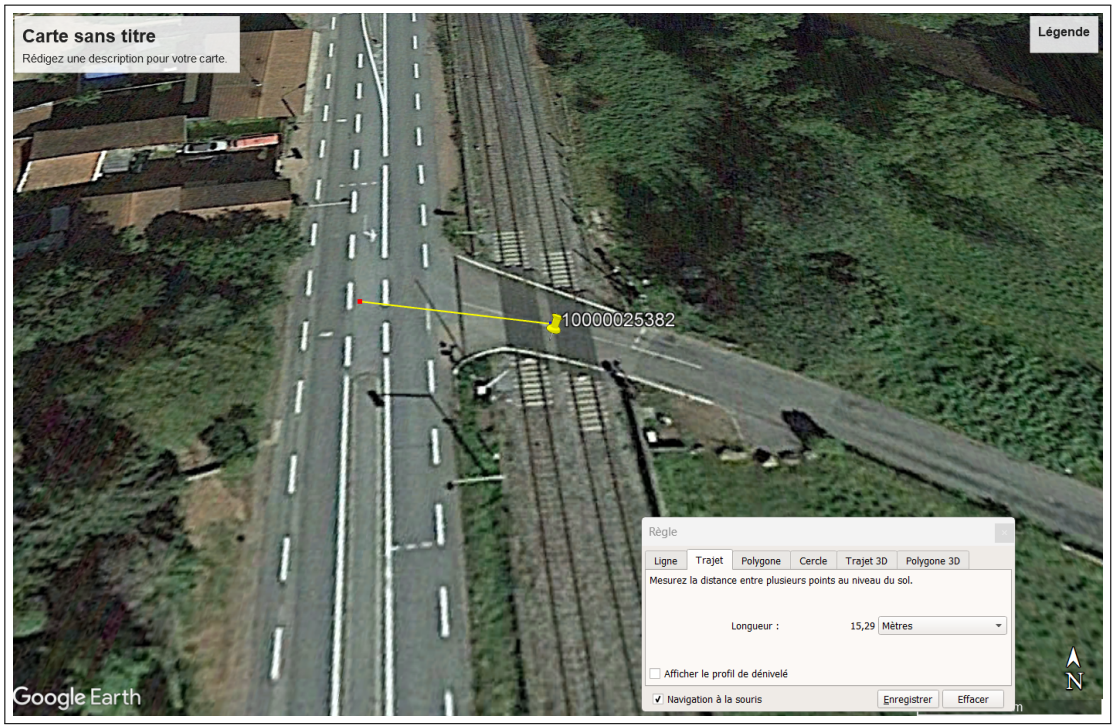
## 13.6 Les PN comme carrefours

### 13.6.1 Quelques exemples des 100 PN pris en compte pour l'évaluation de l'environnement routier


Règle
Ligne
Trajet
Polygone
Cercle
Trajet 3D
Polygone 3D
Mesurez la distance entre plusieurs points au niveau du sol.
Longueur :
15,54
Mètres
Afficher le profil de dénivelé
Navigation à la souris
Enregistrer
Effacer
10000011238
Google Earth
20 m


Règle
Ligne
Trajet
Polygone
Cercle
Trajet 3D
Polygone 3D
Mesurez la distance entre plusieurs points au niveau du sol.
Longueur :
42,19
Mètres
Afficher le profil de dénivelé
Navigation à la souris
Enregistrer
Effacer
10000011238
Google Earth
20 m


Carte sans titre
Rédigez une description pour votre carte.
Légende
10000027106
Règle
Ligne
Trajet
Polygone
Cercle
Trajet 3D
Polygone 3D
Mesurez la distance entre plusieurs points au niveau du sol.
Longueur :
15,41
Mètres
Afficher le profil de dénivelé
Navigation à la souris
Enregistrer
Effacer
Google Earth
N


Carte sans titre
Rédigez une description pour votre carte.
Légende
10000025382
Règle
Ligne
Trajet
Polygone
Cercle
Trajet 3D
Polygone 3D
Mesurez la distance entre plusieurs points au niveau du sol.
Longueur :
15,29
Mètres
Afficher le profil de dénivelé
Navigation à la souris
Enregistrer
Effacer
Google Earth
N

# Chapitre 14

# Bibliographie


DONNE, John (2025) : **Devotions upon emergent occasions**. URL : https://www.gutenberg.org/files/23772/23772-h/23772-h.htm (visité le 04/03/2025) (Cité en page 4).

