L6.2 Description détaillée des scénarios d'interaction VA / Piéton et cyclistes et des risques associés

Work Package	*6*
Responsable du WP, affiliation	
Livrable n°	*L6.2*
Version	*VF*
Auteur responsable du livrable	*TATTEGRAIN Hélène, UGE*
Auteurs, affiliations	*LEDOUX Vincent, Cerema* *BATTAGLIA Valérie, Cerema*
Relecteurs, affiliations	*MIGNOT Dominique, Université Gustave Eiffel*
Statut du livrable	*Final*

Veuillez citer ce document de cette façon :

Tattegrain, H., Ledoux, V., & Battaglia, V. (2022). *Livrable L6.2 : Description détaillée des scénarios d'interaction VA / piétons et cyclistes et des risques associés*. Projet SURCA, 100 p.

Historique des versions

Version	Date	Auteurs	Type des changements
V0	19/01/2022	H.Tattegrain	Draft avec plan
V2	1/03/2022	V. Battaglia	Partie piéton bord de voie et NA
V3	5/07/2022	V. Ledoux	Partie cycliste
V4	01/09/2023	H.Tattegrain	Partie Piéton naturalistique
V5	01/12/2023	H.Tattegrain	Harmonisation, mise en page, conclusion
		Tous	Relecture des auteurs

Remerciements

Le Projet SURCA est financé par la dévolution de la Fondation Sécurité Routière, la Délégation à la sécurité routière et pour moitié par les partenaires du projet.

Résumé du projet Surca

Les questions posées par la cohabitation de véhicules de plus en plus automatisés avec des véhicules conventionnels et des usagers vulnérables, cyclistes, piétons, deux-roues motorisés, sont au cœur des préoccupations des décideurs publics, constructeurs, ou spécialistes de l'infrastructure routière et de la sécurité routière. Tous ont l'espoir que ces nouvelles technologies contribuent à améliorer la sécurité routière. L'objectif global du projet « Sécurité des Usagers de la Route et Conduite Automatisées, SURCA » est de contribuer à une meilleure intégration de la Conduite Automatisée dans la circulation actuelle.

Les partenaires du projet (Ifsttar, DSR, Ceesar, Cerema, Vedecom, Lab), ont ainsi comme objectif d'identifier quelles interactions existent et quelles stratégies pertinentes sont mises en place par les conducteurs pour proposer des recommandations aux concepteurs de véhicules autonomes sur les besoins en termes d'interactions et en termes de comportement du véhicule autonome. Pour cela, il est prévu d'analyser des bases de données existantes sur la conduite des véhicules conventionnels et d'identifier les facteurs qui peuvent expliquer des comportements différents.

Les connaissances issues de ces bases seront utilisables pour simuler l'introduction de la conduite automatisée de niveaux 3, 4 et 5, avec des taux de pénétration faibles. La gestion des interactions avec les autres usagers doit être réalisée dès que le véhicule peut évoluer en autonomie sans supervision du conducteur, quelles que soient la durée et les sections sur lesquelles cette automatisation sera possible. En cas de taux de pénétration très important, d'autres types d'interactions risquent de se mettre en place et devront alors être étudiés.

Ce projet est articulé autour de deux sous-thématiques :

- L'identification des scénarios d'interaction entre véhicules autonomes et autres usagers de la route (véhicules conventionnels, deux roues motorisés, cyclistes, piétons), avec un focus particulier sur les personnes âgées :
    - Etude des situations de négociation où les conducteurs gèrent cette interaction humaine, à partir de bases de données de conduite conventionnelle, et en utilisant des éléments difficilement émis et perçus par les systèmes automatisés (regard, connaissance a priori d'intention, etc.),
    - Etude de la réaction des autres usagers face à un véhicule autonome alors que son conducteur est absorbé dans une tâche annexe,
    - Identification des besoins de communication du véhicule autonome en phase active avec les autres usagers,
    - Analyse des besoins des usagers âgés et acceptabilité sociétale du véhicule autonome.
- L'étude des impacts de la posture des occupants (conducteur et passagers) d'un véhicule en mode autonome sur le risque lésionnel :
    - Choix des scénarios de simulation : positions des occupants, conditions de choc (lors de la réalisation de tâches annexes) et systèmes de retenue,
    - Evaluation des lésions potentielles par simulations numériques en fonction des systèmes de retenue (par ex. déploiement d'air bag),
    - Recommandations en termes de postures acceptables selon les différents systèmes de retenue.

Résumé du Livrable L6.2

L'objectif global du projet SURCA est de contribuer à une meilleure intégration des véhicules autonomes dans la circulation actuelle. Il s'agit ainsi d'identifier quelles interactions existent entre les différents usagers de la route et quelles stratégies pertinentes sont mises en place par les conducteurs. Ceci a permis de faire des recommandations aux concepteurs de véhicules autonomes sur les besoins en termes d'interactions et en termes de comportement du véhicule autonome.

Les travaux présentés dans ce livrable ont permis de faire des recommandations pour améliorer les interactions avec les piétons et les cyclistes lors de l'introduction des VA dans la circulation. Pour cela, les analystes ont utilisé des données d'observations bord de voie, des interactions entre vélos et/ou piétons et autres véhicules selon différents aménagements routiers (Cerema parties 2 et 3) et des données de conduite en situations naturelles Udrive (Lescot partie 4).

Les données utilisées sont de plusieurs natures :

- Pour les cyclistes, des observations bord de voie mises en œuvre dans le cadre d'une expérimentation d'évaluation de dispositifs de cédez-le-passage cycliste au feu rouge dans la Métropole de Lyon. L'expérimentation consistait notamment à observer les comportements de cyclistes et d'usagers d'EDPM (Engin de Déplacement Personnel Motorisé) avant et après la mise en place de panonceaux M12 (qui permet aux cyclistes de passer au rouge sous certaines conditions) – ou d'extension des directions autorisées. Ces observations ont été réalisées sur 10 carrefours à feux dont 6 sans plateformes tramway. Cette partie du livrable se concentre uniquement sur ces 6 carrefours et offre un focus plus détaillé sur deux d'entre eux.
- Pour les vitesses pratiquées par les automobilistes en présence de piétons, ont été récoltées les données de 43 conducteurs recrutés dans la région de Lyon sur 30 véhicules équipés d'un système d'acquisition de données ou DAS (*Data Acquisition System*) comportant : 7 caméras vidéo, une caméra intelligente Mobileye, une centrale inertielle, antenne GPS-GSM et une interface collectant le trafic sur le réseau CAN principal des véhicules. Ceci a permis la collecte de 12 600 heures de conduite sur 573 000 km correspondant à l'ensemble de leurs trajets quotidiens, professionnels, de loisir…
- Des données d'observations des comportements des piétons sur site (3 sites en zone apaisée à 30 km/h : section courante en l'absence de passages piétons et de places de stationnement (sans masque à la visibilité) et avec places de stationnement, zone apaisée finissant par un STOP). Ces données comportent des Indicateurs prédictifs de la préparation de la traversée et des descriptifs de la traversée.
- De retours d'expérience sur des expérimentations de navettes autonomes.

Des recommandations sont proposées sur différents aspects allant de la détection des piétons ou cyclistes jusqu'au comportement du VA en passant par la prise de décision en présence de piétons ou cyclistes. Des recommandations générales sont également formulées pour les performances du VA et la conception de l'infrastructure.

Pour la détection des cyclistes :

- Le VA doit inclure des zones de détection spécifiques pour les cyclistes et EDPM dans lesquelles ces usagers s'arrêtent souvent. Il doit les surveiller en continu pendant la traversée du carrefour pour s'assurer de leur arrêt.

Pour la prise de décision en présence de cyclistes :

- Le véhicule autonome ne doit pas utiliser la position latérale des cyclistes / EDPM au niveau du feu pour prédire la direction qu'ils vont emprunter.

Pour le comportement du VA en présence de cyclistes :

- En cas de présence avérée d'un cycliste/EDPM le VA doit traverser avec une faible vitesse.

Pour la détection de piétons :

- Il est nécessaire que le véhicule autonome puisse mesurer la vitesse instantanée d'un piéton. L'application de valeurs moyennes se révèle insuffisante.
- Pour éviter les conflits, il convient que le VA puisse, en temps réel, mesurer la position et la vitesse du piéton pour infléchir sa trajectoire.
- La détection des piétons sur la chaussée en cas de circulation au pas ou à l'arrêt doit se faire dans l'ensemble des directions dans un rayon faible (1m) pour anticiper les trajectoires entre véhicules.
- Dans les cas où la traversée des piétons se fait en présence de masques à la visibilité mobile (véhicule en circulation sur les voies adjacentes par exemple) le VA doit être en capacité de suivre la trajectoire d'un piéton mais également de différencier plusieurs piétons afin d'anticiper plusieurs trajectoires individuelles.

Pour la prise de décision en présence de piétons :

- Le véhicule automatisé doit respecter le code de la route et être en mesure de s'arrêter dès que le piéton est présent sur la chaussée en traversée : le fait de continuer à circuler à vitesse constante alors qu'un piéton est au bord du trottoir et manifeste son intention de traverser, ou est en train de traverser est contraire au code de la route.
- Les constructeurs devront expliciter les critères choisis pour leur modèle d'anticipation de la traversée des piétons (critères de détection, limite de détection) et la fiabilité du pronostic. Cette fiabilité sera forcément faible dans certaines situations.
- Si un carrefour à feux est congestionné et s'il y a des piétons aux abords de la traversée, la probabilité de traversées piétonnes est très élevée (presque quasi certaine) quelle que soit la couleur du feu. Le VA devra intégrer cette donnée.
- S'il y a de nombreux piétons aux abords de la traversée et si un ou plusieurs piétons engage(nt) leur traversée, il est probable que la majorité des usagers suivent, profitant de l'arrêt des véhicules et de l'ouverture d'un créneau de passage. C'est l'effet d'entrainement de nombreuses fois documenté dans la littérature. Le VA devra intégrer cette donnée.
- Il est peut-être nécessaire de définir la liste des scénarios gérables par le VA En cas de situations non reconnues par le VA, le conducteur devra être alerté pour repasser en manuel. Il semble en effet difficile de définir l'exhaustivité des configurations de conduite rencontrées par un VA.
- Le VA doit identifier les situations nécessitant le traitement simultané de 2 conflits potentiels entre mouvements de véhicules et mouvements de piétons tels que des mouvements de tourne à gauche sans possibilité de stockage.
- Identifier la position de stockage du VA la plus pertinente pour le véhicule autonome par un marquage au sol détectable dans certains carrefours gérés par feux en mouvements tournants. Ces zones permettront au VA d'attendre dans le carrefour que les autres véhicules coupant sa trajectoire soient passés comme par exemple les véhicules venant en face lorsque le VA tourne à gauche.
- Il faut pouvoir identifier les configurations complexes : nombre de conflits, types d'usagers, temps de réaction très élevé du VA nécessaires et peut-être les limites du VA dans ces cas.

Pour le comportement du VA en présence de piétons :

- Le véhicule autonome doit avoir un comportement qui se rapproche d'un véhicule sans automatisme pour la cinématique d'arrêt même si ses performances lui permettraient de freiner plus tardivement par exemple. Il pourrait également émettre des signaux qui avertiraient le piéton de leur prise en compte par le véhicule automatique.
- Définir des distances d'arrêt du VA en amont du passage piéton pour le confort de l'usager hors arrêt d'urgence.
- Dans les carrefours à feux en mouvements tournants, le véhicule autonome doit adapter sa vitesse non pas en fonction de la vitesse autorisée mais de ses capacités de détection du piéton (approche environnementale en temps réel) en tenant compte des éventuels masques à la visibilité, et du comportement du piéton confiant.
- Le VA doit adapter sa vitesse en tenant compte des vitesses pratiquées actuellement par les automobilistes avec et sans présence de piétons et ainsi définir des seuils de vitesses de consigne du VA en cas de présence de piétons en dehors de la route (par exemple sur les trottoirs). Si un piéton est sur la route, le VA doit le gérer avec ses algorithmes propres pour éviter les collisions.
    - Lors d'un changement de direction et en présence de piétons hors de la route, il est recommandé de réduire la vitesse de consigne du VA à
        - 25 km/h maximum en urbain quelle que soit la VMA (50 ou 70 km/h)
        - 35 km/h maximum en milieu rural quelle que soit la VMA (70 ou 90 km/h).
    - Lors du franchissement de giratoires et en présence de piétons hors de la route, il est recommandé de réduire la vitesse de consigne du VA à
        - 30 km/h maximum en urbain quelle que soit la VMA (50 ou 70 km/h)
        - 35 km/h maximum en milieu rural quelle que soit la VMA (70 ou 90 km/h).
    - Lorsque la VMA est de 50 km/h en urbain et en présence de piétons hors de la route, il est recommandé de réduire la vitesse de consigne à
        - 35 km/h maximum lors de traversée d'une intersection sans changement de direction
        - 40 km/h maximum dans les sections courantes.
    - Lors de la traversée d'une intersection sans changement de direction et dans les sections courantes et en présence de piétons hors de la route, il est recommandé de réduire la vitesse de consigne du VA à
        - 60 km/h maximum lorsque la VMA est de 70 km/h en milieu rural
        - 70 km/h maximum lorsque la VMA est de 90 km/h en milieu rural
        - 55 km/h maximum en urbain lorsque la VMA est de 70 km/h en urbain

Recommandations pour la conception de l'infrastructure

- Si les véhicules automatisés se généralisent avec des comportements de conduite entrainant des diminutions de débit, cet impact devra être pris en compte dans la conception de la voirie dans les zones à forts trafics véhicules ou fort flux piétons.
- Il est important d'identifier les configurations pour lesquelles l'écoulement des flux de circulation est problématique en mouvements tournants.

Recommandations pour les performances générales du VA

- Les performances du VA qui suivent devront être définies car il s'agit de détecter des situations et des mouvements dans un laps de temps compatible avec la conduite en situation réelle :
    - Capacités, fiabilité et vitesse d'analyse de la détection en statique des piétons
    - Capacités, fiabilité et vitesse d'analyse de la détection dynamique : analyse des mouvements, mesure de la vitesse des piétons
- Les performances du VA doivent subir des tests normalisés pour d'obtenir des valeurs seuils compatibles avec toutes les situations de conduite rencontrées et la conception des

infrastructures. Par exemple, pour les traversées piétonnes, la compatibilité avec les triangles de visibilité existants.

- Prévoir une mise en conformité des mises à jour du VA en fonction des modifications du code de la route mais aussi de l'apparition de nouveaux aménagements ou de nouveaux usages

Table des matières

Résumé du projet Surca 3

Résumé du Livrable L6.2 4

Table des matières 7

Table des figures 9

1 Introduction 13

1.1 Présentation du projet SURCA 13

1.2 Objectifs du WP6 13

2 Analyse des comportements de piétons 14

2.1 Étude préalable sur les interactions en traversée sur passage piéton : paramètres à prendre en compte 14

2.2 Analyse de traversées en zone de circulation apaisées 20

2.2.1 Description des sites 20

2.2.2 Comportements en préparation de traversée pour leur anticipation par un véhicule autonome 22

2.2.3 Gestion par le VA des comportements pendant la traversée 26

2.2.4 Analyse des usages informels en zone de circulation apaisée 30

2.3 Traversées des piétons en mouvements tournants et feux verts simultanés 32

2.3.1 Rappel sur le fonctionnement théorique 32

2.3.2 Accidents typiques 33

2.3.3 Analyse des Mouvements tournant à droite en feux verts simultanés 34

2.3.4 Analyse des mouvements tournant à gauche sans zone de stockage. 37

2.4 Mouvement de tourne à droite avec flux piétons important sur la traversée de la voie sécante. 39

2.5 Mouvement de tourne à gauche avec zone de stockage 40

2.6 Traversées de piétons aux feux et circulation congestionnée 41

2.7 Cas complexe d'interactions entre multiples usagers / aménagements innovants ou rares 43

3 Analyse des comportements des cyclistes 45

3.1 Descriptions des données utilisées et de leurs conditions d'acquisition 46

3.1.1 Les carrefours étudiés 46

3.1.2 Les conditions d'observations 46

3.1.3 Codage et exploration des données 46

3.2 Analyse Globale 47

3.2.1 Effectifs 47
3.2.2 Franchissement des feux tricolore au rouge 47
3.3 Analyses spécifiques sur deux carrefours 48
3.3.1 Carrefour Saxe / Rabelais 48
3.3.1.3 Scénarios 302 : Intersection – véhicules allant tout droit et 52
3.3.2 Carrefour Gryphe / Chevreuil 55
3.3.2.4 Scénarios 302, 304 et 305 et 312 61
3.4 Conclusions et recommandations pour les cyclistes 63
4 Analyse des vitesses du VL en présence de piétons 65
4.1 Descriptions des données utilisées et de leurs conditions d'acquisition 65
4.2 Méthodologie d'analyse statistique 65
4.3 Extraction des situations étudiées 67
4.4 Analyse des sections courantes observées en situation naturelle 67
4.4.1 Sélection des situations à tester 67
4.4.2 Création des groupes de situations homogènes 70
4.4.3 Analyse de l'impact de la présence des piétons dans les groupes de situations homogènes 75
4.5 Analyse des intersections observées en situation naturelle 80
4.5.1 Sélection des situations à tester 80
4.5.2 Création des groupes de situations homogènes 84
4.5.3 Analyse de l'impact de la présence des piétons dans les groupes de situations homogènes 89
4.6 Conclusions et recommandations pour les vitesses du VL en présence de piétons 95
5 Conclusion 97
Bibliographie 100

Table des figures

Figure 1 : Triangle de visibilité sur voie à 50 km/h (Reynaud 2016) 15
Figure 2 : Déplacement piéton 16
Figure 3 : Exemple d'aménagement de passage piéton (source Cerema: Strasbourg) 18
Figure 4 : Illustration du site1 zone 30 21
Figure 5: Illustration du site 2 Zone 30 22
Figure 6: Etude de prédiction du choc véhicule-piéton (Wakim 2005) 23
Figure 7: Une petite fille traverse la rue ? 24
Figure 8: Trajectoires de piétons traversant une route, hors et sur passage piéton (source étude de prédiction du choc véhicule-piéton, C Wakim-2005) 26
Figure 9 : Language corporel (source : https://www.developpez.com/actu/217389) 30
Figure 10 : Pondération sur les difficultés d'effectuer les mouvements (CERTU 2010) 33
Figure 11 Stockage véhicule en mouvement tourne à droite devant le passage piétons (CERTU 2010) 33
Figure 12 : Problématique du stockage mouvement tourne à gauche (CERTU 2010) 33
Figure 13 : Illustration de carrefour feux verts simultanément pour le véhicule et pour le piéton sur la branche sécante (source google maps) 34
Figure 14 : Illustration de carrefour complexe (source google maps) 34
Figure 15 : Mouvement tourne à droite direct sans stockage devant le passage piétons- (source Cerema-google view) 35
Figure 16 : Mouvement tourne à droite avec passage piéton décalé et possibilité de stockage devant. (Source Cerema-google view) 35
Figure 17 : Mouvement tourne à droite direct sans stockage devant le passage piétons 36
Figure 18 : Mouvement tourne à droite direct avec stockage devant le passage piétons 36
Figure 19: Masques à la visibilité et mouvements tournants- source Cerema-google view 37
Figure 20 : Problématique du stockage mouvement tourne à gauche (CERTU 2010) 38
Figure 21 : Mouvement de tourne à gauche : sans possibilité de stockage devant le passage piéton sécant-source Cerema google view 38
Figure 22: Carrefour avec mouvements tournants à droite et flux piéton très important 39
Figure 23 : Exemple de position de stockage dans un carrefour 40
Figure 24: Description des flux 41
Figure 25: Traversée de piétons temporairement masqués 42
Figure 26: Entrée dans le giratoire cyclable à ilots intra annulaires 43
Figure 27: Sortie du giratoire cyclable à ilots intra annulaires 44
Figure 28: Pictogrammes pour l'analyse des interactions VA/cyclistes 45
Figure 29 – Répartition des cyclistes selon la couleur du feu à leur arrivée .....
Figure 30 – Taux de franchissement au rouge des cyclistes pour les directions qui n'étaient pas autorisées à l'état 0 (à gauche) et le sont devenues à l'état 1 (à droite) 47
Figure 31 : Vue schématique du carrefour Avenue de Saxe / Rue de Rabelais 48
Figure 32 : Prise de vue de la caméra avec exemple de repères superposés pour estimer la vitesse des cyclistes et des EDPM en amont du feu tricolore. 49
Figure 33 : Nombre et proportion de vélos et d'EDPM en fonction de la couleur du feu lors de leur arrivée sur le carrefour 49
Figure 34 –Diagramme en violon des vitesses pratiquées par les vélos et les EDPM en amont du feu selon sa couleur à leur arrivée. Sont exclus ceux qui se sont arrêtés au feu rouge. 50

Figure 35- Résultats de la régression linéaire multiple pour les vélos et EDPM arrivant au rouge et ne s'arrêtant pas avant le feu (en vert les modalités qui ont un effet un modérateur sur la vitesse – en rouge ceux qui accroissent la vitesse) 51
Figure 36- Résultats de la régression linéaire multiple pour les vélos et EDPM arrivant au vert (en vert les modalités qui ont un effet un modérateur sur la vitesse) 51
Figure 37 : Vélo traversant alors que l'intersection est dégagée sans véhicule sur la sécante 52
Figure 38 : Vélo traversant alors que l'intersection est dégagée avec véhicule sur la sécante 52
Figure 39 : Vélo traversant alors que l'intersection est occupée avec créneau de passage sans véhicule sur la sécante 53
Figure 40 : Vélo traversant alors que l'intersection est occupée avec créneau de passage avec véhicule sur la sécante 53
Figure 41-Positions successives d'un EDPM. 53
Figure 42 : Vélo traversant alors que l'intersection est occupée sans créneau de passage sans véhicule sur la sécante 54
Figure 43 : Vélo traversant alors que l'intersection est occupée sans créneau de passage avec véhicule sur la sécante 54
Figure 44 : Vue schématique du carrefour Sébastien Gryphe / Chevreuil. 55
Figure 45 : Prise de vue de la caméra 56
Figure 46 : Nombre et proportion de vélos et d'EDPM en fonction de la couleur du feu lors de leur arrivée sur le carrefour. 56
Figure 47 : Diagramme en violon des vitesses pratiquées par les vélos et les EDPM en amont du feu selon sa couleur à leur arrivée en excluant ceux qui se sont arrêtés au feu rouge (l'EDPM arrivant au feu orange n'est pas représenté). 57
Figure 48 : Diagramme en violon des vitesses pratiquées par les vélos et les EDPM en amont du feu selon sa couleur à leur arrivée en excluant ceux qui se sont arrêtés au feu rouge (l'EDPM arrivant au feu orange n'est pas représenté). 58
Figure 49 : Résultats de la régression linéaire multiple pour les vélos et EDPM arrivant au rouge et ne s'arrêtant pas avant le feu (en vert les modalités qui ont un effet un modérateur sur la vitesse – en rouge ceux qui accroissent la vitesse) 59
Figure 50 : Résultats de la régression linéaire multiple pour les vélos et EDPM arrivant au vert (en vert les modalités qui ont un effet un modérateur sur la vitesse). 59
Figure 51 : Répartition du positionnement latéral des 187 cyclistes /edpm au niveau du passage piéton .....
Figure 52 : Répartition des directions empruntées par les 187 cyclistes / EDPM en fonction selon leur position latérale au milieu du passage piéton 61
Figure 53 : Vélo traversant sans véhicule sur la sécante 62
Figure 54 : Vélo traversant avec véhicule en mouvement sur la sécante 62
Figure 54 : Vélo traversant avec véhicule à l'arrêt sur la sécante 63
Figure 53 : Premier niveau de l'arbre de décision complet des sections droites 68
Figure 54 : Deuxième niveau de l'arbre de décision complet des sections courantes 68
Figure 55 : Troisième niveau de l'arbre de décision complet des sections droites : partie rurale 69
Figure 56 : Deux premiers niveaux de l'arbre de décision pour la recherche de situations homogènes des lignes droites 70
Figure 57 : développement du nœud 3 de l'arbre de décision pour la recherche de situations homogènes des lignes droites en milieu rural à 70 km/h 71
Figure 58 : développement du nœud 4 de l'arbre de décision pour la recherche de situations homogènes des lignes droites en milieu rural à 90 km/h 72

Figure 59 : développement du nœud 5 de l'arbre de décision pour la recherche de situations homogènes des lignes droites en urbain à 50 km/h 73
Figure 60 : développement du nœud 6 de l'arbre de décision pour la recherche de situations homogènes des lignes droites en urbain à 70 km/h 74
Figure 61 : Premier niveau de l'arbre de décision complet des intersections avec arrêt 80
Figure 62 : développement du nœud 2 de l'arbre de décision des intersections avec arrêt en urbain 81
Figure 63 : développement du nœud 1 de l'arbre de décision des intersections avec arrêt en milieu rural 82
Figure 64 : Trois premiers niveaux de l'arbre de décision complet des intersections 84
Figure 65 : Développement du nœud 3 de l'arbre de décision des intersections en urbain avec changement de direction 85
Figure 66 : Développement du nœud 4 de l'arbre de décision des intersections en urbain sans changement de direction 86
Figure 67 : Développement du nœud 5 de l'arbre de décision des intersections pour celles autres que les giratoires en milieu rural 87
Figure 68 : développement du nœud de l'arbre de décision des intersections pour les giratoires en milieu rural 88

Table des tableaux

Tableau 1 : Indicateurs avant la traversée Site 1 et 2 23
Tableau 2 : Indicateurs pendant la traversée 27
Tableau 3 : Indicateurs avant et pendant la traversée Site 3 29
Tableau 4 : Interprétation de l'effet 66
Tableau 5 : Interprétation des t-tests 66
Tableau 6 : Nombre de situations par type de route et de vitesse limite en ligne droite 67
Tableau 7 : Moyenne des vitesses observées en fonction du type de route et des VMA sur les lignes droites 69
Tableau 8 : Récapitulatif des observations utilisées pour l'analyse des lignes droites 69
Tableau 9 : Test statistique sur la présence de piétons en section courante en contexte rural à 70 km/h sans suivi 75
Tableau 10 : Test statistique sur la présence de piétons en section courante en contexte rural à 70 km/h avec suivi 75
Tableau 11 : Test statistique sur la présence de piétons en section courante en contexte rural à 90 km/h avec suivi 76
Tableau 12 : Test statistique sur la présence de piétons en section courante en contexte rural à 90 km/h sans suivi 76
Tableau 13 : Test statistique sur la présence de piétons en section courante en contexte urbain à 70 km/h avec suivi 78
Tableau 14 : Test statistique sur la présence de piétons en section courante en contexte urbain à 70 km/h sans suivi 78
Tableau 15 : Test statistique sur la présence de piétons en section courante en contexte urbain à 50 km/h avec suivi 79
Tableau 16 : Test statistique sur la présence de piétons en section courante en contexte urbain à 50 km/h sans suivi 79
Tableau 17 : Nombre de situations par type de route et de vitesse limite en intersection 80
Tableau 18 : Moyenne des vitesses observées en fonction du type de route et des VMA sur les intersections 82
Tableau 19 : Récapitulatif des observations avec et sans piétons dans les intersections 83
Tableau 20 : Récapitulatif des observations utilisées pour l'analyse des intersections 83

Tableau 21 : Test statistique sur la présence de piétons en intersection en contexte urbain à 50 km/h avec manœuvre 89
Tableau 22 : Test statistique sur la présence de piétons en intersection en contexte urbain à 70 km/h avec manœuvre 89
Tableau 23 : Test statistique sur la présence de piétons en intersection hors giratoire en contexte urbain sans manouvre 90
Tableau 24 : Test statistique sur la présence de piétons en giratoire en contexte urbain sans manouvre 91
Tableau 25 : Test statistique sur la présence de piétons en intersection hors giratoire en contexte rurale avec manouvre 92
Tableau 26 : Test statistique sur la présence de piétons en intersection hors giratoire en contexte rurale sans manouvre 92
Tableau 27 : Test statistique sur la présence de piétons en giratoire en contexte rurale à 70 km/h .. 93
Tableau 28 : Test statistique sur la présence de piétons en giratoire en contexte rural à 90 km/h 94

1 Introduction

1.1 Présentation du projet SURCA

L'objectif global de ce projet est de contribuer à une meilleure intégration des véhicules autonomes dans la circulation actuelle. Il s'agit ainsi d'identifier quelles interactions existent entre les différents usagers de la route et quelles stratégies pertinentes sont mises en place par les conducteurs. Cela permettra de faire des recommandations aux concepteurs de véhicules autonomes et aux pouvoirs publics sur les besoins en termes d'interactions et en termes de comportement du véhicule autonome.

1.2 Objectifs du WP6

Les objectifs du WP6 dans le projet SURCA sont

1. de décrire les principaux scénarios critiques dans le cadre de l'introduction de véhicules automatisés dans le trafic, et plus particulièrement ceux qui impliquent des interactions avec les cyclistes et piétons ;
2. de procéder à l'analyse de ces interactions de manière à identifier les plus pertinentes pour la conduite automatisée ;
3. d'évaluer des gains d'accidentalité potentiels et d'identifier des nouveaux risques éventuels liés aux véhicules automatisés.

En lien avec les autres WP, et plus particulièrement le WP2, il s'agit d'identifier les variables descriptives dans ces scénarios d'interaction, notamment lors de situations d'interactions fortes à l'instar de celles se produisant en intersections. Dans ces phases critiques, le comportement du véhicule automatisé diffère des autres usagers et induit une modification de comportement de ces derniers qu'il convient d'identifier.