GHAZEL, Mohamed (1er jan. 2010) : **Using stochastic petri nets for level-crossing collision risk assessment**. In : *Intell. Transp. Syst. IEEE Trans. on*, p. 668-677. DOI : 10.1109/TITS.2009.2026310 (Cité aux pages 4, 26, 63).

RENSINK, Ronald (31 déc. 2009) : **Attention : change blindness and inattentional blindness**. In : *Encyclopedia of Consciousness*. Journal Abbreviation: Encyclopedia of Consciousness, p. 47-59. DOI : 10.1016/B978-012373873-8.00006-2 (Cité aux pages 21, 71).

STOTT, P. F. (1987) : **Automatic open level crossings: a review of safety**. ISBN : 978-0-11-550831-8 (Cité aux pages 21, 26, 231).

EVANS, Andrew et J. ADDISON (1er fév. 2009) : **Interactions between rail and road safety in great britain**. In : *Accid.; Anal. Prev.*, **41** : p. 48-56. DOI : 10.1016/j.aap.2008.09.001 (Cité aux pages 26, 266).

MCCULLOUGH, Ian (2008) : **International Barriers to Level Crossing**. IRSE knowledge base: URL : https://www.webinfo.uk/webdocssl/irse-kbase/ref-viewer.aspx?refno=1559377145 (visité le 04/04/2025) (Cité en page 33).

LIANG, Ci (10 avr. 2018) : **Contributions to risk modeling and analysis at railway level crossings**. tex.namea: Ghazel, Mohamed and El-Koursi, El-Miloudi and Cazier, Olivier tex.nameatype: collaborator. Doctoral dissertation. Université de Lille (2018-2021) (Cité aux pages 41-42, 48-49, 52, 63, 108, 149, 151, 219, 225, 229, 234).

LIANG, Ci, Mohamed GHAZEL, Olivier CAZIER et El-Miloudi EL-KOURSI (déc. 2018a) : **Analyzing risky behavior of motorists during the closure cycle of railway level crossings**. In : *Safety Science*, **110** : p. 115-126. ISSN : 09257535. DOI : 10.1016/j.ssci.2017.12.008 (Cité aux pages 55, 61, 78).

BONNESON, J., M. BREWER et K. ZIMMERMAN (1er sept. 2001) : **Review and evaluation of factors that affect the frequency of red-light-running**. In : (Cité en page 55).

BEANLAND, Vanessa, Ashleigh J. FILTNESS et Rhiannon JEANS (mars 2017) : **Change detection in urban and rural driving scenes: effects of target type and safety relevance**

**on change blindness**. In : *Accid.; Anal. Prev.*, **100** : p. 111-122. ISSN : 1879-2057. DOI : 10.1016/j.aap.2017.01.011 (Cité aux pages 55, 72).

Larue, Grégoire S., Ashleigh J. Filtness, Joanne M. Wood, Sébastien Demmel, Christopher N. Watling, Anjum Naweed et Andry Rakotonirainy (1er mars 2018) : **Is it safe to cross? Identification of trains and their approach speed at level crossings**. In : *Safety Science*, **103** : p. 33-42. ISSN : 0925-7535. DOI : 10.1016/j.ssci.2017.11.009 (Cité aux pages 56, 108, 216-217).