Les travaux présentés dans ce livrable aboutissent à la formulation de recommandations visant à améliorer les interactions des piétons et des cyclistes lors de l'introduction des VA dans la circulation. Pour cela, les analystes ont utilisé des données d'observations bord de voie, des interactions entre vélos et/ou piétons et autres véhicules selon différents aménagements routiers (Cerema partie 2 et 3) et des données de conduite en situations naturelles Udrive (Lescot).

2 Analyse des comportements de piétons

2.1 Étude préalable sur les interactions en traversée sur passage piéton : paramètres à prendre en compte

Préambule 1 - Limites technologiques

Les limites technologiques des capteurs, quelles que soit leurs technologies (caméras, capteurs thermiques, radar, …) ne sont pas complétement connues (tant aujourd'hui que dans l'avenir).

Recommandation 1

Les performances du VA suivantes devront être définies car il s'agit de détecter des situations et des mouvements dans un laps de temps compatible avec la conduite en situation réelle

- Capacités, fiabilité et vitesse d'analyse de la détection en statique des piétons
- Capacités, fiabilité et vitesse d'analyse de la détection dynamique : analyse des mouvements, mesure de la vitesse des piétons

Préambule 2 : les considérations suivantes sont valables sur les traversées aux abords des passages piétons. Elles sont basées et documentées par :

- Les réglementations et les règles de l'art actuelles
- L'analyse de certains accidents de la circulation
- Des observations naturalistiques
- Le retour d'expériences des premières navettes autonomes

Le véhicule automatisé doit s'intégrer dans un espace où coexistent de nombreux usagers et en particulier les piétons. Les piétons ont des comportements spécifiques. Ils doivent interagir avec leur environnement, avec les véhicules automatisés ou non.

La sécurité du piéton dans une première approche est le fait d'éviter l'accident, le conflit physique dans l'espace/temps. La sécurité consiste à gérer l'interaction véhicule/automatisé sous cet angle. Du point de vue des cinématiques de déplacement du véhicule autonome et du piéton, le conflit doit être évité.

Cependant au regard du « fonctionnement » du piéton dans l'espace public et dans les zones circulées, cette approche est réductrice.

En effet, le piéton adapte son comportement en fonction de l'état de la circulation et de son analyse sur le comportement supposé des véhicules. De plus, son expérience de déplacement est liée à son sentiment de confort et de sécurité. Ceci est en particulier très vrai dans l'action de traversée comme le montre l'ensemble des travaux de la littérature.

Ainsi, **la gestion de l'interaction globale des piétons/véhicules doit prendre en compte le sentiment de sécurité et le confort des piétons** au-delà du nécessaire évitement du conflit.

Question de recherche :

Est-ce que les principes de conception pour d*imensionner les triangles de visibilité* et de respect des visibilités réciproques en approche des traversées, basés sur un temps de réaction humaine seront suffisants pour le véhicule autonome ?

Analyse : Exemple pour une voie limitée à 50km/h

Cinématique des véhicules et triangle de visibilité

Théoriquement, il est nécessaire de dégager un triangle de détection de 23 m et permettant une vision de 2 m en amont de la traversée sur le trottoir pour permettre l'arrêt d'un véhicule Ces valeurs sont basées sur un temps de réaction de 1 s du conducteur humain. Elles ne tiennent pas compte d'une éventuelle moindre valeur de la décélération (problème d'adhérence par exemple), de la nécessaire pondération par un coefficient de sécurité.

Règles de l'art

Aujourd'hui, l'aménagement de voirie est basé sur le temps de réaction d'un être humain. Par exemple, les préconisations dans une rue à 50km/h, sont une distance de 25 à 30 m pour un piéton situé à 1 ou 2 m du bord (figure 1) (Reynaud, 2016)

Si le temps de réaction du véhicule automatisé est supérieur au temps de réaction d'un humain et en tenant compte des coefficients de sécurité, le triangle de détection devra être plus grand et cette visibilité ne sera pas assurée sur la voirie existante.

Le temps de réaction/ décision du véhicule automatisé s'il est supérieur au temps de réaction humain nécessite une diminution forte de la vitesse du VA pour qu'il soit en mesure de s'arrêter ce qui peut perturber grandement le trafic.

Recommandation 2

Les performances du VA doivent subir des tests normalisés pour obtenir des valeurs seuils compatibles avec toutes les situations de conduite rencontrées et la conception des infrastructures. Par exemple, pour les traversées piétonnes, la compatibilité avec les triangles de visibilité existants doit être assurée.

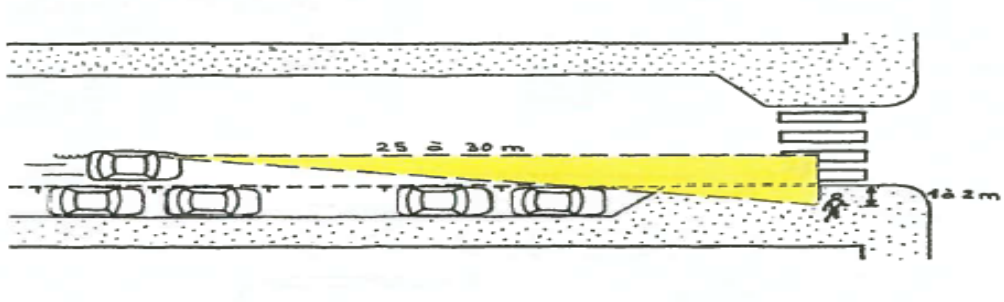


Figure 1 : Triangle de visibilité sur voie à 50 km/h (Reynaud 2016)

Questions de recherche

Est-il acceptable que le VA adopte une cinématique qui ne met pas en danger le piéton mais qui soit en opposition avec la règle du code de la route ?

Comment définir la notion de piéton régulièrement engagé ou manifestant clairement l'intention de le faire ?

Analyse :

D'une part, cinématiquement parlant, il est possible que le véhicule ne freine pas et continue sa circulation à vitesse constante et évite le piéton lorsque le piéton se trouve sur une autre voie de la chaussée et atteint la deuxième voie circulée où passe le VA après le passage du véhicule. Ceci n'est pas forcément en cohérence avec le code de la route qui stipule :

Article R415-11, (Code de la route) « Tout conducteur est tenu de céder le passage, au besoin en s'arrêtant, au piéton s'engageant régulièrement dans la traversée d'une chaussée ou manifestant clairement l'intention de le faire ou circulant dans une aire piétonne ou une zone de rencontre. »

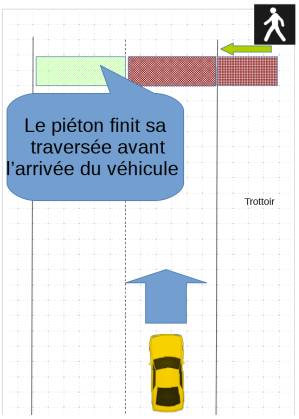


Figure 2 : Déplacement piéton

Recommandation 3

Le fait de continuer à circuler à vitesse constante alors qu'un piéton est au bord du trottoir et manifeste son intention de traverser, ou est en train de traverser, est contraire au code de la route **Le véhicule automatisé doit respecter le code de la route et être en mesure de s'arrêter dès que le piéton est présent sur la chaussée en traversée.**

Il est nécessaire de définir clairement pour le VA la situation : un piéton s'engage régulièrement dans la traversée d'une chaussée ou manifeste clairement l'intention de le faire. Cette définition est parfois délicate à interpréter pour les usagers et le juriste. Comment définir avec exactitude l'engagement régulier et **surtout l'intention de le faire**. (Temps ou distance avant l'action) ?….

Néanmoins, les analyses naturalistiques montrent que dans certains cas, les usages ne correspondent pas à un strict respect du code de la route. Ce strict respect conduirait à des blocages dans l'écoulement du trafic. Ceci se produit en présence de congestion, en cas de flux importants de piétons ou véhicules par rapport à un fonctionnement de certaines intersections. Certains de ces cas seront analysés par la suite.

Question de recherche : Quelle prise de décision et quelles réactions du piéton en traversée face au comportement du VA ?

Comment comprendre qu'un VA qui ne ralentit pas comme une voiture habituelle a, en réalité, détecté le piéton et va s'arrêter ?

Comment compenser le manque d'échanges d'informations entre le conducteur et le piéton, alors que ces échanges aident les usagers dans leur prise de décision ?

Analyse

La prise de décision de traversée des piétons et leur réaction face au véhicule routier est le fruit des expériences passées liées aux comportements habituels et attendus des véhicules. Si les capacités du VA conduisent à des comportements très différents des véhicules tels qu'un freinage tardif ou une modification de la vitesse d'approche ressentis comme aléatoires pour le piéton, cela peut être problématique. Le piéton risque de faire de mauvais choix ou être dans un ressenti d'insécurité. Le piéton doit pouvoir effectuer sa traversée en confiance, en étant rassuré sur sa sécurité et sans se presser.

Retour expérience d'une navette autonome aujourd'hui illustrant ces difficultés (Pokorny et al., 2021) :

Lors de l'expérimentation à Oslo, les réactions de la navette en mouvement de tourne-à-droite face à des traversées de piétons en carrefour équipé d'une signalisation lumineuse ont été relevées. Dans 18 situations, la navette a laissé passer le piéton. Dans 12 cas de façon fluide : la navette réagit correctement (elle ralentit et laisse passer le piéton). Dans 5 cas, la navette réagit correctement mais un peu exagérément avec un freinage trop brutal ou un temps d'arrêt trop long. Dans la dernière situation, la réaction de la navette n'a pas été correcte : elle s'est arrêtée alors que le piéton avait déjà traversé et se trouvait sur le trottoir, à proximité du passage piéton.

Echanges d'informations entre le conducteur d'un véhicule et le piéton :

Des échanges se produisent fréquemment entre le conducteur et le piéton manifestant une prise en compte mutuelle : gestes de la main, de la tête, captation du regard… Elles permettent aux usagers de vérifier leur prise en compte mutuelle et de comprendre leur intention (analyse bord de voie).

La difficulté pour le piéton devant le VA est l'absence de ces informations. Pour le VA, cela peut être l'absence de ces signaux entre conducteur et piéton ou la difficulté à les détecter et à les interpréter.

Recommandation 4

1] Le véhicule autonome doit avoir un comportement qui se rapproche d'un véhicule sans automatisme pour la cinématique d'arrêt même si ses performances lui permettraient de freiner plus tardivement par exemple.

2] Créer des signaux qui avertissent le piéton de leur prise en compte par le véhicule automatisé.

Question de recherche

Comment définir les distances d'arrêts du VA pour prendre en compte le confort du piéton au-delà de l'évitement du conflit.

Analyse : Le piéton doit pouvoir se déplacer confortablement. Ainsi, des véhicules qui circulent trop près de lui sont sources d'inconfort même s'ils ne le mettent pas en danger.

Valeurs issues de la littérature :

Espace longitudinal : Le besoin d'espace se traduit en termes de voisinage longitudinal du piéton (c'est-à-dire l'espace autour de lui). Les piétons qui se déplacent sur un trottoir observent (Hoogendoorn et Bovy, 2003) une distance de confort ou de sécurité vis-à-vis :

- des murs et petits obstacles : 0,25 m,
- des maisons et obstacles de plus grandes dimensions : 0,45 m,
- et des routes : 0,35 m.

Valeurs mentionnées dans le code de la route et l'Instruction Interministérielle de la Signalisation Routière

Il est nécessaire de prévoir une marge de sécurité pour les arrêts afin que le véhicule s'arrête quelques mètres en amont du piéton. Selon l'arrêté du 12 décembre 2018 relatif à la modification de la signalisation routière, art 117.4 (Arrêté 2018), les collectivités locales, qui le souhaitent, ont la possibilité de réaménager les abords d'un passage piéton, en installant une zone tampon entre les véhicules et les piétons qui traversent (Distance 2m à 5m).

Figure 3 : Exemple d'aménagement de passage piéton (source Cerema: Strasbourg)

L' Article R414-4 Modifié par Décret n°2003-536 du 20 juin 2003 - art. 18 JORF 22 juin 2003 du code de la route mentionne des valeurs pour le dépassement piétons.

> IV. - Pour effectuer le dépassement, le véhicule doit se déporter suffisamment pour ne pas risquer de heurter l'usager qu'il veut dépasser. Il ne doit pas en tout cas s'en approcher latéralement à moins d'un mètre en agglomération et d'un mètre et demi hors agglomération

Recommandation 5

Définir des distances d'arrêt du VA en amont du passage piéton pour le confort de l'usager hors arrêt d'urgence.

Une étude spécifique avec un panel d'usagers (adultes, personnes âgées, enfants, adultes avec enfants en bas âge) pourrait être envisagé pour définir une telle distance qui viendrait s'ajouter à la distance d'arrêt usuelle.

Question de recherche : Quelle adaptation du VA à la vitesse de traversée du piéton ?

Le VA doit être en mesure de prévoir les trajectoires des piétons et donc de connaitre la vitesse de déplacement du piéton.

Analyse

De nombreuses études bord de voie, indiquent que la vitesse du piéton est variable. La vitesse de 1 m/s est une vitesse moyenne. La vitesse peut s'échelonner de 1,7 m/s pour une marche rapide et descendre en dessous de 0,7 m/s pour les personnes présentant des problèmes de mobilité (Lagarde et Battaglia, 2016).

Recommandation 6

Il sera nécessaire que le véhicule autonome puisse mesurer la vitesse instantanée d'un piéton. L'application de valeurs moyennes se révèle insuffisante.

2.2 Analyse de traversées en zone de circulation apaisées

Pourquoi avoir choisi de faire cette analyse spécifique ?

Ces zones de circulations apaisées ne sont pas à priori accidentogènes. Néanmoins le comportement des piétons et des véhicules peut y être sensiblement différent. En effet, dans ces zones, il n'y a pas souvent de traversées matérialisées (marquage réglementaire). Le piéton devient donc de facto « prioritaire » lors de sa traversée (passage piéton éloigné de plus de 50 m). Par ailleurs, ce sont des lieux avec de nombreux usages piétons et qui, souvent, sont dépourvus de dénivellation entre le trottoir et la chaussée.

L'étude de ces configurations spécifiques nous semble mettre en exergue l'ensemble des difficultés que peut rencontrer un véhicule automatisé face à un piéton en traversée dans de nombreuses autres configurations. De plus, le comportement des piétons sur passages piétons a déjà fait l'objet de nombreuses expérimentations et analyses.

Comment les véhicules automatisés vont anticiper et gérer les traversées des piétons ? Les observation in situ seront comparés aux connaissances théoriques sur le comportement des piétons en traversée.

Quelles sont aujourd'hui les pratiques d'usage des piétons et des automobilistes dans ces cas (respect strict du code, anticipation des comportements, communication gestuelle ou autre entre les usagers…) ?

2.2.1 Description des sites

2.2.1.1 Site 1 zone 30 en section courante en l'absence de passage piétons et de places de stationnement (sans masque à la visibilité)

Observations qualitatives

Ambiance : centre de village, le matin d'une journée très chaude, beaucoup de piétons entre deux âges vaquent à leurs occupations et fréquentent les commerces. Des commerçants de la rue vont et viennent. L'ambiance est sereine.

Figure 4 : Illustration du site1 zone 30

Les traversées ont été observées pendant 25 minutes, 50m de part et d'autre d'une zone pavée entre 9H et 9H30.

- circulation véhicule soutenue : véhicules particuliers et petits utilitaires, environ 400 veh/heure dont 5 % de deux roues motorisés (2RM) et 4 % de poids-lourds (PL) (livraisons). Vitesse faible < 50 km/h mais rarement inférieure à 30km/h (avis d'expert).

- Il y a beaucoup de piétons. Ils marchent le long des abords et non sur la route. Les véhicules ne s'arrêtent pas pour laisser traverser les piétons lorsque ceux-ci ne sont pas encore engagés sur la chaussée même si manifestement ils attendent perpendiculairement à la chaussée. Les piétons prennent leur décision de traverser au vu des créneaux dans la circulation. Dès que les piétons se trouvent sur la chaussée les véhicules freinent et s'arrêtent.

Il n'y a pas eu de situation dangereuse pendant l'observation ni de coup de klaxon ou de mouvement d'humeur de la part des usagers.

2.2.1.2 Site 2 zone 30 en section courante en l'absence de passage piétons avec des places de stationnement (avec masque à la visibilité)

Observations qualitatives

Ambiance générale identique au site 1.

La présence d'un stationnement unilatéral côté gauche entraîne des comportements spécifiques. Les piétons traversent préférentiellement aux endroits où il y a la plus grande visibilité : interruption du stationnement lié à un accès riverain ou stationnement d'un scooter.

Certains piétons descendent de leur véhicule et traversent. Deux des trois piétons traversant depuis le coté avec stationnement avec un masque à la visibilité, dans 2 cas, s'arrêtent près du véhicule stationné avant la tranversée.

Figure 5: Illustration du site 2 Zone 30

2.2.1.3 Site 3 : zone de circulation apaisée, rue finissant par un STOP

Analyse qualitative

La rue s'achève par un stop. Les véhicules circulent au pas dans les vingt derniers mètres de la rue et une file de quelques véhicules arrêtés se crée de façon récurrente. Il n'y a pas de marquage de traversée piétonne sur cette branche du carrefour (carrefour en croix)

De nombreux piétons traversent près de la ligne de stop, les véhicules étant à l'arrêt ou pas. La trajectoire du piéton est rectiligne et perpendiculaire. Ils remercient l'automobiliste si celui s'arrête sciemment pour les laisser passer. Les piétons sont prudents (prise systématique d'informations) et peuvent ralentir leur traversée quand la circulation est à l'arrêt.

2.2.2 Comportements en préparation de traversée pour leur anticipation par un véhicule autonome

Question de recherche : Comment anticiper la traversée du piéton dans les zones apaisées, en section courante et en l'absence de passage piéton ?

2.2.2.1 Etat de l'art sur la décision et les comportements du piéton avant la traversée

La prise de décision de traverser chez le piéton a été étudiée de nombreuses fois. Cette décision peut être basée :

- sur un choix individuel : Le piéton observe le trafic, évalue la distance et la vitesse des véhicules de la voie la plus proche de lui mais aussi des autres voies de circulation. Cette évaluation peut être délicate, notamment chez les plus jeunes et les plus âgés (Dommes, 2017).

- être le fruit de l'environnement piéton immédiat : phénomène d'entraînement.

Le comportement des piétons peut être étudié individuellement, à une échelle microscopique ou en tant que groupe (ou foule), échelle macroscopique.

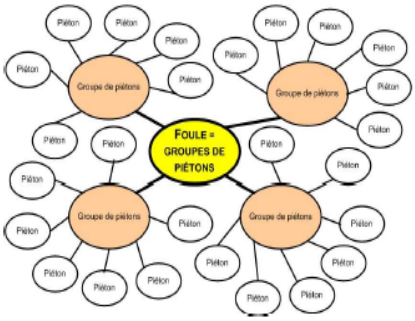


FIG. 2.3 – Les trois échelles d'observation des piétons en groupe. À l'échelle macroscopique, les recherches s'intéressent aux foules, l'échelle mésoscopique à de petits groupes homogènes. L'échelle microscopique concerne le comportement du piéton en tant qu'individu.

Figure 6: Etude de prédiction du choc véhicule-piéton (Wakim 2005).

Indicateurs prédictifs de la préparation de la traversée

- prise d'informations visuelles du piéton
- modification de la trajectoire en particulier la vitesse
- placement du corps par rapport à la voie traversée
- communication sonore ou autre

L'ensemble de ces indicateurs pourrait permettre au véhicule automatisé d'anticiper la traversée.

2.2.2.2 Analyses bord de voie pour l'anticipation de la traversée

Analyse quantitative des indicateurs « prédictifs » de la traversée

Tableau 1 : Indicateurs avant la traversée Site 1 et 2

Indicateurs	Site 1	Site 2
Nombre de traversées étudiées/nombre de piétons	98 traversées 107 piétons (82 % des traversées en solo)	15 traversées 17 piétons (90 % des traversées en solo)
Hommes Femmes Adulte Senior (+75 ans) Enfant	45 % hommes (59 individus dont 6 seniors) 55% femmes (48 individus dont 4 seniors) 90 % (96 individus) 9 % (10 individus) 1 % (1 individu)	30 % hommes (5 individus dont 2 seniors) 70 % femmes (12 individus dont 4 seniors) 65 % (11 individus) 35 % (6 individus) /

Prise d'informations visuelle du piéton *Vérification de la circulation avant la traversée**	90 % oui 10 % non	95 % oui 5 % non (1 cas)
Type de vérification	90 % dans le sens de circulation (rue en sens unique) 10 % à droite et à gauche	80 % dans le sens de circulation (rue en sens unique) 20 % à droite et à gauche
Modification de la vitesse en approche	Pas de modification : 46 % Ralentit : 25 % S'arrête : 33 %	Pas de modification : 35 % Ralentit : 20 % S'arrête : 45 %
Communication non verbale	2 signes de main	Aucune
Placement du corps par rapport à la voie traversée *Trajectoire de la traversée par rapport à la chaussée circulée*	Perpendiculaire 45 % Diagonale 55 %	Perpendiculaire 15 % Diagonale 85 %

Indicateurs prédictifs de la traversée en section courante en l'absence de passage piétons dans une zone 30 : prise d'informations visuelles du piéton, modification de la trajectoire en particulier la vitesse, placement du corps par rapport à la voie traversée, communication sonore ou autre.

Détection du comportement piéton en général : Difficultés

Les piétons portent souvent des lunettes de soleil, des casquettes, des chapeaux. Il est difficile de voir leur visage et de voir leurs mouvements de tête. Le piéton a souvent des sacs, des cabas à roulettes. Sa « silhouette » est ainsi modifiée.

L'ensemble des indicateurs prédictifs cités seront difficilement détectables par le véhicule automatisé.

Figure 7: Une petite fille traverse la rue ?

Présence de masques à la visibilité :

La présence des masques à la visibilité (stationnement) ne permet pas d'anticiper les comportements de piétons car ils ne sont pas visibles. Ce sont les piétons qui doivent traverser prudemment après avoir vérifié qu'ils peuvent le faire sans risque en fonction de la visibilité, de la distance et de la vitesse des véhicules (article R.412-37 du code de la route).

- Les piétons observés ont des comportements qui peuvent prêter à confusion pour les capteurs sensés détecter des traversées : piéton qui voit un ami de l'autre côté de la rue et lui fait un signe de la main, piéton s'arrêtant au bord de la chaussée pour observer la vie matinale ou pour téléphoner, piéton ralentissant sur le trottoir pour différentes raisons : lèche vitrine, rencontre avec ami, encombrement sur le trottoir…

Anticipation des traversées :

Pour le site 1 (cf. description du site au 2.2.1.1) :

- 40% des piétons ne modifient pas leur vitesse d'approche avant la traversée sur les vidéos

Il n'y a pas toujours de ralentissement avant la traversée dans notre cas. Les détections basées sur les algorithmes de biomécaniques des piétons (Coeugnet et al., 2019) ne pourront peut-être pas toujours être mises en œuvre. Ceci est peut-être lié à l'absence de trottoir ; le piéton n'a pas à gérer le franchissement d'une différence de niveau.

- 10% n'effectue pas de prise d'informations visuelles flagrantes
- 55% se présente devant la chaussée pour réaliser la traversée en diagonale, la position corporelle du piéton n'est donc pas toujours perpendiculaire à la chaussée.

L'ensemble des indicateurs précités ne sont pas toujours le signe d'une traversée même s'ils peuvent être des indices concordants.

Est-il possible par un procédé d'intelligence artificiel d'atteindre un taux d'anticipation des traversées équivalent ou supérieur à celui d'un conducteur humain ?

Recommandation 7

Indicateurs prédictifs de traversée (prise d'informations visuelles du piéton, modification de la trajectoire en particulier la vitesse, placement du corps par rapport à la voie traversée, communication sonore ou autre) :

- **Ils seront difficilement détectables par le véhicule automatisé.**
- **Ils ne sont pas toujours le signe d'une traversée même s'ils peuvent constituer des indices concordants et mener à un pronostic statistique d'une anticipation de la traversée**.

Les constructeurs devront expliciter les critères choisis pour leur modèle d'anticipation de la traversée des piétons (critères de détection, limites de détection) et la fiabilité du pronostic. Cette fiabilité sera forcément faible dans certaines situations.

2.2.3 Gestion par le VA des comportements pendant la traversée

Question de recherche : Comment prévoir les trajectoires lors de la traversée du piéton dans les zones apaisées en section courante et en l'absence de passage piéton ?

Le VA doit être en mesure de prévoir les trajectoires des piétons et donc de connaitre la vitesse et la direction de déplacement du piéton en traversée.

2.2.3.1 Etat de l'art sur les comportements du piéton en cours de traversée en section courante

L'article R.412-39 du code de la route impose que hors des intersections, les piétons sont tenus de traverser la chaussée perpendiculairement à son axe.

En moyenne, la trajectoire d'un piéton qui traverse la route sur un passage piéton sera plutôt perpendiculaire à la route, alors qu'un piéton qui traverse hors d'un passage piéton aura tendance à arrondir les angles et à prendre la diagonale (Wakim 2005).

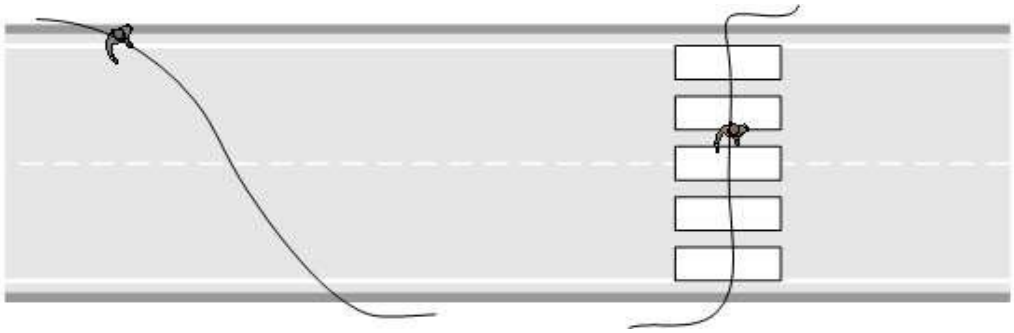


Figure 8: Trajectoires de piétons traversant une route, hors et sur passage piéton (source étude de prédiction du choc véhicule-piéton, C Wakim-2005)

Description de la traversée

Les différentes phases d'une traversée de rue sont typiquement :

1. « démarrage » en descendant du trottoir ou au début d'une nouvelle voie, avec augmentation de la vitesse, jusqu'à l'atteinte de la vitesse voulue,
2. maintien de la vitesse de croisière,
3. éventuellement, avant de traverser une nouvelle voie véhicule : accélération, ralentissement, ou changement de direction doux,
4. « fin de traversée » : léger ralentissement, changement de direction.

Un piéton se déplace en adoptant une des trois allures suivantes : marche, course lente ou course rapide. Pour piloter son déplacement, le piéton a la possibilité d'agir sur les éléments suivants :

– le piéton marche, « normalement », vers l'avant (déplacement longitudinal). Il joue sur la longueur des pas, leur cadence et/ou la direction suivie,

– d'autres déplacements sont envisageables : les pas sur le côté, l'arrêt, ou la marche arrière.

2.2.3.2 Analyse bord de voie pendant la traversée en section courante en zone de circulation apaisée

Site1 et 2 : Dans notre cas, il n'y a pas de marquage donc la trajectoire perpendiculaire à la chaussée n'est pas acquise. La diminution de vitesse liée au dénivelé du trottoir n'est pas assurée. Notre configuration ne comporte qu'une voie à sens unique.

Les indicateurs suivants ont été analysés :

Tableau 2 : Indicateurs pendant la traversée

Indicateurs	Site 1	Site 2
Rappel Nombre de traversées étudiées/nombre de piétons	98 traversées 107 piétons (82 % des traversées en solo)	15 traversées 17 piétons (90 % des traversées en solo)
Modification de la trajectoire pendant la traversée	En ligne droite 98 % 2 traversées avec modification de direction, longe la rue et traverse	En ligne droite 100 %
Direction de la trajectoire par rapport à l'axe de la chaussée circulée	Perpendiculaire 45 % Diagonale 55 %	Perpendiculaire 15 % Diagonale 85 %
Trajectoire quand le piéton en amont : - S'arrête - Ne s'arrête pas	 Perpendiculaire 70 % Perpendiculaire 30%	 Perpendiculaire 20 % Perpendiculaire : 5 %
Modification de la vitesse lors de la traversée par rapport à la vitesse de marche avant la traversée	Non 85% Ralentissement : 8 % (8 traversées) Accélération : 2 traversées Modification au cours de la traversée : 4 traversées 2 accélèrent en fin de traversée, 2 ralentissent	Pas de modification : 65 % Ralentit : 35 %
Reprise d'informations pendant la traversée	Non 60 % Oui 40	Aucune

<u>Indicateurs prédictifs de la trajectoire en traversée en l'absence de passage piétons dans une zone 30</u>

- Direction de la trajectoire par rapport à l'axe de la chaussée

Cette direction n'est pas toujours perpendiculaire à l'axe. Dans note cas, elle est majoritairement en diagonale. Ceci peut être dû à l'absence de passage piétons. En l'absence de marquage, le piéton n'est pas « guidé » pour une traversée perpendiculaire à l'axe.

- Modification de la direction de la trajectoire pendant la traversée

La très grande majorité des trajectoires du piéton sont rectilignes (99%). Il n'y a pas de trajectoire courbe ou erratique.

- Modification du rythme de marche avant la traversée et pendant la traversée

La rythme de marche n'est pas modifié pendant la traversée par rapport au rythme de marche sur le trottoir. Ici l'ambiance de traversée est « sereine ».

- Modification du rythme de marche au cours de la traversée

Si le piéton juge sa traversée confortable, il ne modifie pas son rythme de marche pendant la traversée, c'est le cas ici. Attention ceci n'est pas une généralité. Dans certains accidents piétons, il arrive que face à l'arrivée d'un véhicule surprenant le piéton, celui-ci se fige au milieu de la chaussée.

Recommandation 8

Indicateurs prédictifs de la trajectoire de traversée en **l'absence de passage piétons** : direction, vitesse et évolution au cours de la traversée.

Certains indicateurs semblent pouvoir être des paramètres utiles pour la prédiction des traversées.

- Trajectoire la plupart du temps rectiligne
- Pas de changement de rythme de marche pendant la traversée

En revanche, la perpendicularité de la traversée par rapport de l'axe de la chaussée n'est pas un paramètre à retenir.

Cette prédiction de trajectoire ne peut être que statistique. Pour éviter les conflits, il convient que le VA puisse en temps réel mesurer la position et la vitesse du piéton pour infléchir sa trajectoire.

2.2.3.3 *Analyse des comportements pendant la traversée en intersection sans passage piéton en zone de circulation apaisée*

Question de recherche : Comment gérer les traversées en intersection, en l'absence de passage piéton et situation de congestion ou de trafic fortement ralenti ?

Le VA doit être en mesure de prévoir les trajectoires des piétons et donc de détecter le piéton, de connaitre la vitesse et la direction de déplacement du piéton en traversée.

Site 3 : zone de circulation apaisée, rue finissant par un STOP, étude des traversées aux abords de l'intersection

La rue s'achève par un stop. Les véhicules circulent au pas dans les 20 derniers mètres de la rue et une file de quelques véhicules arrêtés se crée de façon récurrente. Il n'y a pas de marquage de traversée piétonne sur cette branche du carrefour (carrefour en croix).

De nombreux piétons traversent près de la ligne de stop, les véhicules étant à l'arrêt ou au pas. La trajectoire du piéton est rectiligne et perpendiculaire. Il remercie l'automobiliste si celui s'arrête sciemment pour les laisser passer. Les piétons sont prudents (prise systématique d'informations) et peuvent ralentir leur traversée quand la circulation est à l'arrêt.

En amont de la traversée, la présence des masques à la visibilité (stationnement) ne permet pas d'anticiper les comportements de piétons car ils ne sont pas visibles.

Durant la traversée, en cas de congestion les piétons sont parfois amenés à traverser entre 2 véhicules (40%) et parfois à contourner les véhicules.

Tableau 3 : Indicateurs avant et pendant la traversée Site 3

Indicateurs	Site 3
Nombre de traversées étudiées/nombre de piétons	17 traversées / 17 piétons 100% des traversées en solo
Prise d'informations visuelles du piéton *Vérification de la circulation avant la traversée**	100 % oui
Modification de la vitesse en approche	Pas de modification : 60 % Ralentit : 15 % S'arrête : 25 %
Communication non verbale	4 signes de main
Modification de la trajectoire pendant la traversée	En ligne droite 100 %
Direction de la trajectoire par rapport à l'axe de la chaussée circulée	Perpendiculaire 90 % Diagonale 10 %
Modification de la vitesse lors de la traversée par rapport à la vitesse de marche avant la traversée	Non 85% Ralentissement : 15 %

Recommandation 9

A l'approche des intersections et en cas de circulation à l'arrêt ou au pas, la probabilité de traversées des piétons est grande. Les piétons peuvent se trouver à la fois devant ou derrière le véhicule et sur les côtés.

La détection des piétons sur la chaussée en cas de circulation au pas ou l'arrêt doit se faire dans l'ensemble des directions dans un rayon faible (1m) pour anticiper les trajectoires entre véhicules.

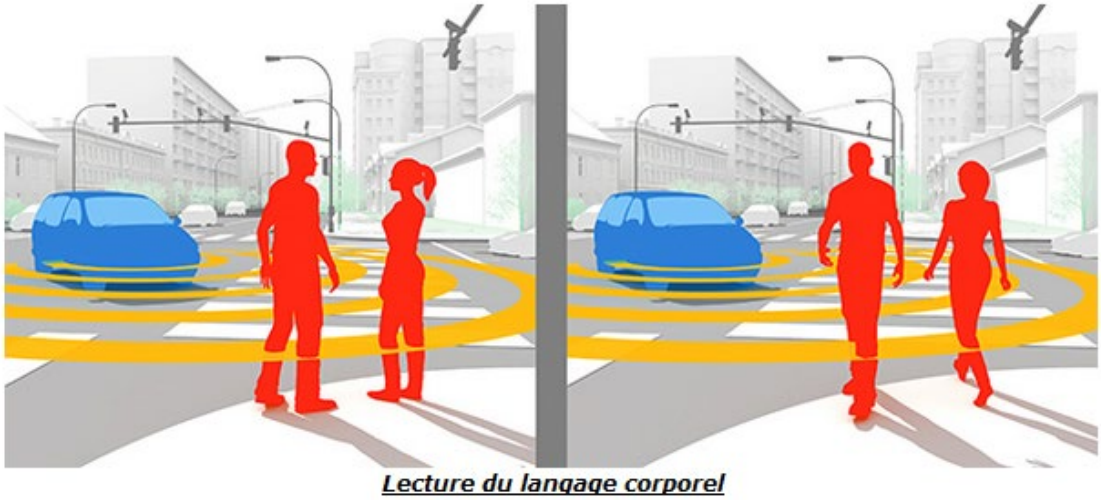


Figure 9 : Language corporel (source : https://www.developpez.com/actu/217389)

2.2.4 Analyse des usages informels en zone de circulation apaisée

Question de recherche : Comment intégrer le comportement du véhicule autonome dans le flux de circulation général : usage informel et respect des règles ?

Site 1 et 2 : Analyse des usages

Les véhicules ne s'arrêtent pas pour laisser traverser les piétons lorsque ceux-ci ne sont pas engagés sur la chaussée même si manifestement ils attendent perpendiculairement à la chaussée. Les piétons prennent leur décision de traverser au vu des créneaux dans la circulation. Dès que les piétons se trouvent sur la chaussée les véhicules freinent et s'arrêtent.

L'observation des véhicules indique qu'un seul s'est arrêté pour laisser passer un piéton se présentant au bord de la chaussée pour traverser. En revanche, tous ont ralenti ou se sont arrêtés pour laisser passer le piéton engagé sur la chaussée. Il n'y a eu aucun freinage brusque.

Ainsi l'usage informel dans cette zone veut que le véhicule circule lentement et s'arrête dès que le piéton est sur la chaussée. Le piéton attend lui aussi un créneau dans la circulation pour commencer à

traverser. Il est à noter que les piétons traversent malgré la proximité des voitures (parfois une dizaine de mètres seulement).

Conséquences pour Le VA

Le véhicule autonome peut être amené à détecter une intention de traverser du piéton et donc s'arrêter en surprenant les autres conducteurs (possibilité de choc arrière et d'accident).

Si la détection est efficace les véhicules autonomes seraient amenés à détecter 4 traversées par minute sur les 100 mètres étudiés et s'arrêter de nombreuses fois. Cela pourrait avoir un impact très important sur le trafic.

Site 3 : Intersection avec stop : Analyse des usages

L'observation des véhicules indique que plusieurs des véhicules se sont arrêtés près de la ligne de stop pour laisser passer le piéton. En effet, se trouvant en situation de quasi-congestion, il n'est pas préjudiciable pour le temps de parcours des conducteurs de laisser passer le piéton.

La vitesse du flux de véhicule étant quasi nulle, si le véhicule autonome s'arrête, la probabilité de chocs arrière est ici plus faible.

En cas de flux piétons important traversant et pouvant amener le VA autonome à ne plus pouvoir avancer s'il reste sur des conditions de sécurité ceci peut poser la question d'un blocage de l'écoulement de la circulation (cf. partie suivante intersection gérée par feux et congestion).

Retour d'expérience navettes autonomes aujourd'hui

Des expériences avec des véhicules autonomes aux USA montrent que les chocs arrière sont les collisions les plus fréquentes avec ces types de véhicules (Biever et Al., 2020).

Recommandation 10

Dans certaines zones apaisées les traversées des piétons se font dans un usage informel : les véhicules circulent lentement et ne s'arrêtent que si le piéton est présent sur la chaussée ; les piétons profitant de créneau dans la circulation pour s'arrêter. L'arrêt spontané du VA s'il détecte un piéton sur le point de traverser risque de surprendre les autres conducteurs et créer un accident par choc arrière.

Le VA devrait être reconnaissable par les autres usagers pour alerter sur ces comportements spécifiques.

Les arrêts plus fréquents d'un VA pourraient faire diminuer le débit du trafic routier de certaines rues ou certaines intersections.

Si les véhicules automatisés se généralisent avec des comportements de conduite entrainant des diminutions de débit, cet impact devra être pris en compte dans la conception de la voirie dans les zones à forts trafics véhicules ou forts flux piétons.

2.3 Traversées des piétons en mouvements tournants et feux verts simultanés

Pourquoi avoir choisi de faire cette analyse spécifique ?

Le choix a été fait d'étudier des situations accidentogènes à des carrefours à feux où :

- la visibilité réciproque peut être gênée

- le mouvement des véhicules se décompose en phases de gestion de plusieurs zones de conflit.

- les priorités réglementaires sont établies. Le feu vert véhicule indique que le flux routier peut passer mais le véhicule doit laisser passer le piéton en train de traverser sur la voie sécante. **Cependant la présence de verts simultanés, pour le véhicule et pour le piéton, donne inconsciemment aux 2 types d'usagers un sentiment de priorité.**

En agglomération, de nombreux carrefours ne comportent pas de phases spécifiques pour les mouvements tournants en gauche comme à droite et se trouvent dans ces configurations.

L'étude de cette configuration nous semble mettre en exergue l'ensemble des difficultés que peut rencontrer un véhicule automatisé face à un piéton dans une traversée gérée par une signalisation lumineuse.

Problématique en mouvements tournants avec feux verts simultanés piétons et véhicules : Comment les véhicules autonomes vont anticiper et gérer les traversées en mouvements tournants ? Quelles difficultés d'anticipation et de visibilité réciproque dans ce type de carrefour ? Quelles sont aujourd'hui les pratiques d'usage des piétons et des automobilistes dans ces cas et quelles différences avec un VA ?

2.3.1 Rappel sur le fonctionnement théorique

D'après le guide carrefour à feux, (CERTU 2010), la facilité des mouvements tournants en carrefour à feux (cf. tableau ci-dessous) dépend :

- du flux piétons sur la rue sécante. En effet, si le flux piéton est important, les créneaux permettant le passage des véhicules est très faible.

- de la capacité de stockage des véhicules dans le carrefour.

De plus, on considère que lorsque le flux de tourne-à-droite dépasse les 500 veh/h (en temps de vert), il est difficile de faire traverser en même temps les piétons sur la voie sécante.

Dans les faits de nombreux carrefours se trouvent parfois avec des flux de piétons et routiers très importants notamment en heures de pointe.

Type de mouvement		coefficient uvpd
Mouvement direct non gêné	→	1
Mouvement tournant à angle droit	↱	1,1
Mouvement soumis à giration difficile	↱	1,2
Mouvement tournant non prioritaire sur flux piéton important (>250 piétons/heure)	↱	1,3 ou plus
Mouvement tournant à gauche et se stockant dans le carrefour*	↰	1,7

Tab. 3 : coefficient de transformation en uvpd selon la nature du mouvement.
** N.B. On applique ce coefficient uniquement lorsque les véhicules qui tournent à gauche s'arrêtent dans le carrefour pour laisser passer les véhicules du mouvement adverse dans des carrefours simples.*

Figure 10 : Pondération sur les difficultés d'effectuer les mouvements (CERTU 2010)

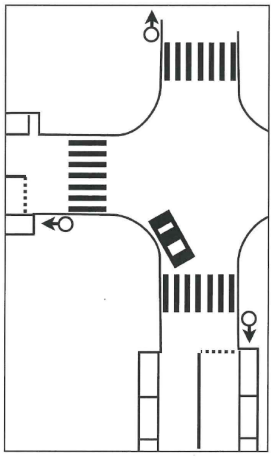


Figure 11 Stockage véhicule en mouvement tourne à droite devant le passage piétons (CERTU 2010)

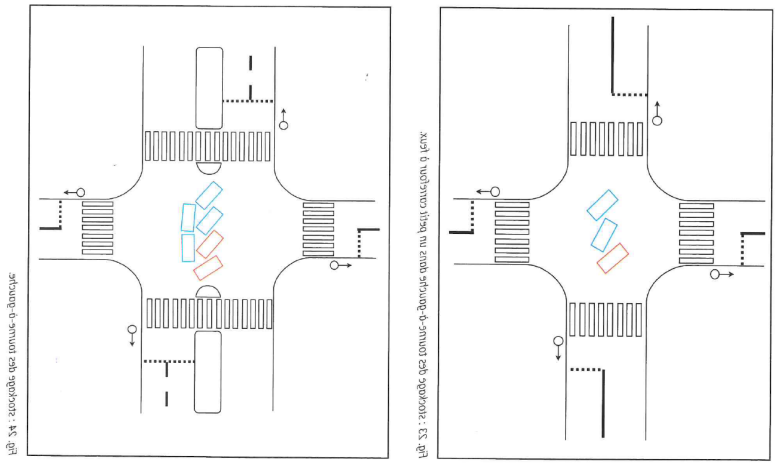


Figure 12 : Problématique du stockage mouvement tourne à gauche (CERTU 2010)

2.3.2 Accidents typiques

Cas 1 : Sur un vaste carrefour, les feux sont verts simultanément pour le véhicule et pour le piéton sur la branche sécante. Un véhicule en mouvement tournant à droite perçoit tardivement un piéton qui traverse sur le passage piéton et le percute. Quel comportement du VA ici ?

Figure 13 : Illustration de carrefour feux verts simultanément pour le véhicule et pour le piéton sur la branche sécante (source google maps)

Cas 2 : En feux verts simultanés : un conducteur effectuant un mouvement tournant doit gérer deux files de véhicules venant de sa droite et l'arrivée des piétons sur la sécante. Il déclare ne pas avoir vu le piéton. Quel comportement du VA ici ?

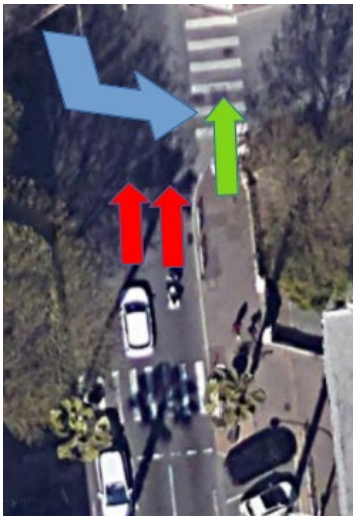


Figure 14 : Illustration de carrefour complexe (source google maps)

Cas 3 : un véhicule PL en mouvements tournant, feu vert simultanées pour le piéton ne perçoit pas le piétons qui traverse et le percute. Ceci peut indiquer une difficulté pour le piéton d'anticiper le comportement du PL qui se décale à gauche pour prendre son virage à droite.

2.3.3 Analyse des Mouvements tournant à droite en feux verts simultanés

Question de recherche : Comment détecter le piéton dans un environnement urbain complexe dans une intersection à feux et/ou l'usager piéton a un fort sentiment de priorité ?

Lors de l'identification des conflits à gérer par le VA et des tâches à effectuer, il a été repéré 2 tâches pour franchir le carrefour et 1 conflit :

- débuter son mouvement tournant. En fonction des configurations de carrefours, plus ou moins larges, une zone d'attente peut permettre de dégager la voie du mouvement tout droit avant de franchir le passage piétons sur la rue transversale (figure 8),

- gérer l'interaction avec le flux piétons sur la voie sécante et en particulier anticiper l'intention de traverser.

Figure 15 : Mouvement tourne à droite direct sans stockage devant le passage piétons- (source Cerema-google view)

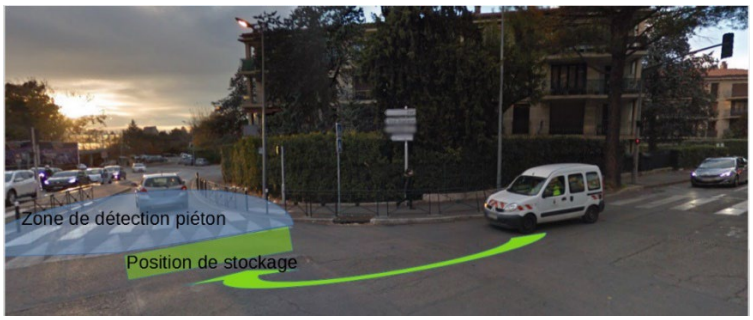


Figure 16 : Mouvement tourne à droite avec passage piéton décalé et possibilité de stockage devant. (Source Cerema-google view)

À noter sur cet exemple, les barrières permettant de canaliser le piéton.

Retour expérience véhicule autonome

Oslo : (Pokorny et al., 2021)

La navette franchit le feu en présence de piétons sur la sécante : 7 cas d'interactions piétons/VA ont été observés dans un mouvement tourne à droite avec feux verts simultanés. Dans 5 cas, la navette a réagi correctement. Dans un cas, la navette s'est arrêtée brutalement près du piéton. Dans un cas

dans, le piéton et la navette approchaient simultanément de l'intersection ; le piéton s'est arrêté et la navette est passée la première.

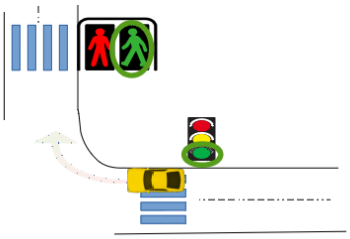


Figure 17 : Mouvement tourne à droite direct sans stockage devant le passage piétons

La navette a entamé son mouvement de tourne à droite en présence de piétons sur la sécante : 31 interactions observées. Dans 18 cas, la navette s'est arrêtée. Dans 13 cas la navette n'a pas laissé le passage au piéton. Les causes évoquées dans l'expérience sont des intentions peu claires des piétons, des piétons trop loin du passage, des traversées hors passages piétons, la modification du signal lumineux au moment de la prise de décision du VA.

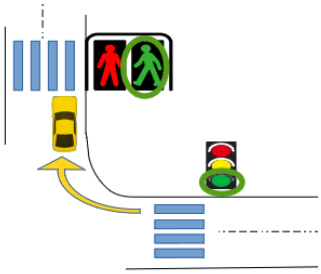


Figure 18 : Mouvement tourne à droite direct avec stockage devant le passage piétons

Ces interactions sur le terrain montrent que :

- la fiabilité des réactions du VA n'est pas encore assez élevée,

- les difficultés de détection du piéton et de ses intentions, de la prise de décision face à l'ensemble des paramètres en prendre en compte par le VA.

Gestion des masques :

Pour rappel, on différencie les masques à la visibilité fixe : végétation, mobilier urbain, et les masques à la visibilité mobile : véhicule en stationnement, véhicule en mouvement, …

La gestion des masques à la visibilité par le piéton :

Le piéton peut s'arrêter et prendre de l'information en se décalant avant la prise de décision de traverser. Néanmoins le piéton n'a pas toujours de conscience de ces masques. En traversée au feu vert, le piéton est confiant et peut traverser sans prise d'informations mais cette situation peut se retrouver dans d'autres configurations.

Dans le cas des mouvements tournants, il faut que le piéton soit conscient de la direction de la venue du danger. Le véhicule étant parfois hors de sa vue (fig. 8) ou le mouvement tournant difficilement anticipable (un véhicule stocké dans le carrefour est en attente d'un créneau).

Gestion des masques par le véhicule autonome

Dans la réalité le conducteur humain adapte sa vitesse en fonction de son expérience et de ses connaissances de conduite et de son analyse environnementale en temps réel avec plus ou moins de réussite.

Le VA doit-il adapter sa vitesse non pas en fonction de la vitesse autorisée mais de ses capacités de détection du piéton (approche environnementale en temps réel) dans certaines situations ?

Figure 19: Masques à la visibilité et mouvements tournants- source Cerema-google view

Recommandation 11

Dans les carrefours à feux en mouvements tournants, le véhicule autonome doit adapter sa vitesse non pas en fonction de la vitesse autorisée mais de ses capacités de détection du piéton (approche environnementale en temps réel) en tenant compte des éventuels masques à la visibilité, et du comportement du piéton confiant.

Ceci conduit en première approche à ce que le véhicule emprunte ce type d'intersection à une vitesse fortement réduite aux abords immédiats de la traversée piétonne.

2.3.4 Analyse des mouvements tournant à gauche sans zone de stockage.

Question de recherche : Comment assurer une bonne gestion simultanée des conflits avec 2 mouvements lors des mouvements de tourne à gauche sans zone de stockage possible devant la traversée sur la voie sécante ?

En mouvement tournant à gauche, Il est identifié 3 tâches pour franchir le carrefour et 2 conflits à gérer

- rejoindre sa position de stockage,

  Le véhicule peut être amené à se stocker au milieu du carrefour : position d'attente pour laisser les voies libres au mouvement prioritaire. Dans ces situations de stockage plusieurs véhicules peuvent être en attente dans des positions non filaires ce qui demande une gestion par le VA des mouvements des véhicules adjacents.

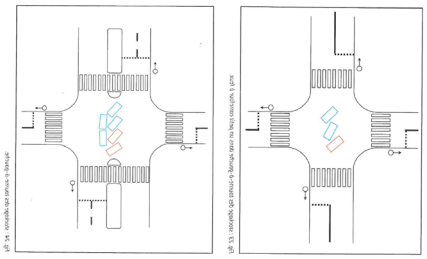


Figure 20 : Problématique du stockage mouvement tourne à gauche (CERTU 2010)

- gérer son interaction avec le mouvement des véhicules en face,

- gérer son interaction avec le flux piéton.

Ces deux interactions doivent être gérées simultanément s'il n'y a pas de possibilité de s'arrêter devant le passage piéton sans empiéter sur la voie d'en face.

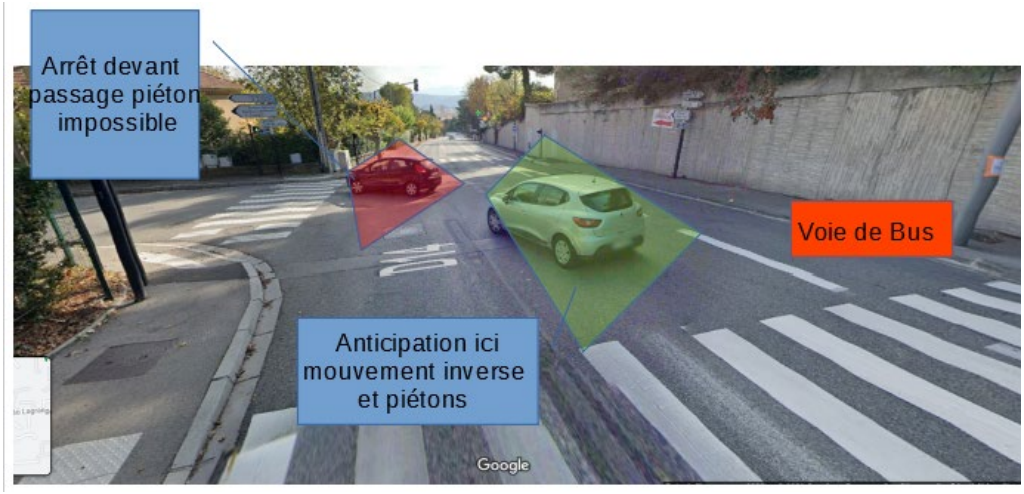


Figure 21 : Mouvement de tourne à gauche : sans possibilité de stockage devant le passage piéton sécant-source Cerema google view

Pour le VA :

- La gestion des interactions avec les flux piétons demande, en l'absence de zone d'arrêt devant le passage piétons, que la trajectoire des piétons soit anticipée tout le long de la manœuvre du véhicule. La détection et les calculs d'anticipation sont donc bien plus complexes car ils doivent tenir compte d'une une zone plus vaste à explorer.
- La gestion du stockage en mouvements tournants doit être traité même s'il est indépendant d'une éventuelle interaction avec des piétons.

Recommandation 12

Identifier les situations nécessitant le traitement simultané de 2 conflits potentiels entre mouvements des véhicules et mouvements des piétons tel que des mouvements de tourne à gauche sans possibilité de stockage.

Évaluer les performances du véhicule autonome dans ces cas pour éviter toutes situations accidentogènes par exemple : Véhicule se retrouvant « coincé » sur les voies de circulation.

Hiérarchiser les décisions dans les situations critiques : préférer que le véhicule stoppe sur les voies de circulation mais évite le conflit avec un usager vulnérable ?

2.4 Mouvement de tourne à droite avec flux piétons important sur la traversée de la voie sécante.

Question de recherche : Comment prendre en compte les usages informels et le respect du code de la route lors des mouvements de tourne à droite avec flux piétons important sur la traversée de la voie sécante ?

Dans les faits, de nombreux carrefours se trouvent parfois avec des flux de piétons et routiers très importants notamment pendant les heures de pointe.

Site1 : **Analyse bord de voie**

Un carrefour parisien avec mouvements tournants à droite et flux piéton très important (2 000 piétons par heure). Il n'y a pas de problème de visibilité réciproque [NB : ce carrefour a été depuis modifié].

Le flux piéton étant très important, il n'est pas possible d'écouler le trafic routier de manière satisfaisante. Ainsi, les véhicules en mouvement tournant à droite, se positionnent sur l'ensemble de la traversée et franchissent le passage piétons dès qu'il y a un créneau même s'il y a encore des piétons sur le passage. Des véhicules mettent le piéton sous pression. Certains piétons s'arrêtent pour laisser passer les véhicules.

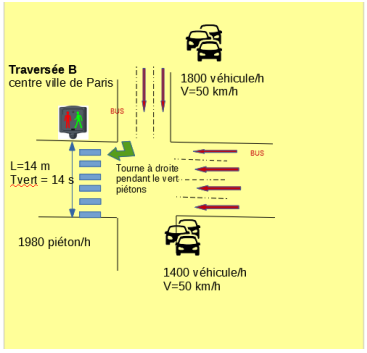


Figure 22: Carrefour avec mouvements tournants à droite et flux piéton très important

Si un VA effectue ce mouvement et qu'il respecte stricto sensu le code de la route, il ne pourra pas franchir le carrefour au vu du flux piéton. Ceci entrainera le blocage de la circulation et de possibles comportements inappropriés comme par exemple le dépassement du véhicule arrêté par d'autres automobilistes.

Retour d'expérience navette autonome aujourd'hui

Des retours d'expériences en Norvège font état de situations risquées lorsque les autres conducteurs dépassent les navettes (Bjørnskau et al, 2019) quand celles-ci roulent lentement. Dans les expérimentations actuelles, en particulier à l'approche des intersections gérées par feux, les navettes franchissent les intersections plus lentement que les autres véhicules (Pokorny et al., 2021).

Des expériences avec des véhicules autonomes aux USA montrent que les chocs arrière sont les collisions les plus fréquentes avec ces types de véhicules (Biever et Al., 2020).

Est-ce que le VA peut déroger à la règle du code de la route pour forcer le passage par exemple ou l'infrastructure doit-elle être repensée dans certains cas où les usages actuels permettent un écoulement de la circulation en congestion que celle-ci soit récurrente ou occasionnelle ?

Recommandation 13

Il est important d'identifier les configurations où l'écoulement des flux de circulation est problématique en mouvements tournants.

Pour résorber ces situations, des recherches pourraient travailler sur les conséquences de deux fonctionnements : soit accepter un fonctionnement en mode dégradé du VA dans ces configurations et situations, soit définir un mode « forcer le passage » par avancement en petits coups réguliers et en réduisant les distances de sécurité du piéton tel que peut le pratiquer un usager conducteur dans un flux piétons dense.

?

2.5 Mouvement de tourne à gauche avec zone de stockage.

Question de recherche : Comment aider le VA à se positionner dans ces carrefours ?

Figure 23 : Exemple de position de stockage dans un carrefour

Recommandation 14

Identifier la position de stockage du VA la plus pertinente pour le véhicule autonome par un marquage au sol détectable dans certains carrefours gérés par feux en mouvements tournants. Ces zones permettront au VA d'attendre dans le carrefour que les autres véhicules coupant sa trajectoire soient passés comme par exemple les véhicules venant en face lorsque le VA tourne à gauche.

2.6 Traversées de piétons aux feux et circulation congestionnée

Pourquoi avoir choisi de faire cette analyse spécifique ?

Le choix a été fait d'étudier cette situation à des carrefours à feux car

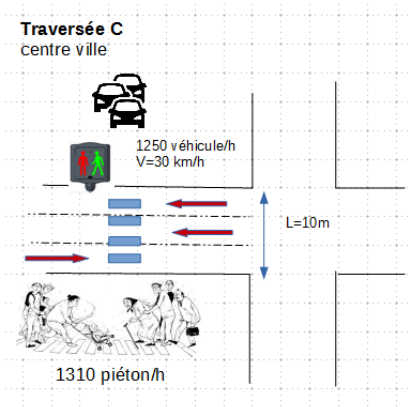
- la visibilité réciproque peut être gênée,
- les priorités réglementaires sont établies mais les comportements des usagers s'éloignent de la règle.