Leibowitz, H. W. (1985) : **Grade crossing accidents and human factors engineering: how a discipline combining technology and behavioral science can help reduce traffic fatalities**. In : *American Scientist*, **73** :6. Publisher: Sigma Xi, The Scientific Research Society, p. 558-562. ISSN : 0003-0996. JSTOR : 27853486 (Cité en page 57).

Clark, Helen E., John A. Perrone, Robert B. Isler et Samuel G. Charlton (1er fév. 2017) : **Fixating on the size-speed illusion of approaching railway trains: what we can learn from our eye movements**. In : *Accident Analysis and Prevention*, **99** : p. 110-113. ISSN : 0001-4575. DOI : 10.1016/j.aap.2016.11.013 (Cité en page 57).

Bea-Tt (17 mai 2019) : **Rapport d'enquête sur la collision entre un train et un autocar le 14/12/2017 à millas**. Bea-tt. Last Modified: 2023-10-20. URL : https://www.bea-tt.developpement-durable.gouv.fr/rapport-d-enquete-sur-la-collision-entre-un-train-a921.html?lang=fr (visité le 28/03/2025) (Cité en page 57).

Radalj, Tony (2025) : **Red light infringements at railway level crossings** (Cité aux pages 57-58, 78, 88, 108, 151, 216).

Vijendran, Marie, Geoff Stevens et Markus Beard (1999) : **Red Light Violations at Level Crossings**. In : *8th International Level Crossing Symposium*. Sheffield (Cité aux pages 57, 59, 88).

Liang, Ci, Mohamed Ghazel, Olivier Cazier et El-Miloudi El-Koursi (jan. 2018b) : **Developing accident prediction model for railway level crossings**. In : *Safety Science*, **101** : p. 48-59. ISSN : 09257535. DOI : 10.1016/j.ssci.2017.08.013 (Cité aux pages 58, 68).

Bonneson, James A. et Karl H. Zimmerman (1er jan. 2004) : **Effect of yellow-interval timing on the frequency of red-light violations at urban intersections**. In : *Transportation Research Record*, **1865** :1. Publisher: SAGE Publications Inc, p. 20-27. ISSN : 0361-1981. DOI : 10.3141/1865-04 (Cité en page 59).

Liang, Ci, Mohamed Ghazel, Olivier Cazier et El-Miloudi El-Koursi (1er nov. 2017) : **A new insight on the risky behavior of motorists at railway level crossings: an observational field study**. In : *Accident Analysis and Prevention*, **108** : p. 181-188. ISSN : 0001-4575. DOI : 10.1016/j.aap.2017.08.030 (Cité en page 60).

Stefanova, Teodora, Jean-Marie Burkhardt, Christian Wullems, James Freeman, Andry Rakotonirainy et Patricia Delhomme (1er juin 2015) : **Direct observations of pedestrian unsafe crossing at urban australian level crossings**. In : *Urban Rail Transit*, **1** :2, p. 112-130. ISSN : 2199-6679. DOI : 10.1007/s40864-015-0022-9 (Cité en page 61).

Stefanova, Teodora, Oscar Oviedo-Trespalacios, James Freeman, Christian Wullems, Andry Rakotonirainy, Jean-Marie Burkhardt et Patricia Delhomme (1er déc. 2018) : **Contextual factors explaining risk-taking intentions at australian level crossings**.

In : *Safety Science*, Railway safety **110** : p. 145-161. ISSN : 0925-7535. DOI : 10.1016/j.ssci.2018.03.004 (Cité en page 61).

***Des délits et des peines*** (4 mars 2025). In : *Wikipédia*. Page Version ID: 223561925 (Cité aux pages 61, 72).

ANANDARAO, Sudhir et Carl D. MARTLAND (1er août 1998) : **Level crossing safety on east Japan railway company: application of probabilistic risk assessment techniques**. In : *Transportation*, **25** :3, p. 265-286. ISSN : 1572-9435. DOI : 10.1023/A:1005044212685 (Cité en page 66).