La gestion par feu d'un carrefour établit clairement les règles de priorité. Cependant, en situation de congestion, les usagers piétons traversent souvent entre les véhicules sans tenir compte de la circulation. **Les véhicules**, de leur côté, finissent de franchir le carrefour **même quand le feu n'est plus en leur faveur**. La règle de ne pas s'engager dans un carrefour lorsque celui-ci est encombré est peu respectée en urbain congestionné. La régulation théorique escomptée fonctionne mal en contexte réel de forte densité de trafic

> **Article R412-33 Version en vigueur depuis le 01 mars 2017** Modifié par Décret n°2017-16 du 6 janvier 2017 - art. 11
> Les feux de signalisation verts autorisent le passage des véhicules, sous réserve, dans les intersections, que le conducteur ne s'engage que si son véhicule ne risque pas d'être immobilisé et d'empêcher le passage des autres véhicules circulant sur les voies transversales et qu'un transport exceptionnel mentionné à l'article R. 433-1 ou un de ses véhicules d'accompagnement mentionnés à l'article R. 433-17 ne soit pas engagé sur ces voies. Dans ce dernier cas, la priorité de passage appartient au transport exceptionnel et à ses véhicules d'accompagnement.

Problématique : En résumé, les analyses présentées dans cette partie vont se focaliser sur les questions suivantes : Comment les véhicules autonomes vont anticiper et gérer les traversées piétonnes en congestion ? Gestion des masques à la visibilité créés par les véhicules ? Anticipation et suivi des trajectoires piétonnes ?...

Analyse bord de voie : En centre-ville, une traversée piétonne en section courante avec des flux piétons très importants [NB : Le carrefour a été modifié depuis].



Phasage de la traversée :

Durée rouge de dégagement :10 s

Durée rouge piéton variable : 30 à 120 s

Durée du vert piéton : variable

Figure 24: Description des flux

Pendant 1/3 des cycles à l'heure de pointe, la circulation est bloquée. Lorsque la circulation est bloquée, beaucoup de piétons sont massés de part et d'autre de la traversée. Le départ d'une ou plusieurs personnes entraîne le départ de la quasi-totalité des personnes en attente. Ces effets d'entrainement se rencontrent très fréquemment.

Ces comportements entraînent des situations potentiellement à risque. Il a été observé les situations suivantes :

- les piétons sont masqués par les voitures ou les véhicules de plus grandes dimensions (bus, véhicules utilitaires…). Ils surgissent entre les véhicules. Il n'y a plus de visibilité réciproque entre les véhicules qui redémarrent sur les autres files et les piétons ;
- des conflits avec les deux-roues motorisées qui remontent les files lorsque la circulation est bloquée ;
- les piétons qui se retrouvent « coincés » dans la circulation qui redémarre.

Spécificités du VA pour le suivi des trajectoires des piétons

Dans ces situations, les piétons peuvent être amenés à disparaitre du champ de détection du VA durant la traversée (cf. figure ci-dessous).

Le cerveau humain est capable d'interpoler les trajectoires. « Je voie le piéton 1 commencer sa traversée, je ne le vois plus, je comprends qu'il est derrière le véhicule B. Je m'arrête. Le piéton 2 qui finit sa traversée n'est pas le piéton 1, Je différencie les piétons 1 et 2. je ne redémarre pas ».

Il sera nécessaire que le VA sache suivre la trajectoire d'un piéton mais également différencier les piétons et être capable d'anticiper plusieurs trajectoires individuelles.

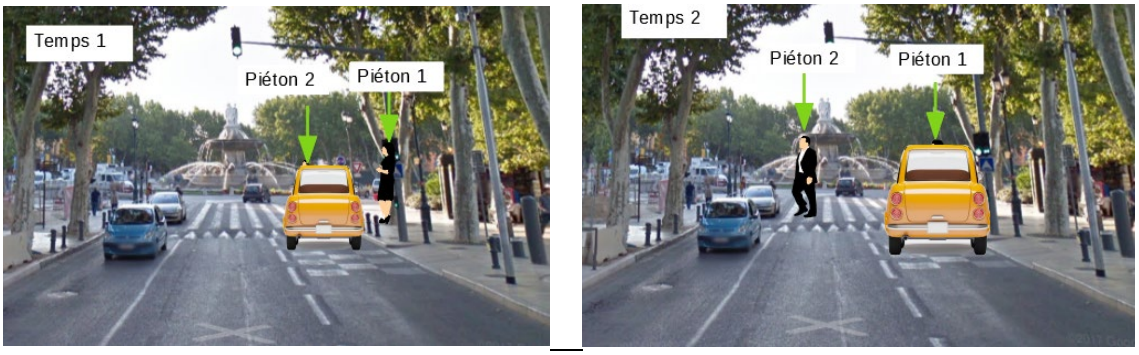


Figure 25: Traversée de piétons temporairement masqués

Recommandation 15

Dans les cas où la traversée des piétons se fait en présence de masques à la visibilité mobile (véhicule en circulation sur les voies adjacentes par exemple), il sera nécessaire que le VA sache suivre la trajectoire d'un piéton mais également différencier les piétons et être capable d'anticiper plusieurs trajectoires individuelles.

Recommandation 16

Si un carrefour à feux est congestionné et s'il y a des piétons aux abords de la traversée, la probabilité de traversées piétonnes est très élevée (presque quasi certaine) quelle que soit la couleur du feu. Le VA devra intégrer cette donnée.

Recommandation 17

S'il y a de nombreux piétons aux abords de la traversée, si un ou plusieurs piétons engage.nt leur traversée, il est probable que la majorité des usagers suive profitant de l'arrêt des véhicules et de l'ouverture d'un créneau de passage. C'est l'effet d'entrainement. Le VA devra intégrer ce type de comportement.

2.7 Cas complexe d'interactions entre multiples usagers / aménagements innovants ou rares

Problématique

Comment le VA réussira-t-il à gérer des situations avec plusieurs conflits successifs et différents types d'usagers sur des espaces très réduits et dans un temps également très court ?

L'aménagement de l'infrastructure évolue : comment « mettre à jour » le VA ?

Certaines configurations d'aménagements sont particulièrement rares. Comment assurer l'exhaustivité de la prise en compte des configurations ?

Illustration par le cas Giratoire « à la hollandaise », giratoire cyclable à ilots intra annulaires

Ce nouveau type de giratoire a été mis en place dans quelques sites en région parisienne. Par exemple au carrefour Pompadour à Créteil.

L'aménagement d'un giratoire à la « hollandaise » vise à faire ralentir les véhicules motorisés et à sécuriser la traversée des piétons et des cyclistes, il permet de réaliser des voies distinctes pour chaque mode. Les véhicules motorisés ralentissent donc pour traverser ces voies. Ils doivent d'abord se soucier des piétons et des vélos avant d'arriver sur l'anneau du giratoire. En sortant du giratoire, les véhicules doivent également se soucier des vélos puis des piétons.

Pour un véhicule autonome, ce type d'aménagement risque d'être complexe à appréhender. En effet, il va se heurter à différents usagers avec différentes priorités à gérer dont certaines nouvelles (sortie de giratoire).

Dans le sens entrant il doit laisser la priorité

- dans un premier temps aux piétons
- dans un deuxième temps aux cyclistes
- puis aux véhicules sur le giratoire

Figure 26: Entrée dans le giratoire cyclable à ilots intra annulaires

Dans le sens sortant il doit à nouveau laisser la priorité

- aux cyclistes (situation pas habituelle)

- puis aux piétons

Figure 27: Sortie du giratoire cyclable à ilots intra annulaires

Le véhicule aura donc beaucoup de conflits à gérer, avec différents types d'usagers que ce soit en entrée ou en sortie de giratoire sur des espaces très réduits et dans un temps également très court. Une voie réservée aux TC peut également être présente sur ce type d'aménagement en amont du carrefour avec un arrêt éventuel, ce qui ajoute une nouvelle priorité à gérer.

Recommandation 18

Identifier les configurations complexes : nombre de conflits, types d'usagers, temps de réaction très court ? du VA nécessaire pouvant s'approcher des limites de traitement du VA.

Recommandation 19

Prévoir une mise en conformité, des mises à jour du VA en fonction des modifications du code de la route mais aussi de l'apparition de nouveaux aménagements et/ou de nouveaux usages dans l'avenir.

Recommandation 20

Définir l'exhaustivité des configurations de conduite rencontrées par un VA semble difficile.

Il est peut-être nécessaire de définir la liste des scénarios gérables par le VA et en cas de situations non reconnues par le VA, d'alerter le conducteur pour repasser en manuel.

3 Analyse des comportements des cyclistes

Question de recherche : Quelles sont les actions que devra adopter le VA en réaction aux comportements des cyclistes ?

Les travaux menés dans le projet Surca (livrables L2.8 et L6.1) ont conduit à identifier les situations d'interactions entre Vélo et VA se produisant en intersection comme des scénarios d'intérêt méritant d'être étudiés dans le cadre du projet.

Les carrefours à feux constituent des intersections au fonctionnement complexe (voir livrable 2.1) et posent de nombreuses questions sur les actions que devra adopter le VA en réaction aux comportements des autres usagers dont les cyclistes.

Ces derniers sont de plus en nombreux à circuler en ville. Ils peuvent bénéficier d'aménagements dédiés qui les favorisent et améliorent leur sécurité (cédez le passage cycliste au feux, sas vélo…). Au regard de ces évolutions récentes, il existe peu de connaissance, du moins en France, sur les comportements observables des cyclistes et des véhicules légers (VL) lors des manœuvres qu'ils effectuent au niveau d'un carrefour géré par des feux de circulation avec ou sans présence de cédez-le-passage cycliste au feu rouge.

Le Cerema a donc proposé d'investiguer ce sujet visant à proposer des recommandations d'aides à la décision, pour le VA, d'engager certaines manœuvres en intersection en présence de cyclistes pour différents scénarios d'interaction. Les scénarios suivants étaient notamment visés (cycliste en rouge) :

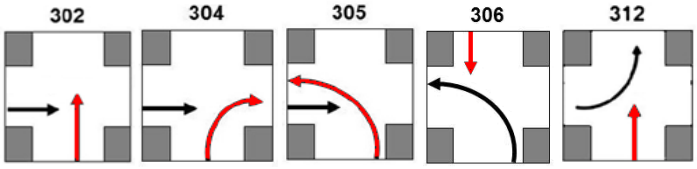


Figure 28: Pictogrammes pour l'analyse des interactions VA/cyclistes

- 302 : 2 véhicules allant tout droit (ou on ne sait pas où vont le VA et le vélo) et provenant de directions perpendiculaires.
- 304 : véhicules provenant de directions perpendiculaires, le VA venant de droite et allant tout droit et le vélo tournant à droite.
- 305 : 2 véhicules provenant de directions perpendiculaires, dont le VA arrivant de gauche et allant tout droit et le vélo tournant à gauche.
- 306 : 2 véhicules provenant de directions opposées, dont le vélo allant tout droit et le VA tournant à gauche.
- 312 : 2 véhicules provenant de directions perpendiculaires, dont le vélo arrivant de droite et allant tout droit et le VA tournant à gauche.

Les analyses décrites dans cette section s'appuient sur des observations bord de voie mises en œuvre dans le cadre d'une expérimentation d'évaluation de dispositifs de cédez-le-passage cycliste au feu rouge dans la Métropole de Lyon. L'expérimentation consistait notamment à observer les comportements de cyclistes et d'usagers d'EDPM (Engin de Déplacement Personnel Motorisé) avant et après la mise en place de panonceaux M12 – ou d'extension des directions autorisées. Il s'agissait également d'évaluer la compréhension de ces signaux par les usagers. Ces observations ont été réalisées sur 10 carrefours à feux dont 6 dans lesquels ne circulaient aucune ligne de tramway.

L'étude présentée porte uniquement sur ces 6 carrefours sans plateformes tramway et offre un focus plus détaillé sur deux d'entre eux.

3.1 Descriptions des données utilisées et de leurs conditions d'acquisition

3.1.1 Les carrefours étudiés

Les carrefours retenus ont été sélectionnés sur la base de multiples critères et avec le souci d'être représentatifs des configurations existantes sur le territoire du Grand Lyon. Tous ces carrefours sont localisés en milieu urbain dense. Ils sont en croix ou en T, situés sur des axes principaux ou secondaires, disposent ou non de couloirs BUS et certaines de leurs branches peuvent être en sens unique. Enfin les flux de piétons les traversant sont très variables d'un aménagement à l'autre mais également au cours d'une même journée. Les deux sites pour lesquels des analyses spécifiques sont proposées sont décrits au 3.3.

3.1.2 Les conditions d'observations

Les observations sont issues de caméras montées spécifiquement sur des mâts pour les besoins de l'expérimentation. Elles sont orientées de manière à faciliter l'observation de certains mouvements des cyclistes dont l'étude était à privilégier. Certains carrefours sont filmés selon différentes positions de caméra pour étudier différentes directions d'arrivée sur le carrefour portant ainsi le nombre de postes d'observation différents à huit.

Deux périodes d'observation ont été retenues : avant la mise en place des équipements (état 0) puis juste après la mise en place (état 1), et 5mois après la mise en place (état 2[1])-entre septembre 2020 et octobre 2021.Chaque période d'enregistrement s'étendait sur une seule journée (un mardi ou un jeudi) entre 7h30 à 10h30 puis de 16h30 à 19h30.

La qualité des vidéos était volontairement dégradée afin d'empêcher toute possibilité d'identification des usagers circulant sur l'espace public (visage et plaque d'immatriculation). Enfin, pour diverses raisons telles que des déplacements de mobiliers urbains supportant les caméras, les emplacements des caméras entre les périodes ont été modifiés.

3.1.3 Codage et exploration des données

Faute de logiciel adapté à un dépouillement automatique des vidéos, les dépouillements ont entièrement été réalisés manuellement à l'aide de logiciels de visualisation ou de montage vidéo.

Pour l'analyse globale (cf. 3.2), des grilles de codage similaires ont été définies pour l'ensemble des sites retenus. Il s'agissait notamment de coder les directions empruntées par les cyclistes, de capter certains comportements ou interactions entre les cyclistes et les autres usagers de la route notamment au regard de la couleur du feu tricolore qui s'imposait au cycliste. Les grilles ont été renseignées par plusieurs codeurs. Le codage de certains champs s'est avéré trop compliqué en raison des conditions de prise de vue ou revêtait un caractère trop interprétatif avec une forte variabilité inter-codeur. En conséquence ces champs sont exclus de l'analyse.

[1] En cours de dépouillement au moment de la rédaction de ce livrable.

3.2 Analyse Globale

3.2.1 Effectifs

Les enregistrements ont permis de recueillir des données sur le comportement d'un nombre important de cyclistes et usagers d'EDPM :

- 5501 à l'état 0
- 5796 à l'état 1

Environ un tiers (≃ 1 800) d'entre eux arrivent dans le carrefour alors que le feu est rouge pour eux.

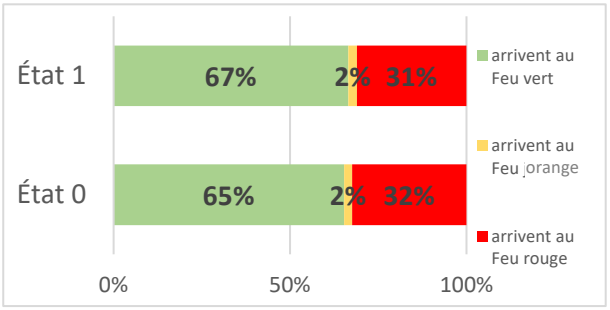


Figure 29 – Répartition des cyclistes selon la couleur du feu à leur arrivée

3.2.2 Franchissement des feux tricolore au rouge

Cette section se focalise sur les mouvements qui n'étaient pas autorisés lorsque feu était rouge à l'état 0 et qui le sont devenus (en respectant normalement les règles de priorité afférentes) à l'état 1 après la mise en œuvre des panonceaux M12.

À l'état 0 alors que le franchissement du rouge était réglementairement interdit pour les mouvements concernés, environ 97% des usagers observés ne respectaient pas cette règle de circulation : ce taux de non-respect variant entre 92 et 100% selon les sites.

Étonnamment après la mise en place des signaux M12, alors que le franchissement du rouge était autorisé pour ces mouvements, les usagers franchissent moins fréquemment le feu au rouge (93 % vs. 97 %).

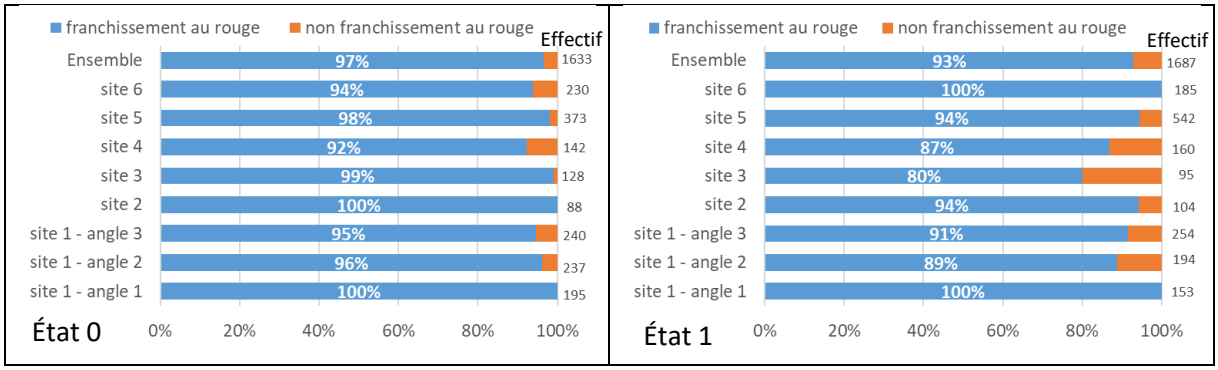


Figure 30 – Taux de franchissement au rouge des cyclistes pour les directions qui n'étaient pas autorisées à l'état 0 (à gauche) et le sont devenues à l'état 1 (à droite).

En complément de ces analyses, celles menées sur les carrefours avec plateforme tramway tendent à montrer que les taux de franchissement au rouge y sont moins élevés. Il semblerait que ce taux tend à diminuer avec la largeur et la complexité des carrefours.

3.3 Analyses spécifiques sur deux carrefours

3.3.1 Carrefour Saxe / Rabelais

3.3.1.1 Description du site et des modalités de recueil des données

Les enregistrements ont été réalisés à l'état 0 en septembre 2020 à l'angle de l'avenue de Saxe et de la rue Rabelais. Les deux-roues observés sont les cyclistes et les EDPM qui circulent sur l'avenue de Saxe du nord vers le sud sur la voie bus (ouverte au cycliste) et ceci quelques soit les directions prises par les cyclistes. Il n'existe qu'une voie de circulation sur l'avenue de saxe dans ce sens de circulation. Dans l'autre sens l'avenue est constituée de deux voies de circulation dont l'une est réservée aux bus.

Le tronçon Ouest de la Rue de Rabelais est en sens unique pour tous les véhicules. Dans le sens Est-Ouest, cette rue est uniquement empruntée par des véhicules de pompier et les cyclistes et assimilés qui peuvent emprunter le double-sens cyclable.

Les cyclistes / EDPM sont autorisés à aller tout droit ou à tourner à droite mais ils ne sont pas autorisés à tourner à gauche. Le feu étant muni d'un panonceau M12 ils sont autorisés à tourner à droite même lorsque le feu est rouge sous réserve de céder le passage aux autres usager prioritaires.

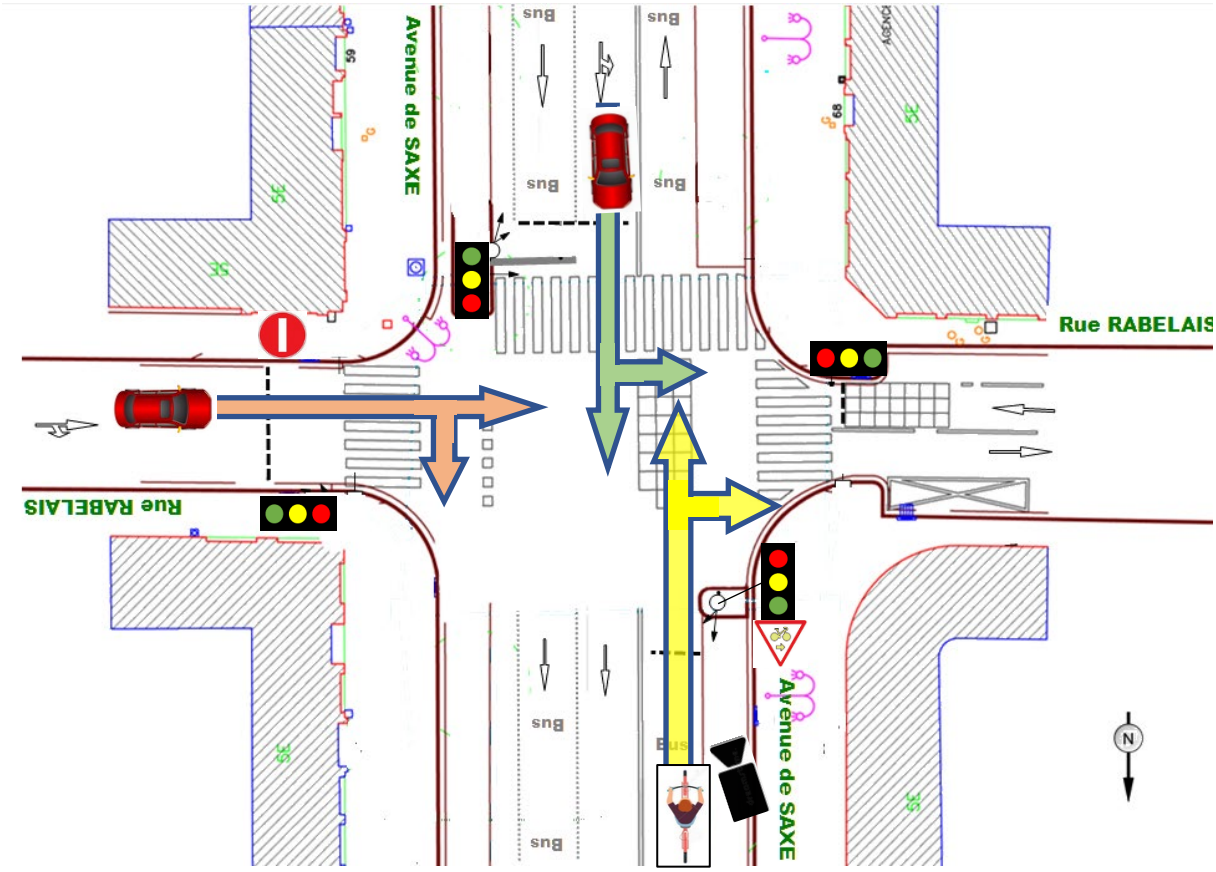


Figure 31 : Vue schématique du carrefour Avenue de Saxe / Rue de Rabelais

La caméra est positionnée quelques mètres en amont du feu tricolore et offre une vision, assez large, sur la totalité de l'intersection. Les images ont été analysées à l'aide d'un logiciel de montage vidéo professionnel. Ce logiciel a permis la superposition de repères virtuels et ainsi d'estimer la vitesse des cyclistes / EDPM entre différents repères.

Le dépouillement des séquences vidéo s'est fait à l'aide d'une grille de codage spécifique qui a évolué au fil du temps en fonction des comportements observés. Les modalités détaillées de certains champs ont parfois également été agrégées afin d'améliorer la robustesse des résultats.

Figure 32 : Prise de vue de la caméra avec exemple de repères superposés pour estimer la vitesse des cyclistes et des EDPM en amont du feu tricolore.

Le codage des 6 heures d'enregistrement a conduit au codage exploitable de plus de 500 cyclistes et usagers d'engins de déplacements motorisés. Pour la suite des exploitations n'ont été retenus que :

- Les usagers de vélos et de trottinettes électriques circulant initialement sur la voie BUS/cycliste en amont du feu. D'autres types d'engins de déplacement tels que skates électriques, gyropodes, trottinettes non motorisées ont également été identifiés mais ne sont pas inclus dans cette analyse ;
- Les 393 vélos et 89 EDPM restants qui traversent le carrefour tout droit.

3.3.1.2 Comportement en amont du feu

Comme l'indique la figure 33, la part d'usagers arrivant[2] alors que le feu est rouge ou vert est relativement similaire.

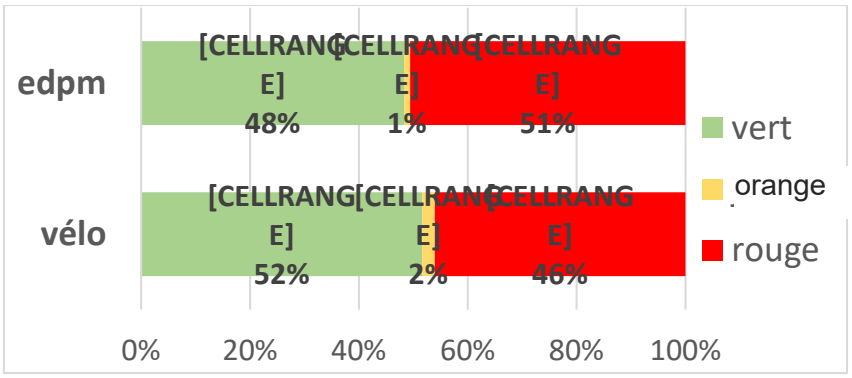


Figure 33 : Nombre et proportion de vélos et d'EDPM en fonction de la couleur du feu lors de leur arrivée sur le carrefour.

[2] Le choix a été fait de considérer la couleur du feu au moment où l'usager commence à apparaitre dans l'image soit environ 5/6 m en amont du feu.

Parmi les 181 vélos qui arrivent au rouge, seuls 17 (9 %) s'arrêtent avant le feu rouge. Dix d'entre eux repartent avant que le feu ne passe au vert. En ce qui concerne les EDPM, seuls 3 (7 %) d'entre eux s'arrêtent avant le feu rouge. Ils repartent tous avant que le feu ne passe au vert.

Il apparaît dès lors pertinent de s'intéresser à la manière dont les usagers se comportent alors qu'ils décident, délibérément, de franchir le feu au rouge. La figure 34 permet de disposer d'un aperçu des vitesses[3] , en amont du feu, des vélos et des EDPM en fonction de la couleur feu en excluant ceux qui se sont arrêtés avant le feu quand celui-ci est rouge.

Les données indiquent clairement que les vitesses d'approche sont environ 1,4 fois moins élevées pour un franchissement au rouge par rapport au vert. Sans atteindre les niveaux observés au vert, certains usagers pratiquent néanmoins des vitesses relativement importantes alors le feu est rouge : au-delà de 25 km/h pour les cyclistes et jusqu'à 34 km/h pour les EDPM.

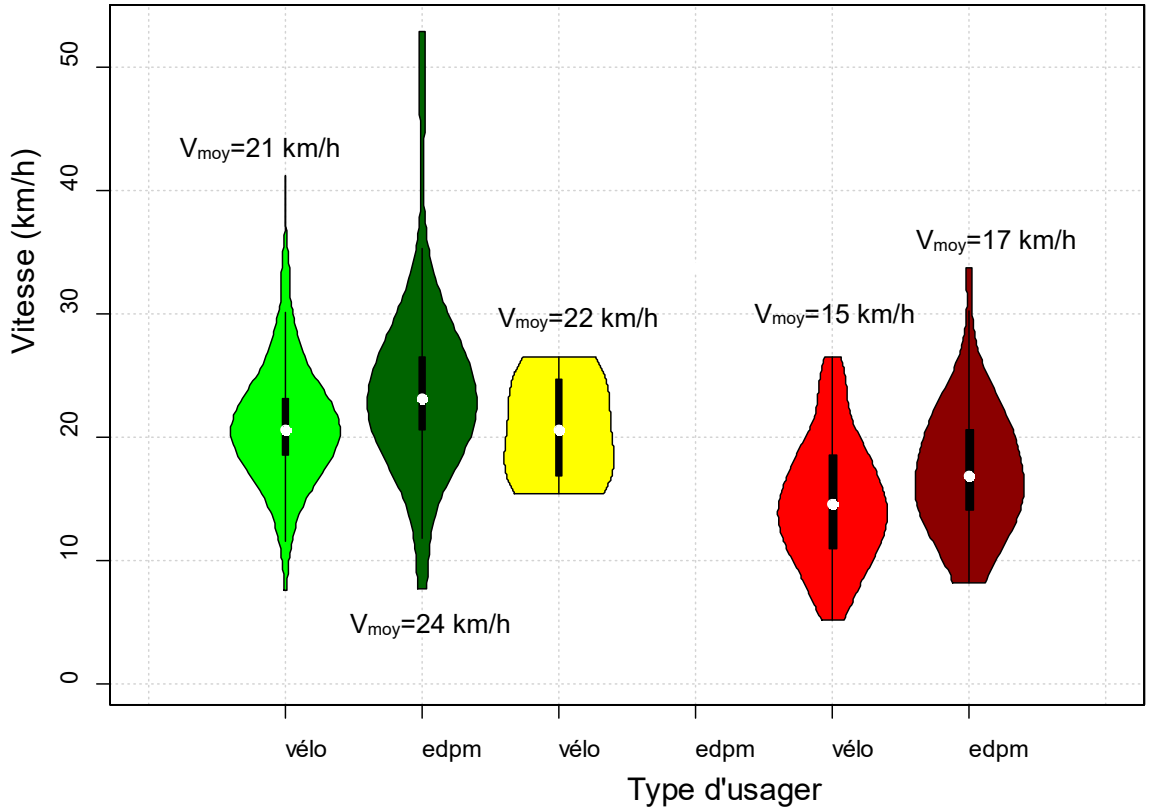


Figure 34 –Diagramme en violon des vitesses pratiquées par les vélos et les EDPM en amont du feu selon sa couleur à leur arrivée. Sont exclus ceux qui se sont arrêtés au feu rouge.

Afin de mieux appréhender les facteurs susceptibles d'impacter le choix des vitesses des usagers de vélos et EDPM, les données ont été modélisées par une régression linéaire multiple en utilisant 3 variables explicatives relatives à la présence et au mouvement des autres véhicules sur la sécante (mvt_veh_sec) et sur la voie opposée (mvt_veh_face) et d'un indicateur des conditions de visibilité géométriques de la sécante du point vue du vélo / EDPM. Ces indicateurs reflètent la situation au moment où le vélo/EDPM apparaît sur l'image.

[3] La vitesse est estimée en rapportant la distance orthogonale entre les lignes rouge et verte représentées sur la figure 32 rapportée à la différence de temps entre le moment ou l'arrière de leur véhicule a complétement franchi ces lignes. Sont exclus les usagers dont le passage sur l'un de ces repères est masqué par un autre usager.

Les résultats de ces régressions selon que le feu est rouge ou vert sont respectivement présentés sur les figures 35 et 36. Ces résultats suggèrent que :

- Lorsque le feu est rouge les vélo/EDPM ont tendance à modérer leur vitesse d'approche quand des véhicules arrivant sur la sécante sont en train de traverser ou de tourner. Ils ont par contre tendance à rouler plus vite lorsque les véhicules venant d'en face sont en train de traverser dans l'intersection ; situations qui ne devraient pas exister si ces derniers avaient respecté le code de la route ;
- Lorsque le feu est vert seule la présence de véhicules venant d'en face et à l'arrêt au feu semble avoir un effet sur la vitesse en la modérant. Un examen des séquences correspondantes montre qu'il s'agit de situations pour lesquelles le feu vient juste de passer au vert ;
- L'absence de visibilité ou des conditions dégradées de visibilité en lien avec la présence de véhicules dans l'intersection ne semblent pas avoir d'effet significatif sur la vitesse mais cela peut également être lié à la difficulté de caractériser correctement cette variable.

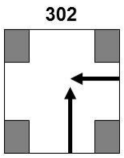
Variable		N	Estimate	p
mvt_veh_face	aucun	19	Reference	
	arrêt feu	116	0.05 (-2.15, 2.24)	0.97
	arrêt inter	38	2.93 (-0.64, 6.50)	0.11
	tournant	2	-3.65 (-10.57, 3.26)	0.30
	traversant	18	3.30 (0.10, 6.49)	0.04
mvt_veh_sec	aucun	121	Reference	
	arrêt feu	15	2.16 (-0.68, 5.00)	0.14
	bloqué	3	-3.72 (-9.44, 2.01)	0.20
	inconnu	7	-2.79 (-6.66, 1.07)	0.16
	tournant	17	-2.87 (-5.17, -0.58)	0.01
	traversant	30	-5.50 (-7.34, -3.65)	<0.001
visib_sec	oui	153	Reference	
	altérée	23	-0.63 (-3.94, 2.68)	0.71
	non	17	-1.20 (-4.15, 1.76)	0.42

Figure 35- Résultats de la régression linéaire multiple pour les vélos et EDPM arrivant au rouge et ne s'arrêtant pas avant le feu (en vert les modalités qui ont un effet un modérateur sur la vitesse – en rouge ceux qui accroissent la vitesse)

Variable		N	Estimate	p
mvt_veh_face	aucun	19	Reference	
	arrêt feu	9	-4.62 (-9.08, -0.16)	0.04
	arrêt inter	30	0.75 (-3.52, 5.01)	0.73
	tournant	14	-1.83 (-5.69, 2.02)	0.35
	traversant	175	-2.22 (-4.89, 0.45)	0.10
mvt_veh_sec	aucun	182	Reference	
	arrêt feu	53	0.05 (-1.66, 1.77)	0.95
	bloqué	1	-1.87 (-12.99, 9.25)	0.74
	inconnu	5	0.96 (-5.10, 7.02)	0.76
	tournant	4	1.24 (-4.58, 7.07)	0.67
	traversant	2	-0.57 (-8.73, 7.58)	0.89
visib_sec	oui	202	Reference	
	altérée	35	-0.38 (-3.14, 2.38)	0.78
	non	10	-0.01 (-4.84, 4.82)	1.00

Figure 36- Résultats de la régression linéaire multiple pour les vélos et EDPM arrivant au vert (en vert les modalités qui ont un effet un modérateur sur la vitesse)

3.3.1.3 Scénarios 302 : Intersection – véhicules allant tout droit et provenant de directions perpendiculaires



Cette partie se limitera à l'étude des situations pour lesquelles le vélo/EDPM traverse le carrefour au rouge alors qu'au moins un VL arrive sur la sécante. Les comportements observés sont néanmoins étudiés au regard des comportements adoptés par les vélos / EDPM en l'absence de véhicule provenant de la sécante. Plusieurs situations types se dégagent des analyses.

Situation 1 : Vélo traversant alors que l'intersection est dégagée

Dans cette situation le vélo/EDPM dispose toujours d'une bonne visibilité sur la sécante.

Sans véhicule arrivant sur la sécante

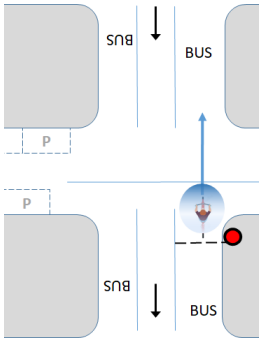


Figure 37 : Vélo traversant alors que l'intersection est dégagée sans véhicule sur la sécante

Globalement les vélos ont tendance à franchir le feu et les premiers mètres qui suivent en roue libre. Ils recommencent à pédaler une fois qu'ils ont acquis la certitude qu'il n'y a pas de véhicule arrivant sur la sécante ou qu'il est suffisamment loin pour leur laisser le temps de traverser.
Les vitesses sur la zone en amont du feu et le reste de la traversée sont assez similaires.

Avec véhicule arrivant sur la sécante

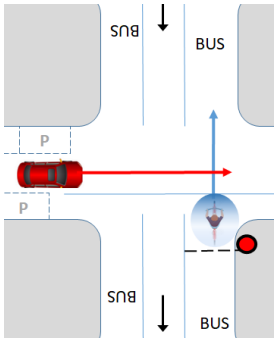


Figure 38 : Vélo traversant alors que l'intersection est dégagée avec véhicule sur la sécante

Dans cette situation le cycliste va franchir le feu à allure réduite, s'avancer dans le carrefour en ralentissant pour laisser passer le véhicule.

- Si son ajustement de vitesse est suffisant il ne s'arrête pas et commence à réaccélérer avant que le véhicule ne soit totalement passé devant lui.
- Si l'ajustement de vitesse est insuffisant il s'arrête soit en posant le pied à terre soit par équilibrisme. Cet arrêt s'effectue en se laissant une certaine marge de sécurité longitudinale vis-à-vis de la trajectoire anticipée de passage du VL.

Situation 2 : Intersection occupée avec créneau de passage

Dans cette configuration des véhicules provenant de la direction opposée aux vélos / EDPM sont à l'arrêt dans l'intersection et perturbent la circulation des véhicules arrivant de la sécante. Il existe toutefois un espace entre deux véhicules bloqués permettant le passage des véhicules de la sécante.

Dans ces deux configurations le comportement des cyclistes va être très dépendant des conditions de visibilité qui lui sont offertes alors qu'il entame la traversée du carrefour.

Sans véhicule arrivant sur la sécante

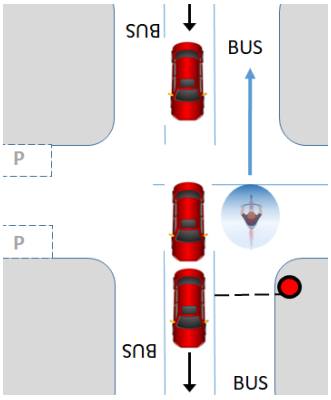


Figure 39 : Vélo traversant alors que l'intersection est occupée avec créneau de passage sans véhicule sur la sécante

Avec véhicule arrivant sur la sécante

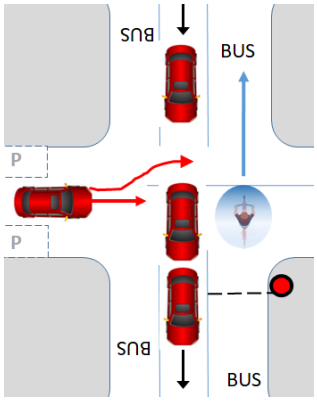


Figure 40 : Vélo traversant alors que l'intersection est occupée avec créneau de passage avec véhicule sur la sécante

Bonne visibilité

Les cyclistes / EDPM ont tendance à franchir le carrefour à allure constante.

Deux types de comportements sont observés :
Soit le vélo/EDPM entame le début de la traversée sans vraiment ralentir et il accélère assez fortement une fois remontée la file de véhicules arrêtés dans l'intersection (ligne bleue) ;
Soit il ralentit en franchissant le feu rouge et essaye de remonter la file le plus loin possible en régulant sa vitesse (afin de ne pas être dans l'obligation de poser son pied à terre vraisemblablement). Il commence en général à réaccéler avant que le véhicule de la sécante ne soit totalement passé.

Absence de visibilité (liée à la présence d'un véhicule de gabarit imposant)

Les cas observés concernent des epdm qui franchissent l'intersection à allure relativement constante. Ils ajustent toutefois leur trajectoire en s'écartant sur la droite (cf. figure 41) afin, vraisemblablement, de se laisser plus de temps pour détecter un véhicule arrivant sur la sécante et réagir le cas échéant.

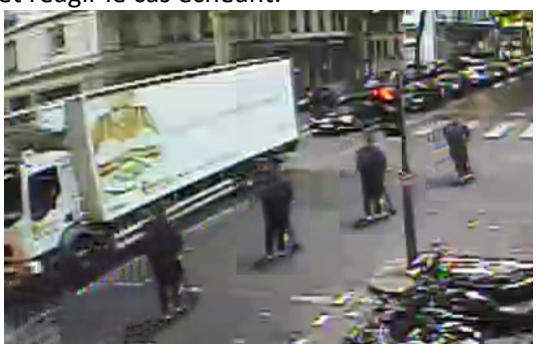


Figure 41-Positions successives d'un EDPM.

Après avoir franchi le feu, les cyclistes / EDPM ralentissent fortement en remontant la file de véhicules arrêtés puis s'arrêtent un peu avant la fin de la file (ligne bleue) en posant le pied à terre. Une fois le véhicule passé pour repartir :

- Soit, ils avancent par petits à coup très prudents afin de regagner un peu de la co-visibilité avec un éventuel nouvel véhicule arrivant de la sécante ;
- Soit, ils attendent un assez long moment (que le feu piéton sur la sécante passe au rouge ?) avant de finir sa traversée.

3.3.1.3.1 Situation 3 : Intersection occupée sans créneau de passage

Dans cette configuration la progression des véhicules de la sécante est complétement bloquée par une file ininterrompue de véhicules à l'arrêt dans l'intersection.

Sans véhicule arrivant/présent sur la sécante

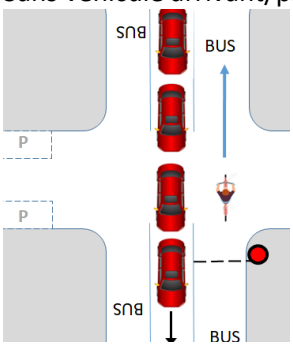


Figure 42 : Vélo traversant alors que l'intersection est occupée sans créneau de passage sans véhicule sur la sécante

Avec véhicule arrivant/présent sur la sécante

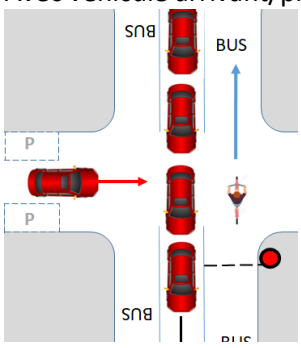


Figure 43 : Vélo traversant alors que l'intersection est occupée sans créneau de passage avec véhicule sur la sécante

À l'exception de deux cas, les vélo/EDPM bénéficiaient d'une visibilité relativement bonne sur le véhicule provenant de la sécante.

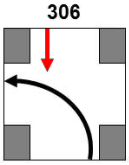
Bonne visibilité

Les vélos/EDPM franchissent le feu et le carrefour à une allure assez soutenue. Selon les cas certains ralentissent légèrement (au cas où un véhicule parviendrait à passer) ; d'autres accélèrent (se sentant protéger par l'écran que constitue cette file de véhicule).	Les vélos/EDPM franchissent le feu à une allure assez soutenue. Ils ralentissent légèrement lors de la traversée du carrefour.

Absence de visibilité (liée à la présence d'un véhicule de gabarit imposant à l'arrêt dans l'intersection)

L'EDPM franchit le feu et le carrefour à allure constante.	Le cycliste franchit très doucement le feu et le carrefour. Lors de la traversée il se déporte légèrement vers la droite

3.3.1.4 Scénarios 306 : Intersection – véhicules provenant de directions opposées, dont l'un allant tout droit et l'autre tournant à gauche



Ce scénario est observé quand le feu est au vert pour les vélos / EDPM (en rouge sur pictogramme de droite) et les véhicules venant d'en face. Globalement les interactions entre vélos / EDPM et VL semblent assez limitées ou tout du moins se manifestent par des modifications de trajectoires peu marquées de la part des impliqués. Les vélos / EDPM (prioritaires dans cette configuration) traversent le carrefour à une vitesse assez élevée et relativement constante avec des ajustements de faibles ampleurs en amont du VL s'apprêtant à tourner : certains semblent marquer un très léger ralentissement accompagné ou non d'un léger déport sur la droite ; d'autres ont plutôt tendance à accélérer. Enfin parfois, certains cyclistes semblent un peu hésiter à adopter l'une ou l'autre de ces attitudes.

Les véhicules s'apprêtant à tourner semblent adapter leurs manœuvres à la vitesse et à la position du vélo / EDPM. La plupart sont immobiles et attendent que les vélos / EDPM soient complétement passés pour entamer leur manouvre. Certains entament ou poursuivent (très doucement) leur

manœuvre de tourne à gauche avant le passage du cycliste. Ce comportement tend à faire accélérer le cycliste et le faire se déporter sur la droite afin de garder une marge de sécurité suffisante.

3.3.2 Carrefour Gryphe / Chevreuil

3.3.2.1 Description du site et des modalités de recueil des données

Les enregistrements ont été réalisés à l'état 1 en juin 2021 à l'angle des rues Chevreuil et Sébastien Gryphe. Les cyclistes observés sont les cyclistes et les EDPM qui circulent sur la rue Sébastien Gryphe vers le nord-est et ceci quelques soient leurs mouvements dans le carrefour.

À cette date et avec l'installation d'un panonceau M12 les cyclistes / EDPM sont autorisés à franchir le feu au rouge dans toutes les directions sous réserve de céder le passage aux autres usagers prioritaires.

Les deux rues de l'intersection sont équipées d'un double sens cyclable. Pour leur part, les véhicules motorisés non assimilés à des cycles sont uniquement autorisés à circuler sur la rue Chevreuil d'ouest en est et sur la rue Sébastien Gryphe du sud vers le nord (et à tourner de Chevreuil vers Gryphe en respectant ces sens de circulation).

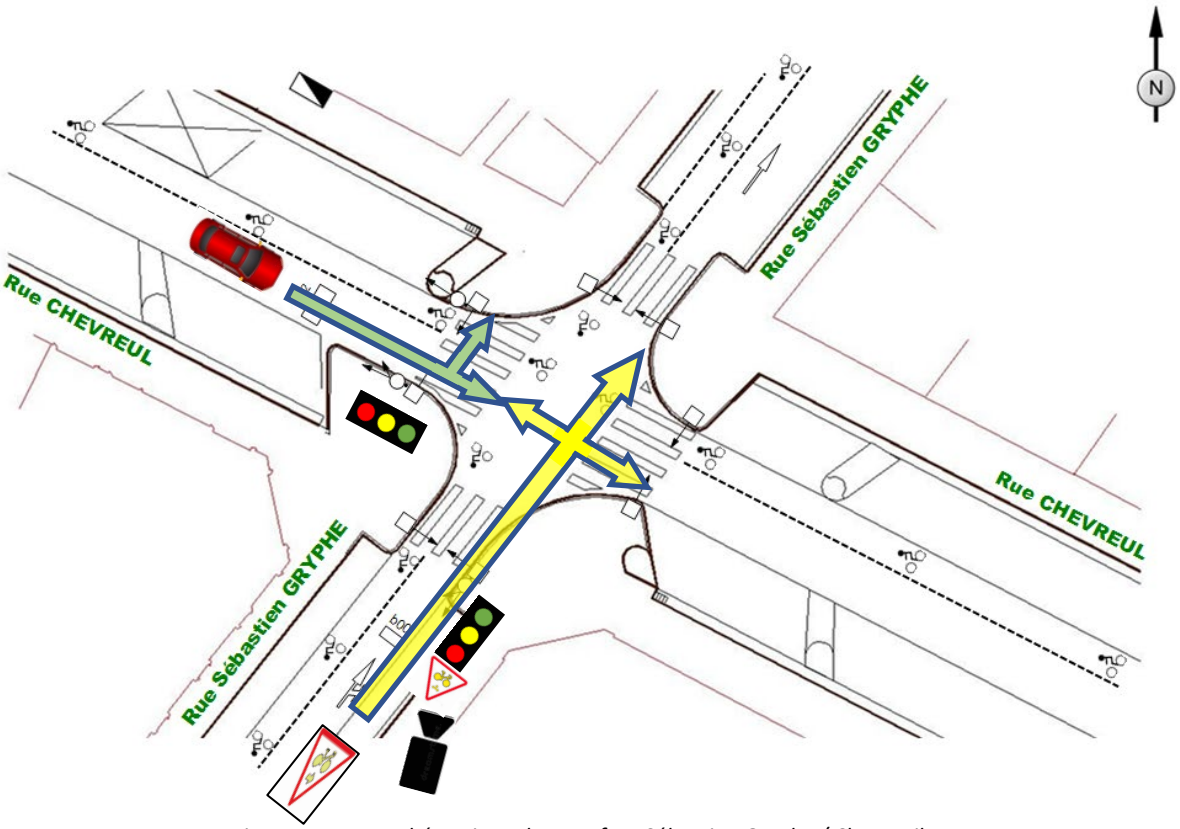


Figure 44 : Vue schématique du carrefour Sébastien Gryphe / Chevreuil.

Comme pour le carrefour précédent, la caméra est positionnée quelques mètres en amont du feu tricolore et offre une vision, assez large sur la totalité de l'intersection (figure 45). Comme précédemment, les images sont analysées à l'aide d'un logiciel de montage vidéo professionnel. Ce logiciel a permis la superposition de repères virtuels et ainsi d'estimer la vitesse des cyclistes / EDPM entre différents repères.

Le dépouillement des 6 heures de séquences vidéo s'est fait à l'aide d'une grille de codage spécifique qui a évolué au fil du temps en fonction des comportements observés. Les modalités détaillées de certains champs ont parfois également été agrégés afin d'améliorer la robustesse des résultats.

Figure 45 : Prise de vue de la caméra

Pour la suite des exploitations n'ont été retenus que les 163 cyclistes et les 25 usagers de trottinettes électriques circulant initialement en amont du feu. D'autres types d'engins de déplacement ont également été identifiés mais ne sont pas inclus dans cette analyse.

Sur ces 188 usagers,17 ont tourné à gauche, 49 à droite et 122 sont allés tout droit.

3.3.2.2 Comportement en amont du feu : Franchissement et vitesse

Franchissement du feu

Les vélos observés sont davantage arrivés alors que le feu était rouge au contraire des conducteurs d'EPM qui sont arrivés légèrement plus souvent au vert.

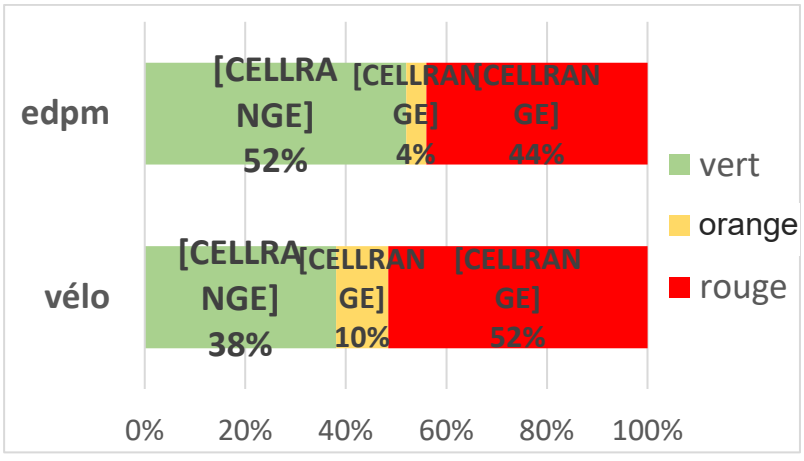


Figure 46 : Nombre et proportion de vélos et d'EDPM en fonction de la couleur du feu lors de leur arrivée sur le carrefour.

Parmi les 84 vélos qui arrivent au rouge, seuls 20 (24 %) s'arrêtent avant le feu rouge et 5 d'entre eux repartent avant que le feu ne passe au vert. En ce qui concerne les EDPM, seuls 2 (18 %) d'entre eux s'arrêtent avant le feu rouge. Ils repartent tous après le passage du feu au vert.

Le taux de franchissement au rouge apparaît donc moins important que celui observé sur le carrefour précédent. Il s'agit effectivement du site qui donne lieu au plus faible taux de franchissement au rouge parmi les 6 carrefours observés.

Vitesse en amont du feu

La figure 47 permet de disposer d'un aperçu des vitesses[4] , en amont du feu, des vélos et des EDPM en fonction de la couleur du feu en excluant ceux qui se sont arrêtés avant le feu quand celui-ci est rouge.

Les données indiquent que les vitesses d'approche sont environ 1,3 fois moins élevées pour un franchissement au rouge par rapport au vert pour les vélos. Comme sur le carrefour précédent, les EDPM circulent à des vitesses plus élevées que les cyclistes.

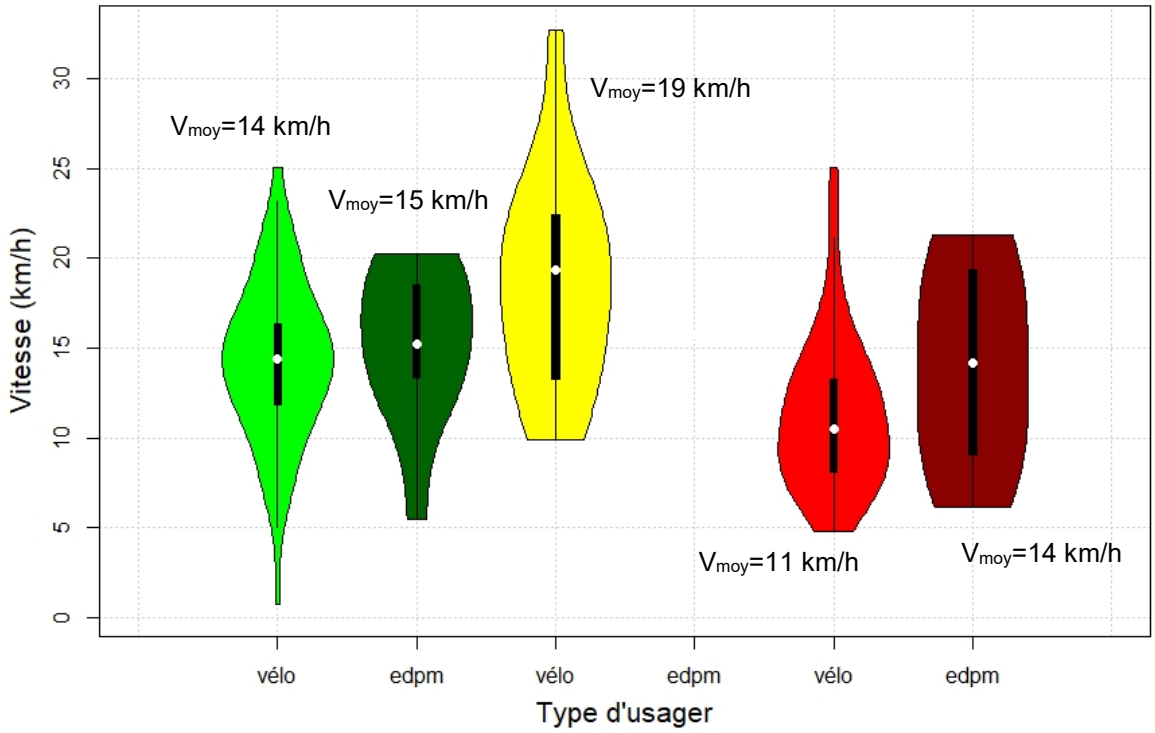


Figure 47 : Diagramme en violon des vitesses pratiquées par les vélos et les EDPM en amont du feu selon sa couleur à leur arrivée en excluant ceux qui se sont arrêtés au feu rouge (l'EDPM arrivant au feu orange n'est pas représenté).

L'analyse mono-variée des vitesses d'approche en fonction de la direction empruntée par les vélos / EDPM ne montre pas de différences significatives selon les mouvements (figure 48).

[4] La vitesse est estimée en rapportant la distance orthogonale entre la fin de la ligne d'effet des feu et le début de passage piéton rapportée à la différence de temps entre le moment ou l'arrière de leur véhicule a complétement franchi ces lignes. Sont exclus les usagers dont le passage sur l'un de ces repères est masqué par un autre usager.

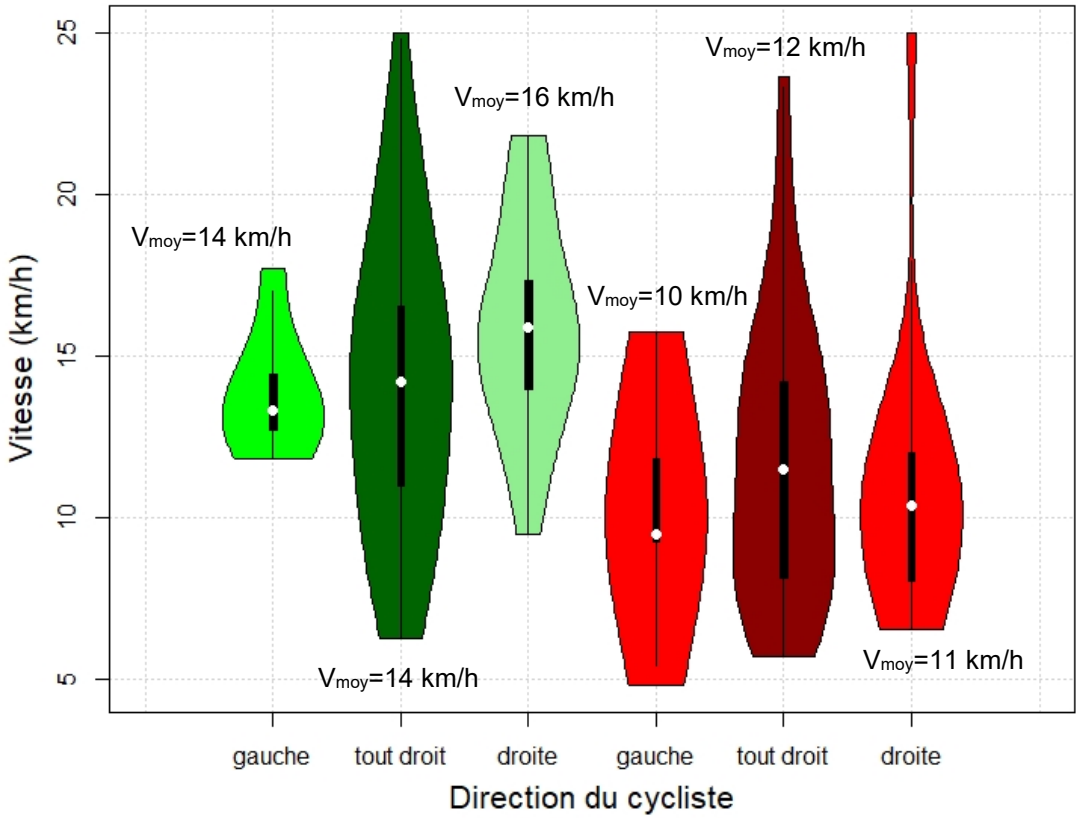


Figure 48 : Diagramme en violon des vitesses pratiquées par les vélos et les EDPM en amont du feu selon sa couleur à leur arrivée en excluant ceux qui se sont arrêtés au feu rouge (l'EDPM arrivant au feu orange n'est pas représenté).

Afin de mieux appréhender les facteurs susceptibles d'impacter le choix des vitesses des usagers vélo et EDPM, les données ont été modélisées par une régression linéaire multiple en utilisant 4 variables explicatives relatives à la présence et au mouvement des autres véhicules sur la sécante (mvt_veh_sec), sur la voie sur la laquelle circule le vélo/EDPM (pres_veh_sens_circ), la présence de piétons au niveau du passage piéton et la direction que va emprunter le cycliste. À l'exception de ce dernier paramètre, ces indicateurs se réfèrent à la situation au moment où le vélo/EDPM apparaît sur l'image.