OLE, Mornell (2005) : **Sécurité des passages à niveau**. *Trafikverket* (Cité aux pages 66, 183).

ANANDARAO, Sudhir (1996) : **Application of the risk assessment methodology to level cross accidents on JR east**. ISSN: 3525-0720. Thesis. Massachusetts Institute of Technology (Cité en page 67).

MACK, Arien et Irvin ROCK (25 mars 1998) : **Inattentional blindness**. ISBN : 978-0-262-27879-9. DOI : 10.7551/mitpress/3707.001.0001 (Cité en page 69).

WOOD, Katherine et Daniel J. SIMONS (nov. 2019) : **Now or never: noticing occurs early in sustained inattentional blindness**. In : *Royal Society Open Science*, **6** :11, p. 191333. ISSN : 2054-5703. DOI : 10.1098/rsos.191333 (Cité en page 71).

KREITZ, Carina, Philip FURLEY et Daniel MEMMERT (1er juin 2015) : **Inattentional blindness is influenced by exposure time not motion speed**. In : *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **69** : DOI : 10.1080/17470218.2015.1055771 (Cité en page 71).

KOIVISTO, Mika, Jukka HYÖNÄ et Antti REVONSUO (1er déc. 2004) : **The effects of eye movements, spatial attention, and stimulus features on inattentional blindness**. In : *Vision Research*, **44** :27, p. 3211-3221. ISSN : 0042-6989. DOI : 10.1016/j.visres.2004.07.026 (Cité aux pages 72-73).

TÖRÖK, Adam (1er mars 2011) : **Investigation of road enviroment effects on choice of urban and interurban driving speed**. In : *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, **1** : p. 1-9 (Cité aux pages 81-82).

SCHUHL, André (1956) : **Hasard et probabilité dans les problèmes de circulation routière**. In : *Journal De La Société De Statistique De Paris*, **97** : p. 233-253. ISSN : 2419-0675 (Cité en page 82).

TRIGGS, T. et W. G. HARRIS (1er juin 1982) : **Reaction time of drivers to road stimuli**. In : (Cité aux pages 83-84).

KOPPA, Rodger J. (2000) : **Human Factors**. In : *Traffic Flow theory*. Gartner, N.H., Messer, C.J. and Rathi, A.K. Transportation Research Board Monograph (Cité aux pages 83-85, 105).

KOPPA, Rodger J., Daniel B. FAMBRO et Richard A. ZIMMER (1er jan. 1996) : **Measuring driver performance in braking maneuvers**. In : *Transportation Research Record*, **1550** :1. Publisher: SAGE Publications Inc, p. 8-15. ISSN : 0361-1981. DOI : 10.1177/0361198196155000102 (Cité en page 84).

CESTAC, Julien, Laurent CARNIS, Jean Pascal ASSAILLY, Chloé EYSSARTIER et Cédric GARCIA (s. d.) : **Enquête sur le rapport à la règle chez les automobilistes français**. In : () (Cité aux pages 85, 92).

KADIKYANOV, Georgi, Daniel LYUBENOV, I. EVTIMOV et Yavor IVANOV (1er jan. 2014) : **A study of pressures in pneumatic tyre influence on vehicles braking deceleration**. In : *INTERNATIONAL VURTUAL JOURNAL Machines, Technologies, Materials,*, (Cité en page 86).

WILDE, Gerald J. S. (1982) : **The theory of risk homeostasis: implications for safety and health**. In : *Risk Analysis*, **2** :4, p. 209-225. ISSN : 1539-6924. DOI : 10.1111/j.1539-6924.1982.tb01384.x (Cité en page 94).

DINGUS, Thomas, Feng GUO, Suzie LEE, Jonathan ANTIN, Miguel PEREZ, Mindy BUCHANAN-KING et Jon HANKEY (22 fév. 2016) : **Driver crash risk factors and prevalence evaluation using naturalistic driving data**. In : *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **113** : p. 201513271. DOI : 10.1073/pnas.1513271113 (Cité en page 120).