Les résultats de ces régressions selon que le feu est rouge ou vert sont respectivement présentés sur les figures 49 et 50 . Ces résultats suggèrent que :

- Lorsque le feu est rouge :
  - Les vélos / EDPM modèrent leur vitesse juste en amont du feu si des véhicules sont déjà en train de traverser ou s'ils arrivent dans l'intersection ;
  - La présence d'un véhicule à l'arrêt sur leur voie est également un élément modérateur de leur vitesse ;
  - Les vélo/EDPM augmentent fortement leur vitesse quand un véhicule circule devant eux (ce comportement est sans doute lié au « sentiment » de protection que cette situation leur confère) ;
  - La présence de piétons à proximité du *passage piéton ou de piétons en train de traverser ne semble avoir qu'un effet limité* sur les vitesses (différence statistiquement non significative).
- Lorsque le feu est vert, seule la présence d'un véhicule circulant à leur niveau semble avoir un impact (modérateur) sur la vitesse des vélos /cyclistes.

Variable		N	Estimate	p
mvt_veh_sec	aucun	26	Reference	
	arrêt	9	-0.49 (-3.66, 2.68)	0.760
	arrivant	6	-5.40 (-9.27, -1.52)	0.007
	circulant	30	-2.67 (-4.81, -0.53)	0.016
pieton	non ou loin	44	Reference	
	oui proche ou traversant	27	-1.13 (-3.13, 0.87)	0.262
pres_veh_sens_circ	non	49	Reference	
	oui - arrêt	19	-2.87 (-5.04, -0.70)	0.010
	oui - circulant à coté	1	2.45 (-6.52, 11.42)	0.587
	oui - circulant devant	2	5.87 (0.06, 11.68)	0.048
dir	td	46	Reference	
	d	20	-0.24 (-2.48, 2.01)	0.834
	g	5	-1.81 (-5.55, 1.92)	0.335

Figure 49 : Résultats de la régression linéaire multiple pour les vélos et EDPM arrivant au rouge et ne s'arrêtant pas avant le feu (en vert les modalités qui ont un effet un modérateur sur la vitesse – en rouge ceux qui accroissent la vitesse)

Variable		N	Estimate	p
mvt_veh_sec	aucun	29	Reference	
	arrêt	26	0.28 (-2.12, 2.68)	0.82
	arrivant	15	0.96 (-1.77, 3.70)	0.48
	circulant	2	-2.40 (-9.08, 4.27)	0.47
pieton	non ou loin	45	Reference	
	oui proche ou traversant	27	0.05 (-2.08, 2.18)	0.96
pres_veh_sens_circ	non	35	Reference	
	oui - arrêt	3	-1.71 (-7.24, 3.82)	0.54
	oui - circulant à coté	3	-5.58 (-10.88, -0.27)	0.04
	oui - circulant devant	27	-1.11 (-3.28, 1.06)	0.31
	oui - tournant	4	-2.07 (-6.52, 2.37)	0.35
dir	td	44	Reference	
	d	20	0.70 (-1.62, 3.01)	0.55
	g	8	-0.99 (-4.30, 2.32)	0.55

Figure 50 : Résultats de la régression linéaire multiple pour les vélos et EDPM arrivant au vert (en vert les modalités qui ont un effet un modérateur sur la vitesse).

3.3.2.3 Le positionnement latéral du cycliste : prédicteur du mouvement dans l'intersection ?

Afin d'évaluer dans quelle mesure la position latérale des cyclistes était un prédicteur potentiel du mouvement que les cyclistes vont choisir dans le carrefour, leur position latérale a été relevée au niveau du passage piéton se situant juste en aval du feu tricolore. La latéralité est relevée à l'aide d'un codage à 5 modalités[5] à partir du bord droit de la chaussée dans le sens de circulation des cyclistes :

- 1 - entre le trottoir et la première bande de marquage,
- 2 - sur la première bande de marquage,
- 3 - entre les deux bandes,
- 4 - sur la seconde bande,
- 5 - entre la seconde bande et le bord du trottoir gauche.

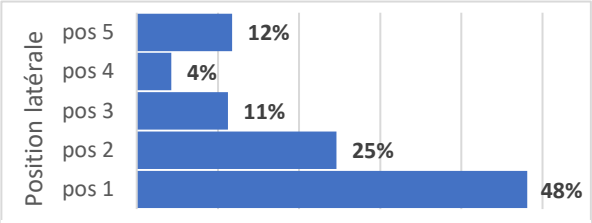
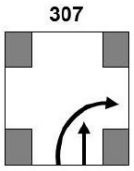


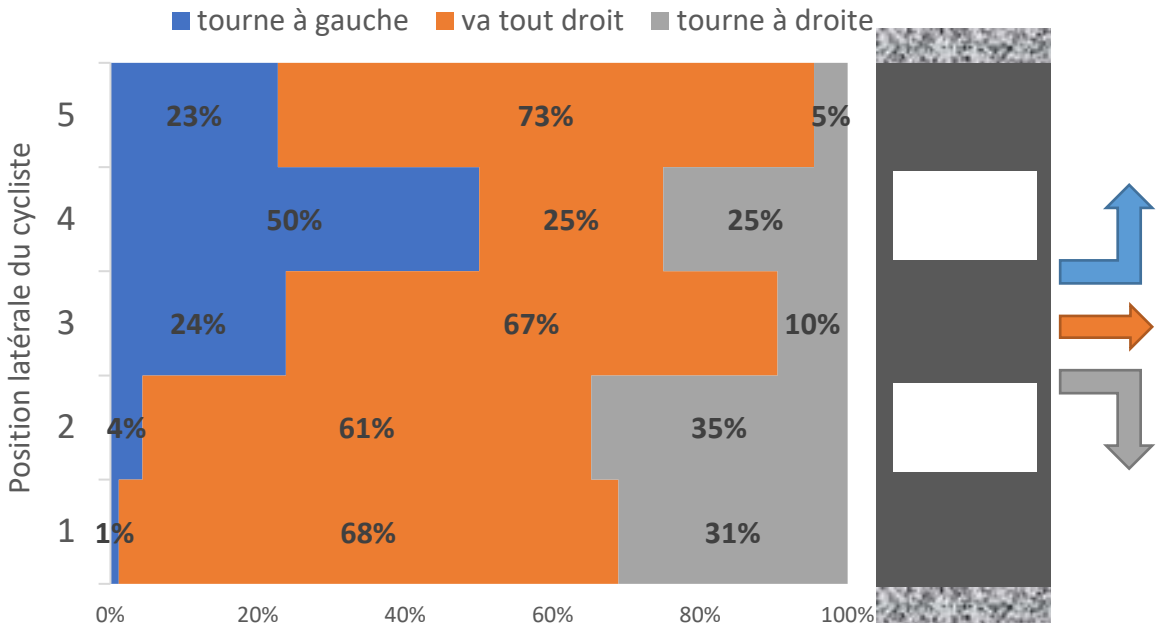
Figure 51 : Répartition du positionnement latéral des 187 cyclistes /edpm au niveau du passage piéton

Globalement la direction empruntée par le cycliste/EDPM est cohérente avec sa position latérale au niveau du passage piéton (figure 52). Toutefois, le choix de certaines positions latérales apparait peu prédictif du mouvement que va opérer le cycliste dans l'intersection. C'est particulièrement vrai lorsqu'un cycliste / EDPM positionné plutôt à gauche de la chaussée (positions 4 et 5) va finalement tourner à droite (5% des cas en position 5 et 25% des cas en position 4). Ces situations correspondent à des configurations dans lesquelles le vélo double, par la gauche, un véhicule à l'arrêt ou en mouvement et circulant dans le même sens. Dans l'un des cas alors que le feu est vert le vélo qui circule, à vitesse élevée, près du bord gauche de la chaussée se rabat pour tourner à droite alors qu'une voiture le suivant continue tout droit (situation équivalente au pictogramme 307).



Dans une moindre proportion un phénomène similaire est observé pour les cyclistes positionnés près du bord droit de la chaussée et qui vont finalement tourner à gauche. Dans les deux cas cela concerne toutefois un nombre limité de cyclistes[6].

[5] Il est à noter que ce sectionnement engendre des espaces latéraux de largeurs inégales.
[6] Ces situations sont toutefois observables sur les vidéos réalisées dans ce carrefour aux autres états.

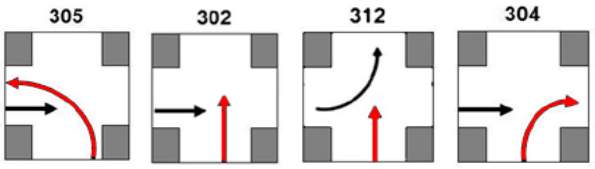


Clé de lecture : 23% des cycliste ayant circulé entre la seconde bande de marquage et le trottoir de gauche ont tourné à gauche, 73% sont allés tout droit et 5% ont viré à droite.

Figure 52 : Répartition des directions empruntées par les 187 cyclistes / EDPM en fonction selon leur position latérale au milieu du passage piéton

3.3.2.4 Scénarios 302, 304 et 305 et 312

Cette partie est consacrée à l'étude du comportement des interactions entre cyclistes / EDPM (en rouge) et les autres véhicules motorisés dans les scénarios décrits par les pictogrammes 305, 302, 312 et 304 représentés ci-contre.



La méthodologie d'analyse se rapproche de celle décrite au 3.3.1.3. Elle se limite également aux situations pour lesquels le cycliste a franchi le feu au rouge. Les conditions d'analyses sont néanmoins rendues plus complexes par la mixité des usagers de deux et quatre roues sur la sécante. Le choix est fait ici d'exclure les situations mobilisant uniquement des interactions entre un cycliste / EDPM et un autre deux roues.

Les comportements observés marquent une très grande similitude avec ceux observés pour la situation 1 du carrefour précédant.

Sans véhicule arrivant sur la sécante

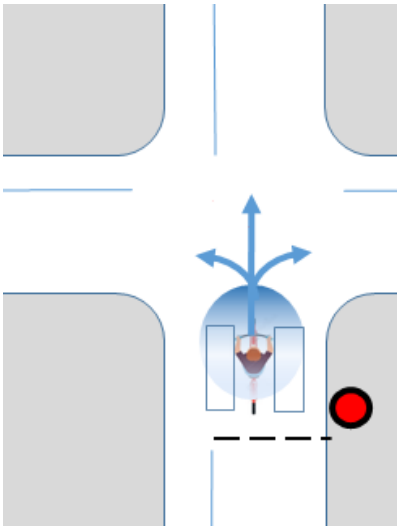


Figure 53 : Vélo traversant sans véhicule sur la sécante

Globalement les vélos ont tendance à franchir le feu et les premiers mètres qui suivent en roue libre. Ils recommencent à pédaler/accélérer une fois qu'ils ont acquis la certitude qu'il n'y a pas de véhicule arrivant sur la sécante ou qu'il est suffisamment loin pour leur laisser le temps de traverser.
Dans cette configuration, les cyclistes / EDPM ont tendance à réduire de manière assez significative leur vitesse sur les quelques mètres en aval du feu.

Avec véhicule en train de traverser ou de tourner

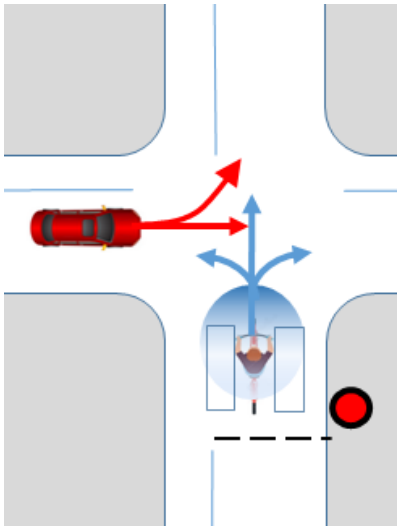


Figure 54 : Vélo traversant avec véhicule en mouvement sur la sécante

Dans cette situation le cycliste va franchir le feu à allure réduite et s'avancer dans le carrefour en ralentissant.

- Si l'ajustement de vitesse qu'il effectue est suffisant il ne s'arrête pas et commence à réaccélérer avant que le véhicule ne soit totalement passé devant lui.
- Si l'ajustement de vitesse est insuffisant, il s'arrête - soit en posant le pied à terre soit par équilibrisme - ou stoppe sa progression longitudinale à l'aide d'un déplacement dans la largeur de la voie. Ces manœuvres s'effectuent en se laissant une certaine marge de sécurité longitudinale vis-à-vis de la trajectoire anticipée de passage du VL. Il repart quand un créneau temporel suffisant s'offre à lui (voir nuance ci-après).

Dans ces situations les vitesses en amont du feu et juste en aval du feu sont globalement inférieures à la situation sans véhicule sur la sécante.

Avec véhicules sur la sécante à l'arrêt

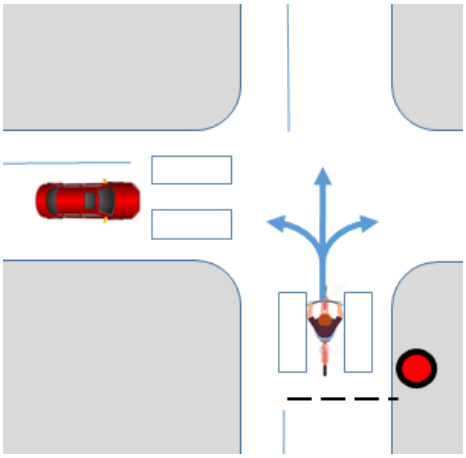


Figure 55 : Vélo traversant avec véhicule à l'arrêt sur la sécante

Dans la très grande majorité des cas, il s'agit de situations dans lesquelles le feu (pour le cycliste) est passé au rouge depuis peu de temps (de 1 à 5 secondes environ). Les véhicules à l'arrêt sur la sécante n'ont pas encore redémarré.
Dans ces circonstance, le vélo / EDPM arrive et franchit le feu à vitesse élevée. La priorité du cycliste est focalisée sur l'objectif de finaliser sa traversée au plus vite.

Les stratégies décrites ci-dessus sont mises en œuvre quel que soit la direction empruntée par les vélos/EDPM. Des nuances sont toutefois observées lors des manœuvres de tourne à droite quand une file de véhicules provenant de la sécante est en train de traverser l'intersection. Dans cette situation, certains cyclistes engagent leur manœuvre de tourne à droite alors même que des voitures arrivent depuis la sécante. Cette manœuvre se fait néanmoins de manière à positionner le vélo très à droite lors de son entrée sur la sécante. Cela donne le sentiment que le cycliste / EDPM considère qu'il ne produit qu'une gêne modérée pour l'automobiliste, ce dernier ayant toujours la possibilité de se décaler sur la gauche pour dépasser le cycliste.

3.4 Conclusions et recommandations pour les cyclistes

Les observations présentées dans les sections précédentes permettent de dégager quelques enseignements potentiellement utiles aux concepteurs de véhicules automatisés dans leur gestion de la traversée d'un carrefour en milieu urbain en présence de cyclistes / EDPM.

Au moins en milieu urbain dense, les cyclistes ont peu tendance à s'arrêter en amont du feu lorsqu'il est rouge (et encore moins en amont de la ligne d'effet des feux) en présence ou non de trafic automobile sur les branches du carrefour et en présence ou non du pennonceau M12 les autorisant à franchir le feu au rouge sous réserve de céder-le-passage. Le franchissement au rouge est quasiment systématique avec néanmoins une occurrence qui tend à diminuer avec la complexité du carrefour. La couleur du feu impacte toutefois les vitesses d'approche de ces usagers ; les cyclistes / EDPM modérant assez fortement leur vitesse d'approche quand le feu est rouge.

Ce n'est pas non plus parce que le cycliste / EDPM a franchi le feu au rouge qu'il va directement traverser le carrefour. Les conditions de trafic (présence et mouvement des véhicules sur les autres branches) et de visibilité constituent en effet les principaux déterminants de la manière dont les cyclistes / EDPM vont franchir le carrefour.

Au-delà des différences induites par les combinaisons de facteurs trafic/visibilité quelques comportements majoritaires semblent se dégager :

- Le cycliste / EDPM tend à aller aussi loin que possible dans le carrefour en se laissant une marge longitudinale de sécurité ;

- Si possible il va éviter de poser le pied à terre, et pour cela soit procéder à des ajustements de vitesse soit recourir à d'autres techniques (équilibrisme, déports latéraux) ;
- Les conditions de trafic dans lesquelles les autres véhicules constituent des écrans et offrent un effet « protecteur » se traduisent généralement par des traversées à vitesse élevée.

Ces comportements peuvent s'avérer challengeant pour le véhicule automatisé qui se verra potentiellement confronté à de multiples usagers en mouvement dans l'intersection. Ces situations pourraient typiquement conduire à des déclenchements d'AEB ou à des arrêts du véhicule automatisé si ce dernier est « trop prudent ».

En conséquence, les recommandations suivantes sont proposées :

Recommandation 21

Le VA doit inclure des zones de détection spécifiques pour les cyclistes et EDPM dans lesquelles ces usagers s'arrêtent souvent. Il doit les surveiller en continu pendant la traversée du carrefour pour s'assurer de leur arrêt.

Recommandation 22

En cas de présence avérée d'un cycliste/EDPM le VA doit traverser avec une faible vitesse.

L'étude de la position latérale des cyclistes / EDPM au niveau du feu tend à montrer qu'elle est assez peu prédictive de la direction que va emprunter le cycliste ; le véhicule automatisé ne devra donc associer l'utilisation d'un tel indicateur qu'à une faible fiabilité.

Recommandation 23

Le véhicule automatisé ne doit pas utiliser la position latérale des cyclistes / EDPM au niveau du feu pour prédire la direction qu'ils vont emprunter.

Cette imprédictibilité se retrouve également sur d'autres comportements observés sur les séquences vidéo mais non documentés dans le présent document. C'est notamment le cas des nombreux mouvements des cyclistes / EDPM depuis la chaussée et le trottoir (et vice et versa) ; ces phénomènes pouvant rendre difficile le suivi de ces usagers par le véhicule automatisé.

4 Analyse des vitesses du VL en présence de piétons

L'objectif principale de cette analyse est de définir si la présence de piétons dans le contexte routier induit des modifications dans les vitesses pratiquées par les automobilistes.

Question de recherche :

Est-ce que la présence de piétons induit des réductions de vitesse dans des situations comparables ?

4.1 Descriptions des données utilisées et de leurs conditions d'acquisition

L'objectif du projet UDRIVE était de permettre d'étudier le comportement des usagers de la route sur 2 axes principaux : l'identification des mesures pour améliorer la sécurité routière et l'identification d'approches pour réduire l'impact environnemental du transport routier. Le projet a permis le recueil de données provenant de 5 pays : France, Pays Bas, Allemagne, Royaume Uni et Pologne pour les véhicules légers. L'ensemble des participants était constitué par des conducteurs lambda dont les véhicules étaient équipés par un système d'acquisition de données ou DAS (*Data Acquisition System*) comportant : 7 caméras vidéo, une caméra intelligente Mobileye, une centrale inertielle, antenne GPS-GSM et une interface collectant le trafic sur le réseau CAN principal des véhicules.

Dans chacun des pays participant à la collecte de données, un '*Operation Site*' était établi dans les installations d'un des partenaires du projet. Le rôle de ce site opérationnel était, une fois l'expérimentation en cours, de faire le monitoring de la flotte de véhicules correspondante pour suivre le progrès de la collecte, identifier des problèmes techniques et faire intervenir les équipes concernées le plus rapidement possible. Chacun de ces sites devait également récupérer des disques durs provenant des DAS des véhicules et les transmettre aux LDC ou *Local Data Centers* qui réalisaient la synchronisation et harmonisation de toutes les données brutes provenant des différents capteurs du DAS. Ces données étaient ensuite envoyées au CDC ou *Central Data Center* qui devait assurer une base de données centralisée accessible à distance par les partenaires pour réaliser les analyses.

Les interactions avec les participants étaient toutefois volontairement limitées au maximum, de manière à ne pas influencer leur comportement. Les participants conduisaient entre 2 et 3 mois entre chaque échange de disque dur.

Ce projet a permis de récolter, en Europe, 45 000 heures de conduite sur véhicules légers. Ceci correspond à 2 000 000 km pour l'ensemble des 196 automobilistes. Pour Surca, nous nous sommes focalisés sur les conducteurs français soit 43 conducteurs utilisant 30 véhicules différents, recrutés dans la région de Lyon. Ceci a permis la collecte de 12 600 heures de conduite sur 573 000 km correspondant à l'ensemble de leurs trajets quotidiens, professionnels, de loisir…

4.2 Méthodologie d'analyse statistique

Pour comparer les vitesses moyennes pratiquées dans les situations avec et sans piétons, nous avons séparé les données en deux types, intersections et lignes droites.

Puis pour chaque type, nous avons recherché les situations pour lesquelles il existait suffisamment de données et nous avons créé des groupes homogènes en termes de vitesse moyennes qui sont définis par des caractéristiques telles que le contexte routier (rural ou urbain), l'infrastructure (giratoire ou non) et de vitesses limites. Cette analyse a été réalisée avec un algorithme de classification par un arbre de décision.

Dans chacun de ces groupes homogènes, nous avons fait un test de Student qui compare les vitesses moyennes pratiquées sur chaque segment dans les deux échantillons de segments, l'un avec présence de piétons et l'autre sans présence de piétons. Ce test nous a permis de savoir si la différence entre les deux échantillons est statistiquement significative. Dans ce cas, nous avons calculé le « G de Hedge » qui permet de mesurer l'effet de la différence des moyennes. L'utilisation de cet estimateur est recommandée pour calculer la taille de l'effet lorsque les deux tailles d'échantillon ne sont pas égales. Cet effet permet de savoir quel pourcentage de segment avec piétons sont en dessous de la valeur moyenne des segments sans piétons si les lois sont normales.

Tableau 4 : Interprétation de l'effet

Taille de l'effet	Pourcentage des segments avec piétons dont la moyenne de vitesse seraient en dessous de la moyenne de la vitesse des segments sans piéton
0	50%
0,2	58%
0,4	66%
0,6	73%
0,8	79%
1	84%
1,2	88%
1,4	92%
1,6	95%
1,8	96%
2	98%
2,5	99%
3	99,90%

Dans la communauté scientifique, il est défini qu'une valeur de 0,2 à 0,5 représente une petite taille d'effet, de 0,5 à 0,8 représente une taille d'effet moyenne et supérieure 0,8 représente une taille d'effet importante.

Exemple d'interprétation

Pour interpréter les résultats d'un T-test, il y a deux étapes. La première teste l'hypothèse de variances égales avec un test de Levene sur l'égalité des variances ; Si ce test est significatif, l'hypothèse H0 est rejetée ce qui signifie que les variances sont significativement différentes entre les deux groupes. Dans ce cas, nous devons prendre la deuxième ligne « Hypothèse de variances inégales », sinon nous pouvons prendre la première ligne « Hypothèse de variances égales ».

Tableau 5 : Interprétation des t-tests

Type de route	VMA			Test de Levene sur l'égalité des variances		Test t pour égalité des moyennes							Effet
				F	Sig.	t	ddl	Sig. (bilatéral)	Différence moyenne	Différence erreur standard	Intervalle de confiance de la différence à 95 %		G de Welch
											Inférieur	Supérieur	
Rural	70	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hypothèse de variances égales	79,21	0,00	18,99	51209,00	0,00	6,84	0,36	6,14	7,55	0,52
			Hypothèse de variances inégales			16,18	1425,30	0,00	6,84	0,42	6,01	7,67	0,44
Urbain	70	Moyenne de la vitesse sur le segment	variances	1,51	0,22	7,76	11187,00	0,00	4,11	0,53	3,07	5,14	0,36
			Hypothèse de variances inégales			7,51	537,46	0,00	4,11	0,55	3,03	5,18	0,35

Sur l'exemple du tableau ci-dessus, nous avons les deux cas. En rural, le test de Levene montre une différence significative des variances, nous prenons donc la deuxième ligne et le résultat du T-test montre qu'il y a une différence significative de moyenne de 6.84 km/h entre les deux groupes (t=16.18, p<0,00). Pour le cas urbain, le test de Levene ne montre pas de différence significative des variances donc nous prenons la première ligne et le résultat du T-test montre qu'il y a une différence significative moyenne de 4.11 km/h entre les deux groupes (t=7.76, p<0,00). Les deux effets sont relativement faibles (0.44 et 0.36).

4.3 Extraction des situations étudiées

L'objectif de cette analyse est de déterminer si les véhicules actuels changent leur vitesse de roulage en présence de piétons en situation rurale et urbaine pour adapter leurs consignes de vitesse à ces situations. Nous n'avons pas sélectionné les autoroutes car la présence de piétons est extrêmement dangereuse dans ce cas et les véhicules automatisés doivent les traiter comme des situations d'urgence et non comme une simple adaptation de la vitesse.

Extraction des sections courantes :

Les analyses ont été menées sur les vitesses moyennes dans les sections sans intersections. Ces segments sont distants d'au moins 30 mètres d'une intersection et font une longueur maximale de 500 mètres. Les sections dans lesquelles il y a un arrêt (vitesse nulle) ont été supprimées ainsi que celles dans lesquelles le conducteur suivait un autre véhicule pour être sûr d'observer le comportement naturel sans contraintes extérieures.

Extraction des intersections :

Les analyses ont été menées sur les vitesses moyennes dans les sections avec intersections. Ces segments englobent les 30 mètres en amont et aval de l'intersection. Si deux intersections sont distantes de moins de 30 mètres, elles sont concaténées. Les sections dans lesquelles il y a un arrêt ont été supprimées ainsi que celles dans lesquelles le conducteur suivait un autre véhicule pour être sûr d'observer le comportement naturel sans contraintes extérieures.

4.4 Analyse des sections courantes observées en situation naturelle

4.4.1 Sélection des situations à tester

Nous savons que la vitesse maximale autorisée (VMA) est un facteur très important pour le choix de la vitesse des automobilistes. La première étape de notre analyse est donc d'identifier les VMA pour lesquelles nous avons assez de données pour conduire nos analyses. Le Tableau 6 indique que nous avons assez de données en urbain avec une vitesse limite de 30, 50 et 70 km/h et en milieu rural avec une vitesse limite de 70 et 90 km/h.

Tableau 6 : Nombre de situations par type de route et de vitesse limite en ligne droite

		Type de route	
		Urbaine	Rurale
Vitesse maximale autorisée	30	11052	75
	50	100783	755
	70	11612	52593
	90	438	249579
	110	4	10
	130	8	5

La vitesse pratiquée par les automobilistes dépend de nombreux facteurs. Pour identifier leur importance nous avons fait des arbres de décision qui permettent de segmenter les valeurs des vitesses moyennes sur le segment en fonction des paramètres qui nous semblent pertinents tels que :

- Le Type de route : urbaine, rurale,
- La Vitesse maximale autorisée,
- Le Créneau horaire : semaine nuit (22H-6h), semaine début et fin de journée (7h-9h et 18h-19h), semaine journée (9h 17h), weekend nuit (22H-6h), weekend début et fin de journée (7h-9h et 18h-19h), weekend journée (9h 17h),
- Le Type de suivi de véhicule : aucun véhicule ou suivi de véhicule,
- La catégorie d'arrêt sur le segment : Pas d'arrêt de 1 à 25% du temps, de 26 à 50%, de 51 à 75 %, au-dessus de 76 % du temps,
- Et enfin la présence de piétons sur le segment.

La Figure 53 nous montre que le facteur le plus important est le type de route (urbain ou rural). Par contre, la Figure 54 nous montre que si la VMA est bien le deuxième facteur en milieu rural (ce qui est rassurant), en urbain, c'est le fait de s'arrêter qui est le plus impactant. La Figure 55 confirme que ce facteur est le troisième pour la partie rurale.

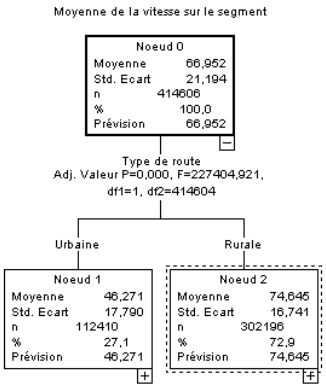


Figure 56 : Premier niveau de l'arbre de décision complet des sections droites

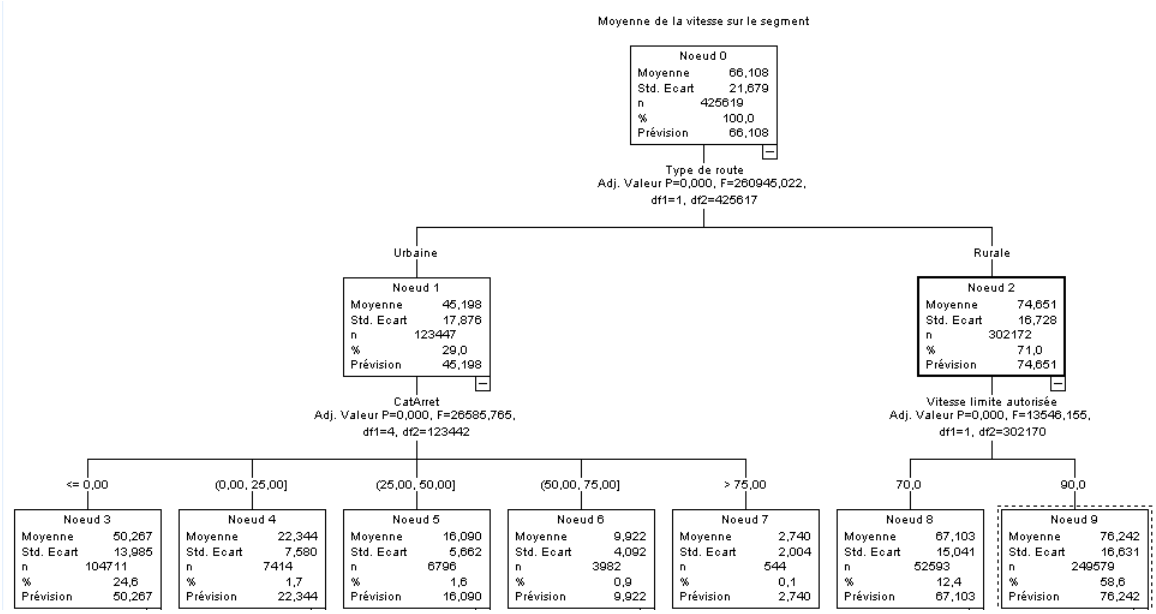


Figure 57 : Deuxième niveau de l'arbre de décision complet des sections courantes

En urbain, les valeurs de la vitesse moyenne passent de 50 km/h à 3-22 km/h suivant la durée de l'arrêt.

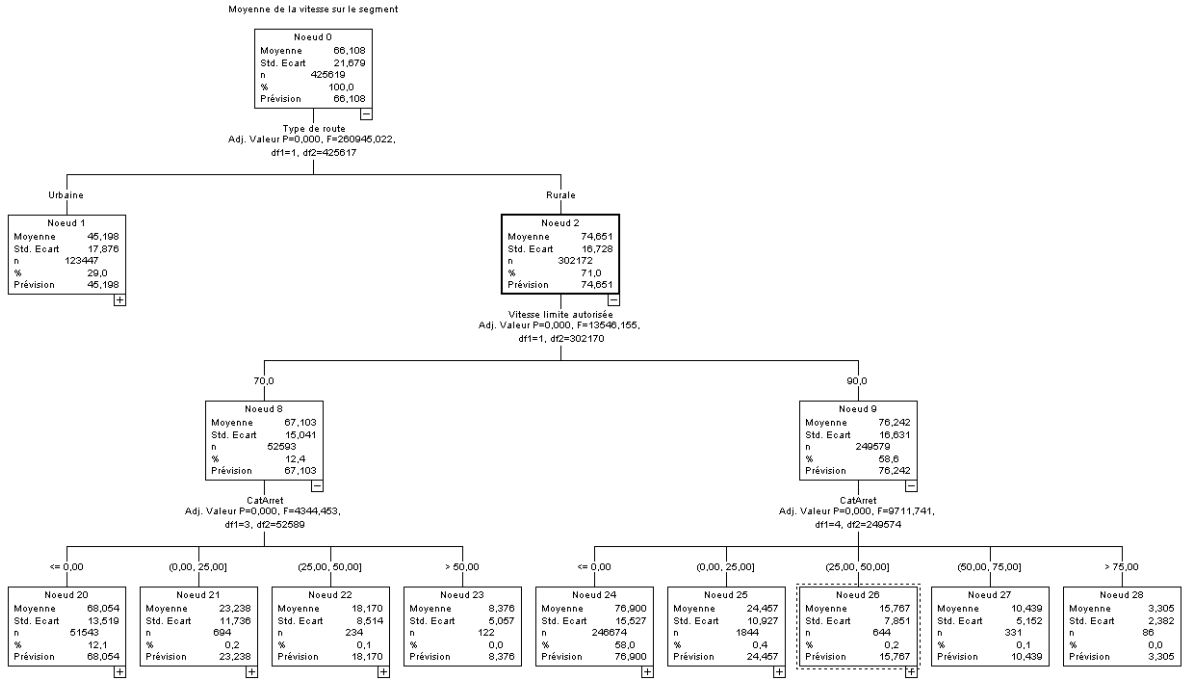


Figure 58 : Troisième niveau de l'arbre de décision complet des sections droites : partie rurale

En rural, les valeurs de la vitesse moyenne passent de 68 km/h à 8-23 km/h suivant la durée de l'arrêt lorsque la VMA est de 70 km/h et de 77 km/h à 3-24 km/h suivant la durée de l'arrêt lorsque la VMA est de 90 km/h.

Pour ne pas polluer les valeurs des vitesses moyennes de l'analyse nous allons donc supprimer les situations contenant des arrêts. Une fois ces situations sélectionnées, nous calculons la moyenne de toutes les moyennes de vitesse sur le segment.

Tableau 7 : Moyenne des vitesses observées en fonction du type de route et des VMA sur les lignes droites

		Piéton sur le segment	
		Aucun piéton	Présence piéton
Rural	70 km/h	68 km/h	61 km/h
	90 km/h	77 km/h	66 km/h
Urbain	30 km/h	41 km/h	34 km/h
	50 km/h	51 km/h	41 km/h
	70 km/h	63 km/h	58 km/h

Le Tableau 7, nous montre que les vitesses observées en urbain avec ou sans présence de piétons sont au-dessus de la vitesse limite en urbain à 30 Km/h. Etant donnée, qu'un véhicule automatisé devrait respecter les VMA, nous n'étudierons pas ce cas. Nous gardons donc en urbain les situations avec une VMA de 50 et 70 km/h et en milieu rural avec une VMA de 70 et 90 km/h.

Tableau 8 : Récapitulatif des observations utilisées pour l'analyse des lignes droites

	Vitesse limite autorisée	Nombre
Rural	70 km/h	51543
	90 km/h	246674
	Total rural	298217
Urbain	50 km/h	85010
	70 km/h	11207
	Total Urbain	96217
	Total général	394434

En conclusion, nous travaillerons donc sur 394 434 observations présentées dans le Tableau 8

4.4.2 Création des groupes de situations homogènes

L'étape suivante consiste à créer des groupes homogènes de situations dans lesquelles la vitesse est la même. Pour identifier ces groupes nous avons fait une classification des vitesse moyennes en utilisant l'algorithme des arbres de décision (méthode CHAID sans validation avec une profondeur maximale de 20, un nombre minimum d'observations dans le nœud parent de 100 et un nombre minimum d'observations dans le nœud enfant de 50) en utilisant les variables créneau horaire, Type de suivi, Type de route, Vitesse maximale autorisée. Toutes les variables ont été utilisées et nous avons obtenu un arbre de 51 nœuds dont 32 terminaux et une profondeur de 5.

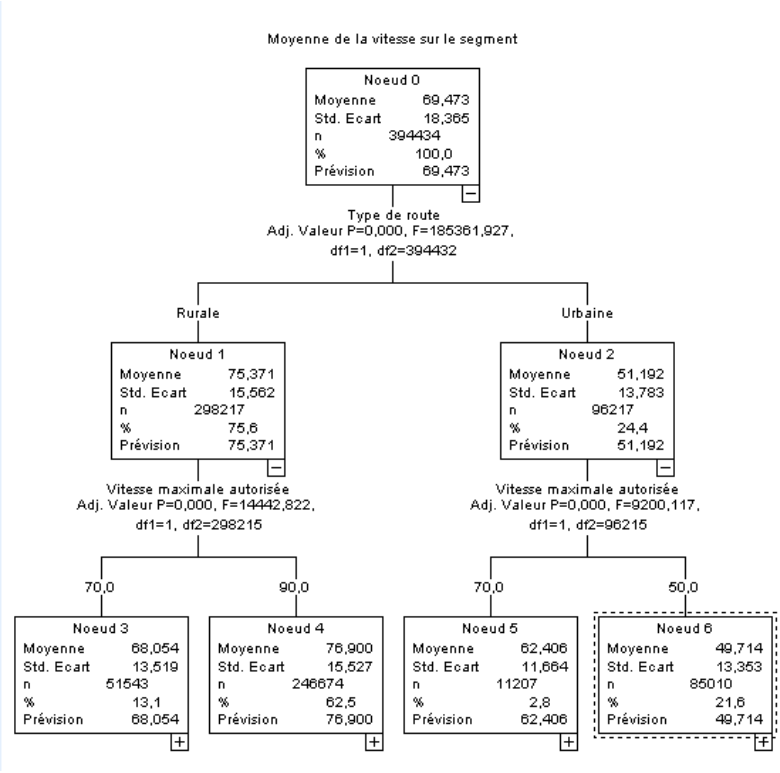


Figure 59 : Deux premiers niveaux de l'arbre de décision pour la recherche de situations homogènes des lignes droites

Les deux premiers niveaux montrent que la vitesse moyenne sur le segment dépend du type de route puis de la vitesse maximale autorisée. En milieu urbain la vitesse moyenne en section courante est de 50 km/h si la vitesse maximale autorisée est de 50 km/h et de 62 km/h si la vitesse maximale autorisée est de 70 km/h. En milieu rural la vitesse moyenne en section courante est de 68 km/h si la vitesse maximale autorisée est de 70 km/h et de 77 km/h si la vitesse maximale autorisée est de 90 km/h.

Nous avons continué a exploré les branches de l'arbre pour les quatre nœuds allant de 3 à 6.

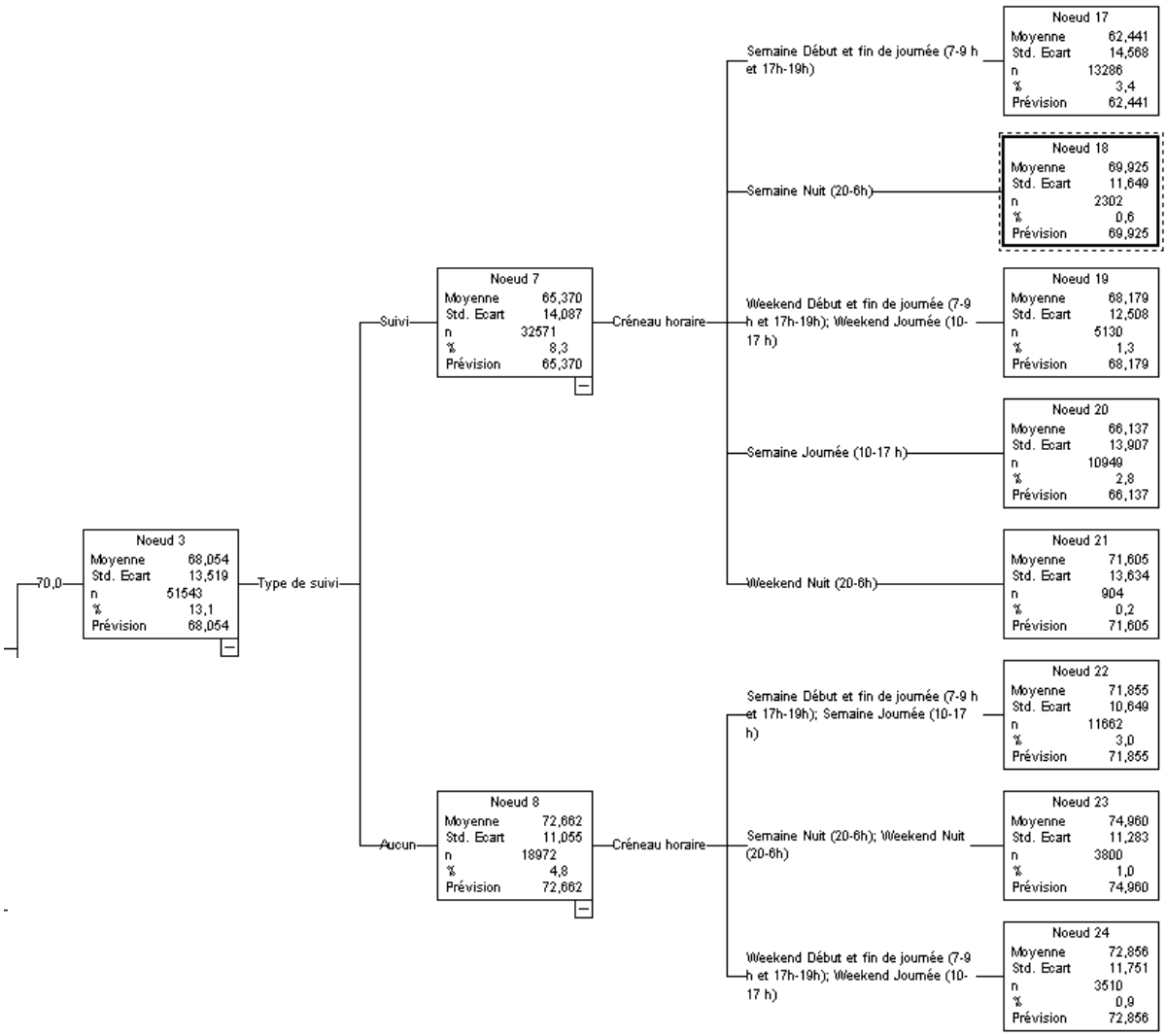


Figure 60 : développement du nœud 3 de l'arbre de décision pour la recherche de situations homogènes des lignes droites en milieu rural à 70 km/h

Nous voyons qu'en contexte urbain avec une VMA de 70 km/h, le premier critère de classification des données est le fait que le véhicule soit en situation de suivi : 65 km/h en cas de suivi versus 73 km/h sans suivi. Le deuxième critère de segmentation est le créneau horaire. En cas de suivi, les véhicules roulent moins vite (62 km/h) en début et fin de journée en semaine (période de plus fort trafic), un peu plus vite la journée en semaine (66 km/h) et le weekend (68 km/h) et enfin beaucoup plus vite la nuit (70 et 71 km/h). En cas de circulation sans suivi, ils circulent moins vite la journée en semaine (72 km/h) et le weekend (73 km/h) que la nuit (75 km/h).

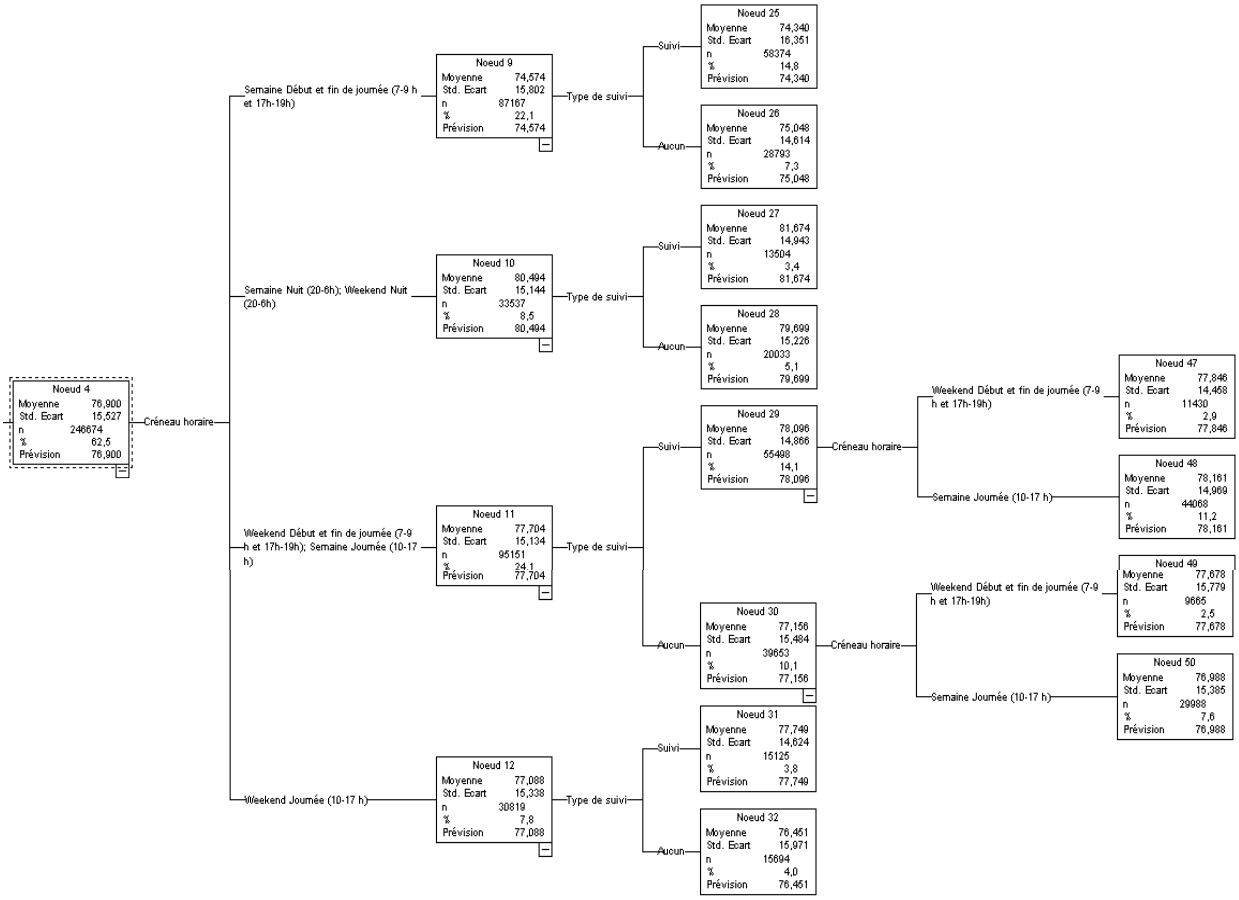


Figure 61 : développement du nœud 4 de l'arbre de décision pour la recherche de situations homogènes des lignes droites en milieu rural à 90 km/h

En contexte rural à 90 km/h, le premier critère de classification est le créneau horaire, puis le suivi. Un troisième niveau réutilise le créneau horaire pour séparer les situations de weekend début et fin de journée et semaine journée. Nous retrouvons des vitesses plus faibles en semaine en début et fin de journée (75 km/h) et plus importantes la nuit (80 km/h) tandis que les autres créneaux ont des vitesses intermédiaires (77-78 km/h). Le deuxième niveau montre que la vitesse pratiquée en cas de suivi est plus rapide d'environ 1 à 2 km/h que sans suivi sauf dans les horaires chargés (début et fin de journée la semaine) pour lesquelles les véhicules roulent légèrement plus vite sans suivi.

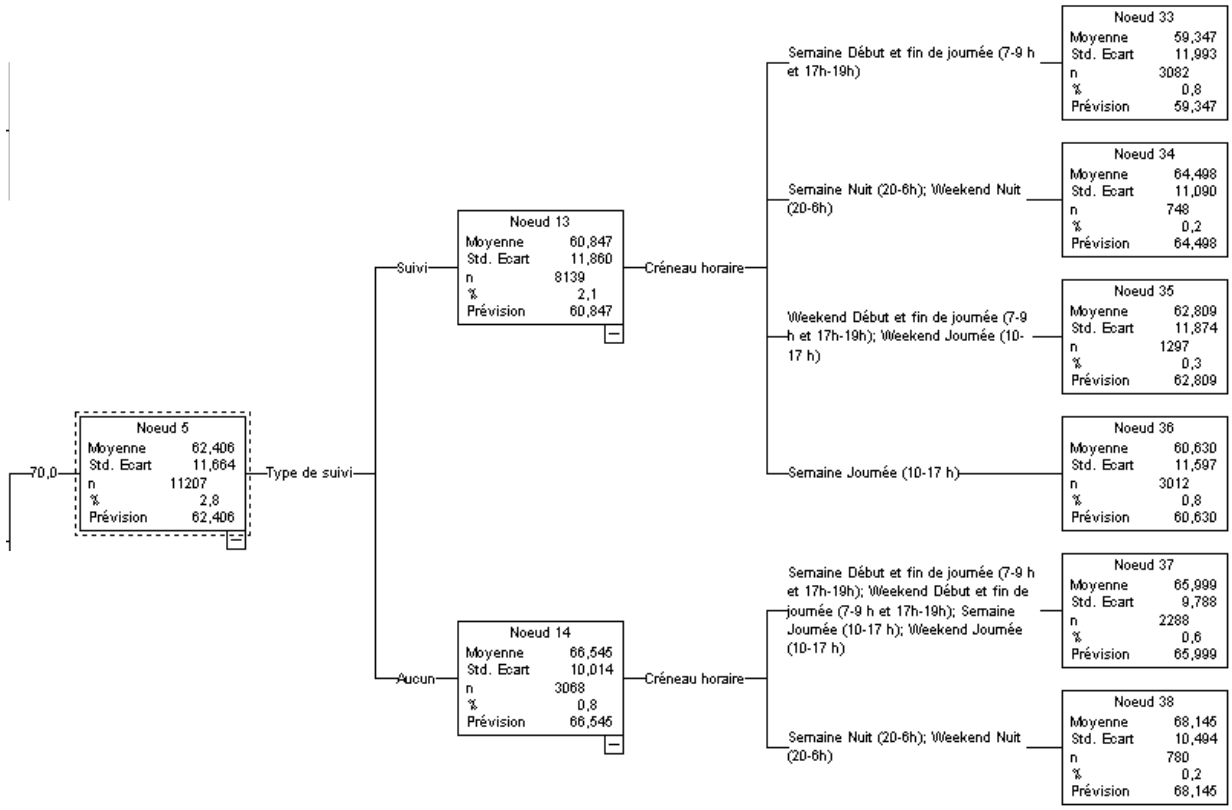


Figure 62 : développement du nœud 5 de l'arbre de décision pour la recherche de situations homogènes des lignes droites en urbain à 50 km/h

En contexte urbain à 70 km/h, le premier critère de classification est le suivi (61 km/h avec suivi versus 67 km/h sans suivi) puis le deuxième critère est le créneau horaire avec des vitesses plus fortes la nuit (64 km/h avec suivi versus 68 km/h sans suivi) plus faibles dans les autres situations (59 à 63 km/h avec suivi versus 66 km/h sans suivi).

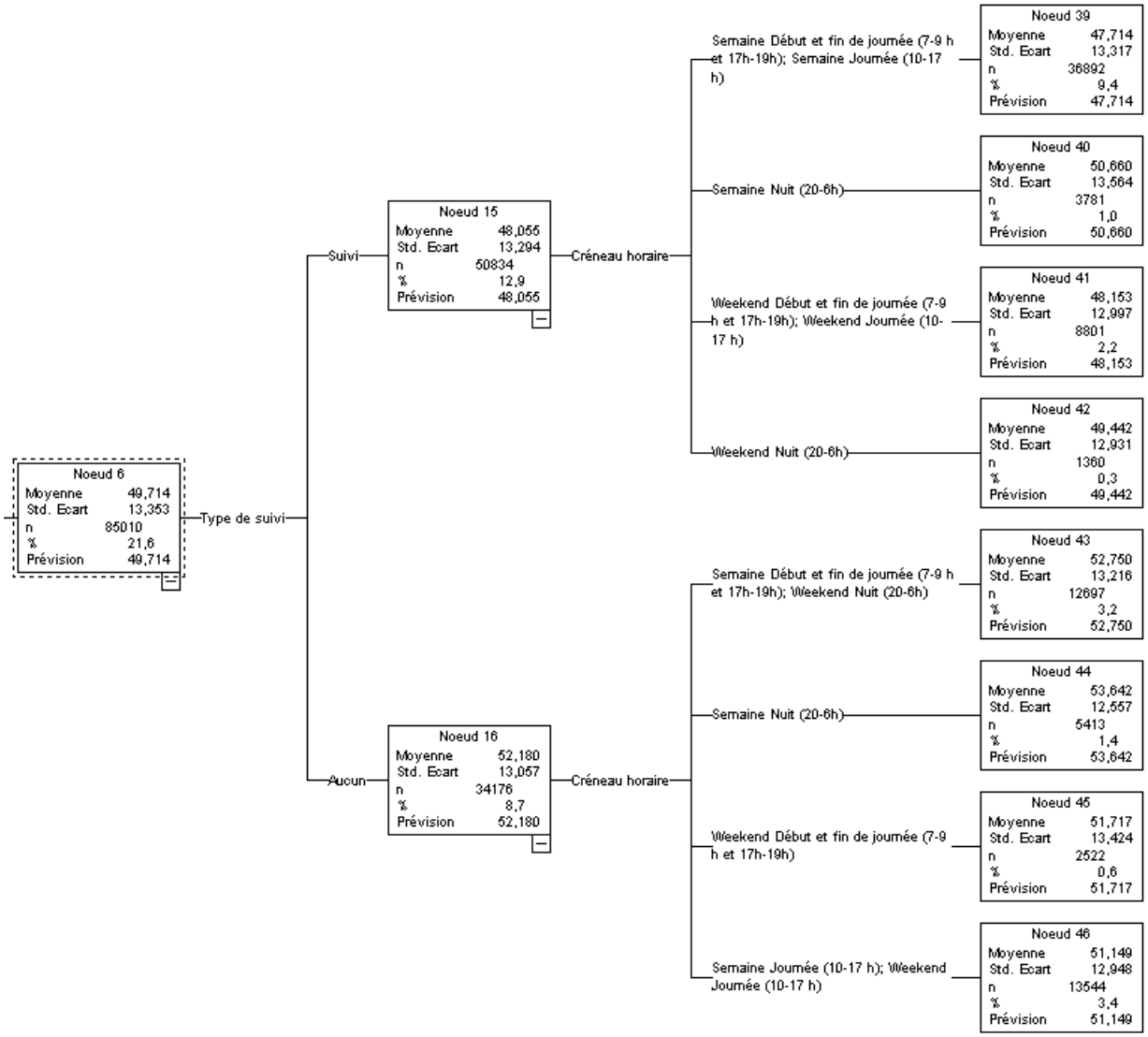


Figure 63 : développement du nœud 6 de l'arbre de décision pour la recherche de situations homogènes des lignes droites en urbain à 70 km/h

En contexte urbain à 50 km/h, le premier critère de classification est le suivi (48 km/h avec suivi versus 52 km/h sans suivi) puis le deuxième critère est le créneau horaire avec des vitesses plus élevées la nuit (49-50 km/h avec suivi versus 51-54 km/h sans suivi) plus faibles dans les autres situations (48 km/h avec suivi versus 52-53 km/h sans suivi).

4.4.3 Analyse de l'impact de la présence des piétons dans les groupes de situations homogènes

Tableau 9 : Test statistique sur la présence de piétons en section courante en contexte rural à 70 km/h sans suivi

Situation Rurale à 70 km/h sans suivi	Critère		Test de Levene sur l'égalité des		Test t pour égalité des moyennes							Effet	Vitesse Moyenne			
			F	Sig.	t	ddl	Sig. (bilat)	Diff moy	Diff erreur stan	Intervalle de confiance 95 Inf.	Intervalle de confiance 95 Sup.	G de Hedge	Situation	Nombre de cas	Valeur	Diff avec et sans piéton
Semaine Début et fin de journée Semaine	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	1,90	0,17	4,09	####	0,00	2,57	0,63	1,34	3,81	0,24	Aucun piéton	11369	72	3
		Hyp de variances			3,95	306	0,00	2,57	0,65	1,29	3,86		Présence	293	69	-
Semaine Nuit Weekend Nuit	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	0,44	0,51	1,29	3798	0,20	4,05	3,13	-2,10	10,19		Aucun piéton	3787	75	4
		Hyp de variances			1,35	12	0,20	4,05	3,01	-2,50	10,60		Présence	13	71	-
Weekend Début et fin de journée Weekend	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	2,36	0,13	2,98	3508	0,00	3,23	1,08	1,11	5,35	0,27	Aucun piéton	3388	73	3
		Hyp de variances			3,30	132	0,00	3,23	0,98	1,29	5,16		Présence	122	70	-

Nous observons dans les situations sans suivi en contexte rural à 70 km/h un faible effet de la présence de piétons car soit la différence de vitesse est limitée (3 km/h) soit la différence de vitesse n'est pas significative car l'effectif est faible (13 sections).

Tableau 10 : Test statistique sur la présence de piétons en section courante en contexte rural à 70 km/h avec suivi

Situation Rurale à 70 km/h avec suivi	Critère		Test de Levene sur l'égalité des		Test t pour égalité des moyennes							Effet	Vitesse Moyenne			
			F	Sig.	t	ddl	Sig. (bilat)	Diff moy	Diff erreur stan	Intervalle de confiance 95 Inf.	Intervalle de confiance 95 Sup.	G de Hedge	Situation	Nombre de cas	Valeur	Diff avec et sans piéton
Semaine Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	12,54	0,00	7,63	####	0,00	5,68	0,74	4,22	7,14		Aucun piéton	12893	63	-
		Hyp de variances			6,86	411	0,00	5,68	0,83	4,05	7,31	0,35	Présence	393	57	6
Semaine Nuit	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	7,86	0,01	4,51	2300	0,00	14,03	3,11	7,93	20,13		Aucun piéton	2288	70	-
		Hyp de variances			2,81	13	0,00	14,03	4,99	3,25	24,81	0,75	Présence	14	56	14
Weekend Début et fin de journée Weekend	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	5,06	0,03	9,16	5128	0,00	8,14	0,89	6,40	9,88		Aucun piéton	4927	69	-
		Hyp de variances			8,14	215	0,00	8,14	1,00	6,17	10,11	0,58	Présence	203	60	8
Semaine Journée	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	30,81	0,00	13,11	####	0,00	10,10	0,77	8,59	11,61		Aucun piéton	10618	66	-
		Hyp de variances			11,04	344	0,00	10,10	0,91	8,30	11,89	0,62	Présence	331	56	10
Weekend Nuit	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	3,29	0,07	1,16	902	0,25	6,50	5,58	-4,46	17,46		Aucun piéton	898	72	7
		Hyp de variances			0,68	5	0,53	6,50	9,59	####	31,12		Présence	6	65	-

Par contre, nous observons dans les situations avec suivi en contexte rural à 70 km/h un effet plus important de la présence de piétons allant de 7 à 10 km/h pour les sections avec des effectifs importants. Nous pouvons aussi remarquer que la vitesse moyenne est dans la plupart des situations proches de 56 km/h lors de la présence de piétons soit 14 km/h de moins que la vitesse limite. Nous n'avons pas mis en évidence de réduction de vitesse significatives les nuits.de weekend.

En conclusion, dans les sections rurales à 70 km/h, nous constatons d'importantes différences de vitesse dans les situations de suivi (7 à 10 km/h) avec 14 km/h de moins que la VMA la plupart du temps soit 56 km/h. Nous n'avons pas pu mettre en exergue à un effet important de la présence de piétons dans les situations sans suivi.