VAN DER HORST, Richard (1988) : **Driver Decision Making at Traffic Signals**. In : *Transportation Research Record*, **1772** : p. 93-97 (Cité en page 150).

ERKE, Heiner et Paul WIMBER (1980) : **Wirksamkeit von lichtsignalanlagen zur sicherung von bahnübergängen**. In : (Cité aux pages 166, 238).

LENNÉ, Michael G., Christina M. RUDIN-BROWN, Jordan NAVARRO, Jessica EDQUIST, Margaret TROTTER et Nebojsa TOMASEVIC (1er mai 2011) : **Driver behaviour at rail level crossings: responses to flashing lights, traffic signals and stop signs in simulated rural driving**. In : *Applied Ergonomics*, Applied Ergonomics and Transportation Safety **42** :4, p. 548-554. ISSN : 0003-6870. DOI : 10.1016/j.apergo.2010.08.011 (Cité en page 167).

SWAIN, A. D. et H. E. GUTTMANN (1er août 1983) : **Handbook of human-reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications. Final report**. NUREG/CR-1278; SAND-80-0200. *Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States)*. DOI : 10.2172/5752058 (Cité en page 220).

HANNAMAN, G.W., A.J. SPURGIN et Y.D. LUKIC (1984) : **Human Cognitive Reliability Model for PRA Analysis**. Draft rport NUS-4531. Palo Alto, CA : *Electric Power Research Institute* (Cité en page 221).

WUNDERSITZ, L. (1er mars 2009) : **An assessment of conspicuous traffic signals: mast arms**. In : (Cité en page 221).

GREEN, David (2009) : **Evaluation of Active Advance Warning Signs (AAWS) using existing installations**. Contract VC74957. *ARRB research* (Cité en page 222).

HANTSCHEL, Sebastian, Christoph HOEFERT, Bernhard KOLLMUS, Maria POHLE, Eric SCHÖNE, Emmanuel BAKABA et Jörg ORTLEPP (2016) : **Sicherheit an Bahnübergängen**. rapport recherche 44. *Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V* (Cité en page 222).

SCHÖNE, E. (12 nov. 2012) : **Ein risikobasiertes verfahren zur sicherheitsbeurteilung von bahnübergängen**. In : (Cité en page 223).

EPSF (2021) : **Méthode d'analyse des risques relatifs aux passages à niveau - établissement public de sécurité ferroviaire**. URL : https://www.securite-ferroviaire.fr/

reglementation/methode-danalyse-des-risques-relatifs-aux-passages-niveau (visité le 01/04/2025) (Cité en page 229).

ZODTL, Evelyn (2004) : **Verkehrsunfälle auf eisenbahnkreuzungen in österreich : 1993-2002 - dringlichkeitsreihung zur sanierung der unfallstellen**. Thesis. Technische Universität Wien (Cité en page 236).

SHAHRIARI, Mohammad (1993) : **Safety at rail-road level crossings**. ISBN : 978-91-7032-842-8 (Cité en page 236).

OH, Jutaek, Simon P. WASHINGTON et Doohee NAM (1er mars 2006) : **Accident prediction model for railway-highway interfaces**. In : *Accident Analysis and Prevention*, **38** :2, p. 346-356. ISSN : 0001-4575. DOI : 10.1016/j.aap.2005.10.004 (Cité en page 236).

PORUBANOVÁ, M., Radovan ŠIKL, M. PORUBANOVÁ et Radovan ŠIKL (2010) : **The role of various categories of changes in the inducement of change blindness**. In : *Perception 39 Ecvp Abstract Supplement*, (Cité en page 248).

MARTENS, Marieke (1er jan. 2007) : **The failure to act upon important information: where do things go wrong?** In : (Cité en page 248).