Tableau 11 : Test statistique sur la présence de piétons en section courante en contexte rural à 90 km/h avec suivi

Situation Rurale à 90 km/h avec suivi	Critère		Test de Levene sur l'égalité des		Test t pour égalité des moyennes							Effet	Vitesse Moyenne			
			F	Sig.	t	ddl	Sig. (bilat)	Diff moy	Diff erreur stan	Intervalle de confiance 95 Inf.	Intervalle de confiance 95 Sup.	G de Hedge	Situation	Nombre de cas	Valeur	Diff avec et sans piéton
Semaine Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	93,44	0,00	17,43	####	0,00	10,98	0,63	9,75	12,22		Aucun piéton	57696	74	-
		Hyp de variances			14,07	687	0,00	10,98	0,78	9,45	12,51	0,54	Présence	678	63	11
Weekend Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	2,06	0,15	5,41	####	0,00	6,81	1,26	4,34	9,28	0,47	Aucun piéton	11297	78	7
		Hyp de variances			5,06	135	0,00	6,81	1,35	4,15	9,47		Présence	133	71	-
Semaine Journée	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	52,60	0,00	20,92	####	0,00	11,66	0,56	10,57	12,76		Aucun piéton	43342	78	-
		Hyp de variances			17,53	742	0,00	11,66	0,67	10,36	12,97	0,66	Présence	726	67	12
Semaine Nuit Weekend Nuit	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	2,28	0,13	4,81	####	0,00	12,91	2,68	7,64	18,17	0,86	Aucun piéton	13473	82	13
		Hyp de variances			4,28	30	0,00	12,91	3,02	6,75	19,07		Présence	31	69	-
Weekend Journée	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	13,62	0,00	15,15	####	0,00	12,78	0,84	11,13	14,44		Aucun piéton	14823	78	-
		Hyp de variances			13,39	311	0,00	12,78	0,95	10,91	14,66	0,78	Présence	302	65	13

Dans les situations rurales à 90 km/h avec suivi, nous observons des vitesses moyennes de 78 km/h dans tous les contextes sans piétons sauf en période chargée (74 km/h) et la nuit (82 km/h). La présence de piétons a un effet assez important (G de Hedge de 0,47 à 0,86) produisant des réductions de vitesse de 11 à 15 km/h. Les vitesses pratiquées lors de la présence de piétons sont de l'ordre de 65 km/h.

Tableau 12 : Test statistique sur la présence de piétons en section courante en contexte rural à 90 km/h sans suivi

Situation Rurale à 90 km/h sans suivi	Critère		Test de Levene sur l'égalité des		Test t pour égalité des moyennes							Effet	Vitesse Moyenne			
			F	Sig.	t	ddl	Sig. (bilat)	Diff moy	Diff erreur stan	Intervalle de confiance 95 Inf.	Intervalle de confiance 95 Sup.	G de Hedge	Situation	Nombre de cas	Valeur	Diff avec et sans piéton
Weekend Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	9,36	0,00	5,44	9663	0,00	8,42	1,55	5,39	11,45		Aucun piéton	9560	78	-
		Hyp de variances			4,53	106	0,00	8,42	1,86	4,73	12,10	0,44	Présence	105	69	8
Semaine Journée	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	54,20	0,00	16,72	####	0,00	12,38	0,74	10,93	13,83		Aucun piéton	29554	77	-
		Hyp de variances			13,61	441	0,00	12,38	0,91	10,59	14,17	0,66	Présence	434	65	12
Semaine Début et fin de journée	Moyenne de la	Hyp de variances	19,57	0,00	8,90	####	0,00	7,51	0,84	5,86	9,17		Aucun piéton	28491	75	-
		Hyp de variances			7,75	306	0,00	7,51	0,97	5,61	9,42	0,45	Présence	302	68	8
Semaine Nuit Weekend Nuit	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	1,06	0,30	3,41	####	0,00	9,65	2,83	4,11	15,20	0,63	Aucun piéton	20004	80	10
		Hyp de variances			3,15	28	0,00	9,65	3,06	3,38	15,92		Présence	29	70	-
Weekend Journée	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	4,54	0,03	10,70	####	0,00	9,47	0,89	7,73	11,21		Aucun piéton	15364	77	-
		Hyp de variances			10,01	341	0,00	9,47	0,95	7,61	11,33	0,56	Présence	330	67	9

Dans les situations rurales à 90 km/h sans suivi, nous observons des vitesses moyennes de 77-78 km/h dans tous les contextes sans piétons sauf en période chargée (75 km/h) et la nuit (80 km/h). La présence de piétons a un effet moyen (G de Hedge de 0,44 à 0,63) produisant des réductions de vitesse de 7 à 12 km/h. Les vitesses pratiquées lors de la présence de piétons sont de l'ordre de 68 km/h

En conclusion dans les sections rurales à 90 km/h, la présence de piétons induit des baisses importantes de la vitesse de l'ordre de 10 km/h avec des vitesses entre 63 et 69 km/h.

Tableau 13 : Test statistique sur la présence de piétons en section courante en contexte urbain à 70 km/h avec suivi

Situation urbaine à 70 km/h avec suivi	Critère		Test de Levene sur l'égalité des		Test t pour égalité des moyennes							Effet	Vitesse Moyenne			
										Intervalle de confiance 95							
			F	Sig.	t	ddl	Sig. (bilat)	Diff moy	Diff erreur stan	Inf.	Sup.	G de Hedge	Situation	Nombre de cas	Valeur	Diff avec et sans piéton
Semaine Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	0,02	0,90	3,09	3080	0,00	2,95	0,95	1,08	4,81	0,25	Aucun piéton	2915	60	3
		Hyp de variances			3,15	186	0,00	2,95	0,93	1,10	4,79		Présence	167	57	-
Semaine Nuit Weekend Nuit	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	0,00	0,95	2,61	746	0,01	20,39	7,82	5,03	35,75	1,85	Aucun piéton	746	65	20
		Hyp de variances			2,50	1	0,24	20,39	8,15	####	122,69		Présence	2	44	-
Weekend Début et fin de journée Weekend	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	5,26	0,02	4,38	1295	0,00	6,57	1,50	3,62	9,51		Aucun piéton	1232	63	-
		Hyp de variances			3,57	68	0,00	6,57	1,84	2,89	10,24	0,45	Présence	65	57	7
Semaine Journée	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	0,08	0,78	3,29	3010	0,00	3,08	0,94	1,24	4,91	0,27	Aucun piéton	2850	61	3
		Hyp de variances			3,29	180	0,00	3,08	0,94	1,23	4,92		Présence	162	58	-

Dans les situations avec suivi en contexte urbain à 70 km/h, la seule situation avec un G de Hedge important (G de Hedge =1.85) est calculée avec très peu de sections avec piétons (2 cas) donc nous ne pouvons pas la retenir. Une seule situation a un effet modéré (0,45 le weekend) avec une réduction de 7 km/h. Pour les autres situations un faible effet de la présence de piétons est constaté (G de Hedge inférieur à 0.25) car soit la différence de vitesse est limitée (3 km/h) soit l'effectif est faible (2 sections). Les vitesses pratiquées sont de l'ordre de 63 km/h en suivi sans piétons et 57 km/h avec piétons.

Tableau 14 : Test statistique sur la présence de piétons en section courante en contexte urbain à 70 km/h sans suivi

Situation urbaine à 70 km/h sans suivi	Critère		Test de Levene sur l'égalité des		Test t pour égalité des moyennes							Effet	Vitesse Moyenne			
										Intervalle de confiance 95							
			F	Sig.	t	ddl	Sig. (bilat)	Diff moy	Diff erreur stan	Inf.	Sup.	G de Hedge	Situation	Nombre de cas	Valeur	Diff avec et sans piéton
Semaine Début et fin de journée Weekend	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	0,55	0,46	1,91	2286	0,06	1,94	1,01	-0,05	3,93		Aucun piéton	2191	66	2
		Hyp de variances			2,13	107	0,04	1,94	0,91	0,14	3,74		Présence	97	64	-
Semaine Nuit Weekend Nuit	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	1,95	0,16	0,34	778	0,74	2,49	7,43	####	17,08		Aucun piéton	778	68	2
		Hyp de variances			2,03	1	0,26	2,49	1,23	-7,85	12,83		Présence	2	66	-

Nous n'avons pas observé dans les situations sans suivi en contexte urbain à 70 km/h d'effet de la présence de piétons (test non significatifs) car soit la différence de vitesse est limitée (2 km/h) soit l'effectif est faible (2 sections). Les vitesses pratiquées sont de l'ordre de 66 km/h sans suivi.

En conclusion, dans les sections urbaines à 70 km/h, nous n'avons pas assez de données pour mettre en exergue un effet important de la présence de piétons. Sans suivi, les vitesses pratiquées sont de l'ordre de 66 km/h avec ou sans piétons. En suivi, les vitesses pratiquées de l'ordre de 63 km/h sans piétons et 57km/h avec piétons.

Tableau 15 : Test statistique sur la présence de piétons en section courante en contexte urbain à 50 km/h avec suivi

Situation urbaine à 50 km/h avec suivi	Critère		Test de Levene sur l'égalité des		Test t pour égalité des moyennes							Effet	Vitesse Moyenne			
			F	Sig.	t	ddl	Sig. (bilat)	Diff moy	Diff erreur stan	Intervalle de confiance 95 Inf.	Intervalle de confiance 95 Sup.	G de Hedge	Situation	Nombre de cas	Valeur	Diff avec et sans piéton
Semaine Début et fin de journée Semaine	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	####	0,00	59,06	####	0,00	9,89	0,17	9,56	10,22		Aucun piéton	29722	50	-
		Hyp de variances			69,49	####	0,00	9,89	0,14	9,61	10,17	0,91	Présence	7170	40	10
Semaine Nuit	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	6,63	0,01	6,78	3779	0,00	8,84	1,30	6,28	11,40		Aucun piéton	3671	51	-
		Hyp de variances			8,81	121	0,00	8,84	1,00	6,86	10,83	0,85	Présence	110	42	9
Weekend Début et fin de journée Weekend	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	80,34	0,00	28,52	8799	0,00	9,55	0,33	8,89	10,20		Aucun piéton	7087	50	-
		Hyp de variances			33,08	3214	0,00	9,55	0,29	8,98	10,11	0,89	Présence	1714	40	10
Weekend Nuit	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	5,89	0,02	3,52	1358	0,00	8,50	2,42	3,76	13,24		Aucun piéton	1331	50	-
		Hyp de variances			4,95	31	0,00	8,50	1,72	4,99	12,00	0,93	Présence	29	41	8

En sections urbaines avec suivi à 50 km/h, nous avons observé un effet important (G de Hedge 0.85 à 0.93) avec une réduction de 10km/h en présence de piétons par rapport aux vitesses pratiquées sans piétons et la vitesse maximale autorisée.

Tableau 16 : Test statistique sur la présence de piétons en section courante en contexte urbain à 50 km/h sans suivi

Situation urbaine à 50 km/h sans suivi	Critère		Test de Levene sur l'égalité des		Test t pour égalité des moyennes							Effet	Vitesse Moyenne			
			F	Sig.	t	ddl	Sig. (bilat)	Diff moy	Diff erreur stan	Intervalle de confiance 95 Inf.	Intervalle de confiance 95 Sup.	G de Hedge	Situation	Nombre de cas	Valeur	Diff avec et sans piéton
Semaine Début et fin de journée Weekend Nuit	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	72,46	0,00	17,08	####	0,00	7,60	0,44	6,73	8,47		Aucun piéton	11766	53	-
		Hyp de variances			20,46	1167	0,00	7,60	0,37	6,87	8,33	0,70	Présence	931	46	8
Semaine Nuit	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	0,06	0,81	2,11	5411	0,04	3,70	1,75	0,27	7,13	0,29	Aucun piéton	5361	54	4
		Hyp de variances			2,11	52	0,04	3,70	1,75	0,18	7,22		Présence	52	50	-
Weekend Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	18,45	0,00	6,41	2520	0,00	6,57	1,02	4,56	8,58		Aucun piéton	2340	52	-
		Hyp de variances			8,19	234	0,00	6,57	0,80	4,99	8,15	0,63	Présence	182	46	7
Semaine Journée Weekend Journée	Moyenne de la vitesse sur le segment	Hyp de variances	68,41	0,00	20,71	####	0,00	7,02	0,34	6,36	7,68		Aucun piéton	11939	52	-
		Hyp de variances			23,70	2267	0,00	7,02	0,30	6,44	7,60	0,63	Présence	1605	45	7

En sections urbaines sans suivi à 50 km/h, nous avons observé la journée et le weekend un effet modéré (G de Hedge 0.63 à 0.70) avec une réduction en présence de piétons de 6-7km/h par rapport à la vitesse pratiqué et de 4-5 km/h par rapport la vitesse maximale autorisée. La nuit en semaine, l'effet est faible (0.29) avec une vitesse égale à la VMA en présence de piéton.

En conclusion, en sections urbaines à 50 km/h, les vitesses pratiquées sont plus basses en présence de piétons de l'ordre de à 4 à 8 km/h en dessous de la valeur de la VMA.

4.5 Analyse des intersections observées en situation naturelle

4.5.1 Sélection des situations à tester

La première étape de cette analyse est d'identifier les vitesses limites pour lesquelles nous avons assez de données pour faire nos analyses. Le Tableau 17 montre que nous avons assez de données en urbain avec une vitesse limite de 30, 50 et 70 km/h et en milieu rural avec une vitesse limite de 70 et 90 km/h.

Tableau 17 : Nombre de situations par type de route et de vitesse limite en intersection

		Type de route	
		Urbaine	Rurale
Vitesse maximale autorisée	30	106114	923
	50	621423	8896
	70	34212	90430
	90	1993	268327
	110	138	64
	130	73	18

De même que pour les sections droites nous avons recherché l'effet des arrêts sur la vitesse moyenne à l'aide d'un arbre de décision qui montre que le premier niveau de classification est le contexte rural ou urbain (Figure 61) avec une moyenne des vitesses proches de 64 km/h en milieu rural pour 37 km/h en urbain.

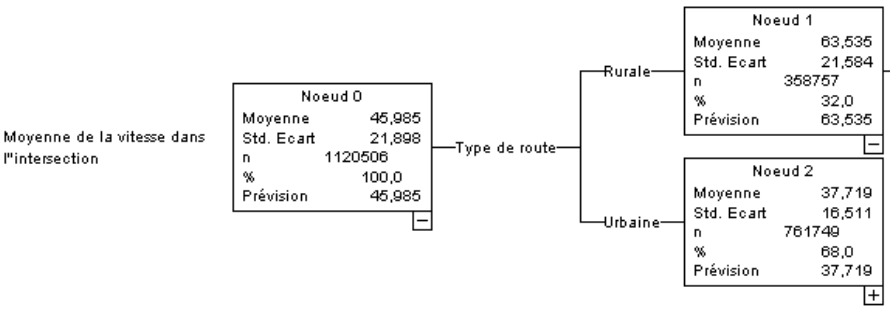


Figure 64 : Premier niveau de l'arbre de décision complet des intersections avec arrêt

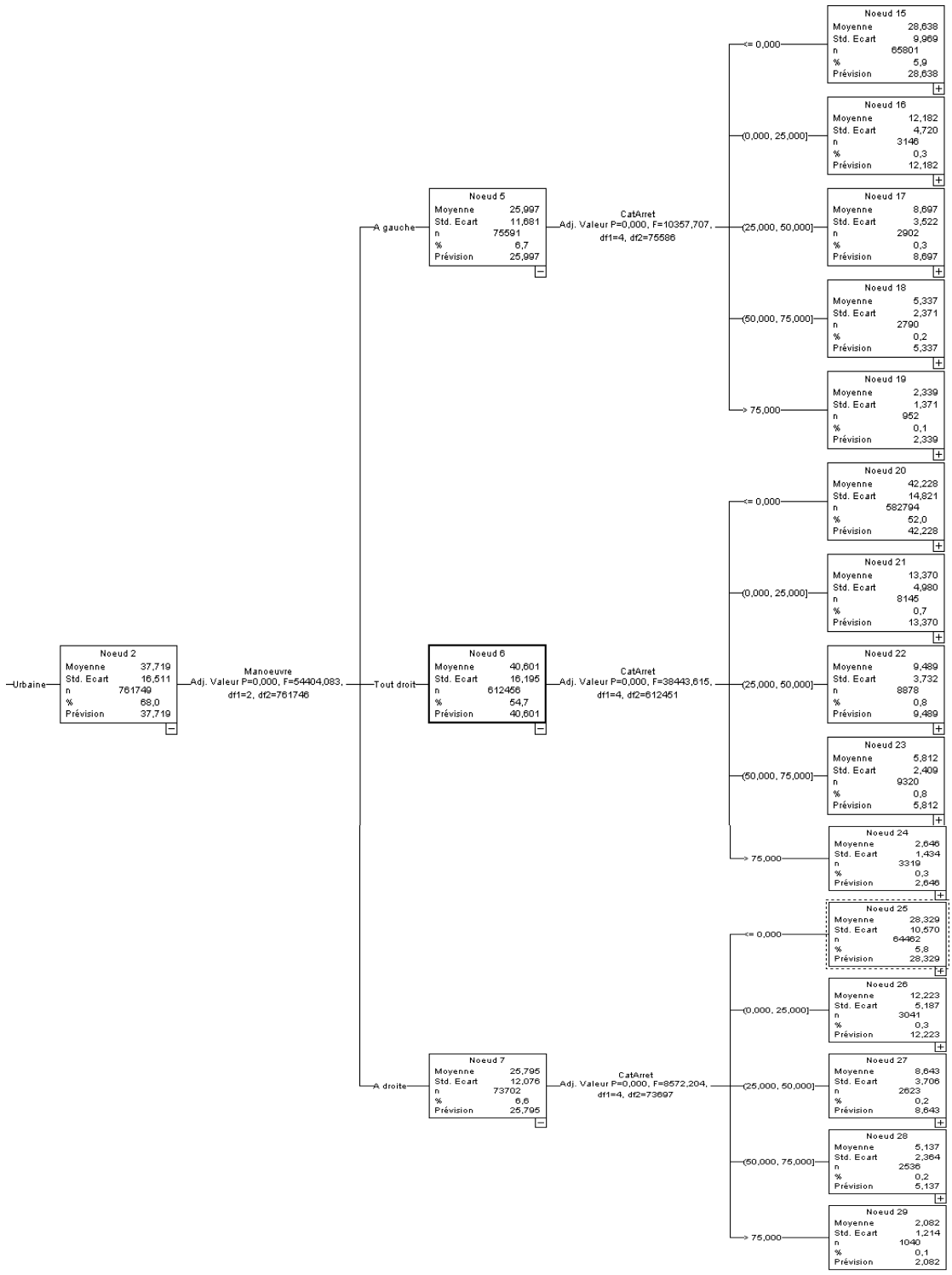


Figure 65 : développement du nœud 2 de l'arbre de décision des intersections avec arrêt en urbain

Puis, en urbain (Figure 62), le fait qu'il y ai une manoeuvre induit une moyenne de 25 km/h par rapport à une traversée sans manoeuvre (40 km/h). La présence des arrêts lors des manoeuvres induit une moyenne de 2 à 12 km/h contre 28 km/h sans arrêt. De même sans manoeuvre, la présence des arrêts induit une moyenne de 2 à 13 km/h contre 42 km/h sans arrêt.

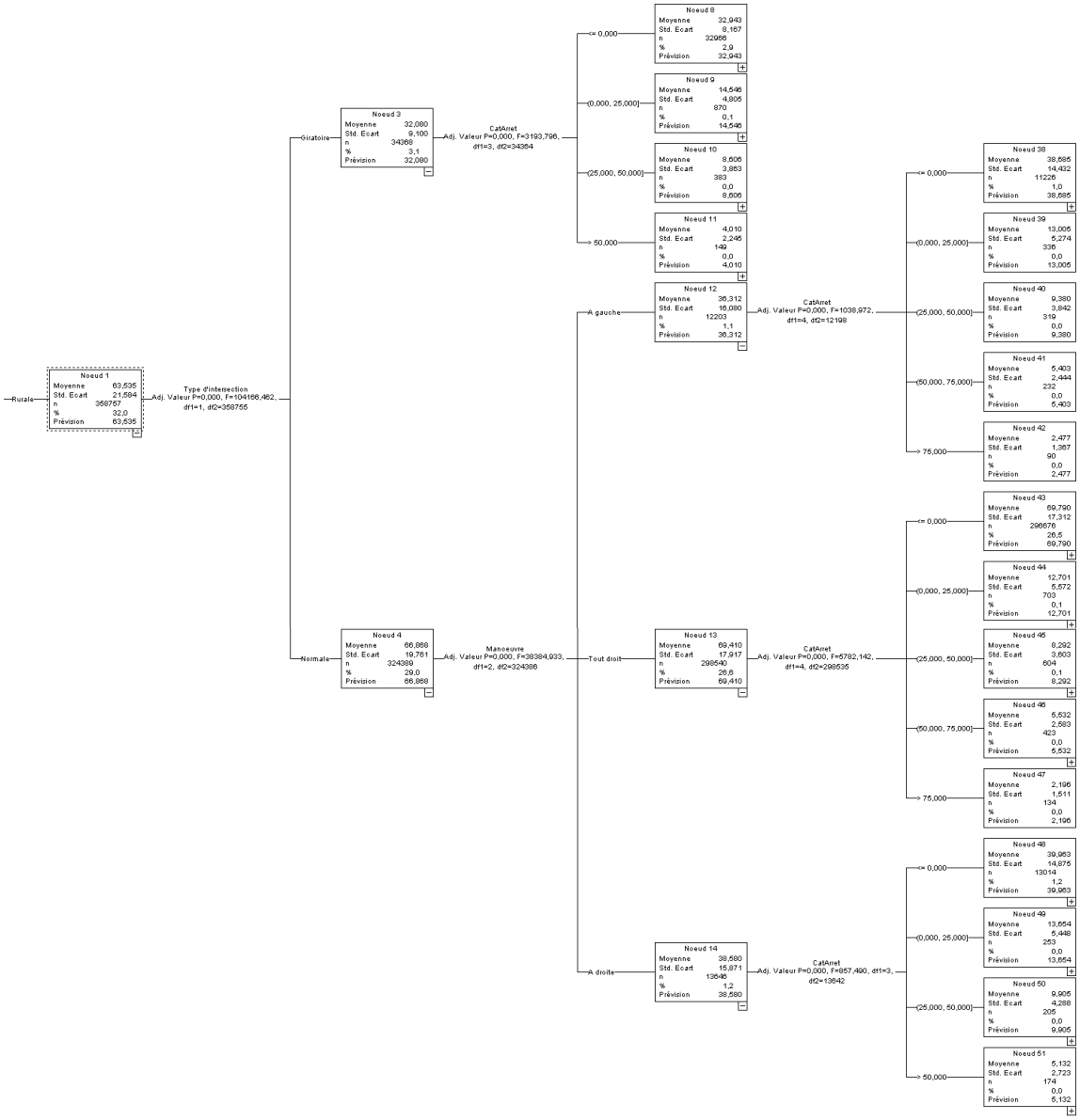


Figure 66 : développement du nœud 1 de l'arbre de décision des intersections avec arrêt en milieu rural

En rural (Figure 63Figure 62), le prermier critère est le type d'intersection. Le fait qu'il y ait un carrefour giratoire induit une moyenne de 32 km/h par rapport à une intersection sans giratoire (67 km/h). Puis dans les giratoires, la présence des arrêts induit une moyenne de 4 à 15 km/h contre 33 km/h sans arrêt. Par contre dans les intersections sans giratoire, le critère de classification est la manœuvre. Avec manoeuvre, la présence des arrêts induit une moyenne de 2 à 13 km/h contre 39 km/h sans arrêt et sans manoeuvre, la présence des arrêts induit une moyenne de 2 à 13 km/h contre 70 km/h sans arrêt.

Tableau 18 : Moyenne des vitesses observées en fonction du type de route et des VMA sur les intersections

		Piéton sur le segment	
		Aucun piéton	Présence piéton
Rural	70 km/h	60 km/h	58 km/h
	90 km/h	66 km/h	54 km/h
Urbain	30 km/h	34 km/h	28 km/h
	50 km/h	41 km/h	34 km/h
	70 km/h	54 km/h	47 km/h

L'analyse des vitesses pratiquées avec et sans piétons en urbain dans les zones à 30 km/h étant proches ou supérieures à la VMA (Tableau 18), nous n'analyserons pas ce cas car il ne sera pas possible de faire des recommandations supplémentaires autre que de respecter la VMA.

En analysant le nombre de données disponibles par catégorie (Tableau 19), nous avons détecté qu'il y avait très peu de cas avec des piétons la nuit sauf en urbain quand le conducteur allait tout droit. Nous avons donc supprimé les données de nuit pour l'analyse générale.

Tableau 19 : Récapitulatif des observations avec et sans piétons dans les intersections

		Type de route							
		Rurale				Urbaine			
		Direction				Direction			
		Tout droit		Tourne		Tout droit		Tourne	
		Type d'intersection		Type d'intersection		Type d'intersection		Type d'intersection	
Créneau horaire	Présence piéton	Normale	Giratoire	Normale	Giratoire	Normale	Giratoire	Normale	Giratoire
Semaine Nuit (20-6h)	Aucun	16476	1253	782	407	26082	1727	3996	1240
	Présence	8	1	4	1	89	1	17	8
Semaine Début et fin de journée (7-9h et 17-19h)	Aucun	120505	9367	10328	4314	166519	19408	28193	12703
	Présence	2584	232	413	139	22600	1754	5313	1252
Semaine Journée (10-16h)	Aucun	83103	6733	6046	3103	111558	13182	17959	9063
	Présence	2411	249	462	124	27378	1878	5684	1336
Weekend Nuit (20-6h)	Aucun	5781	349	377	147	10232	643	1547	407
	Présence	9	3	1	0	35	5	7	3
Weekend Début et fin de journée (7-9h et 17-19h)	Aucun	28721	2060	2050	884	35648	3216	5756	2029
	Présence	751	65	147	32	4352	303	896	187
Weekend Journée (10-16h)	Aucun	34946	2251	3356	1098	43508	4136	6697	2624
	Présence	1381	91	274	63	9901	553	2173	403

Le processus de sélection nous permet d'avoir 896445 observations en intersection à analyser (Tableau 20).

Tableau 20 : Récapitulatif des observations utilisées pour l'analyse des intersections

Type de route	Vitesse limite autorisée	Nombre
Rural	70 km/h	82601
	90 km/h	245682
	Total rural	328283
Urbain	50 km/h	536965
	70 km/h	31197
	Total Urbain	568162
	Total général	896445

4.5.2 Création des groupes de situations homogènes

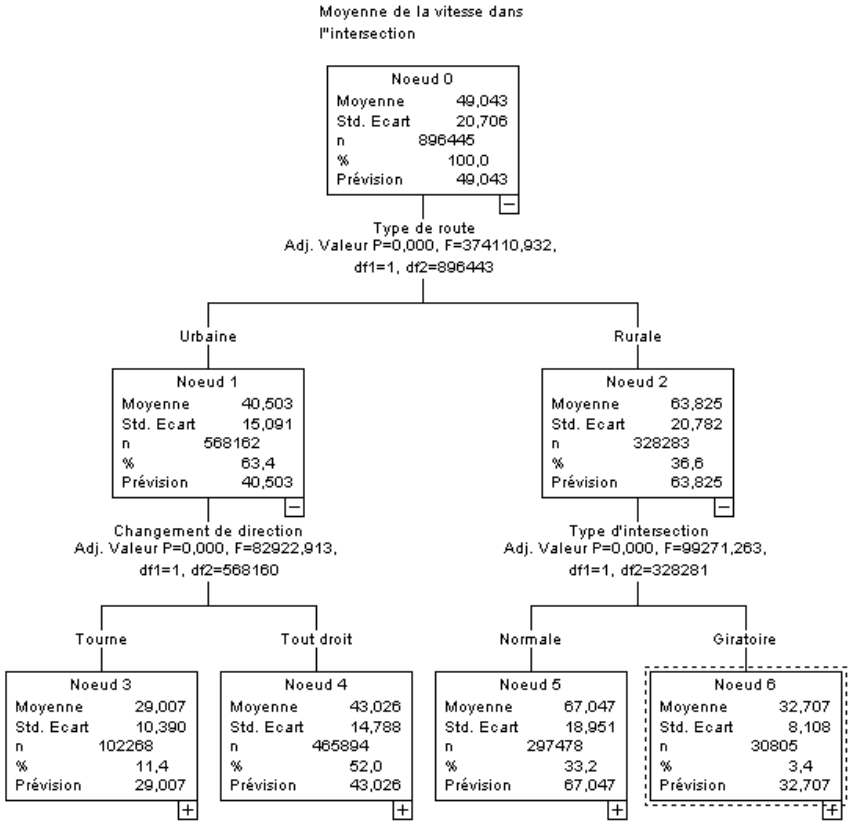


Figure 67 : Trois premiers niveaux de l'arbre de décision complet des intersections

Une fois les intersections sélectionnées, un nouvel arbre de décision (Figure 64) a permis de les classifier. Le premier niveau les sépare en deux groupes, rurales (40 km/h) ou urbaines (64 km/h). Au deuxième niveau, ces groupes sont alors séparés à nouveau en deux, urbaines avec manœuvre (nœud 3 : 29 km/h) ou sans (nœud 4 : 43 km/h), et rurales avec giratoire (nœud 6 : 33 km/h) ou sans (nœud 5 : 67 km/h). Chacun de ces 4 nœuds est décrit dans les figures suivantes.

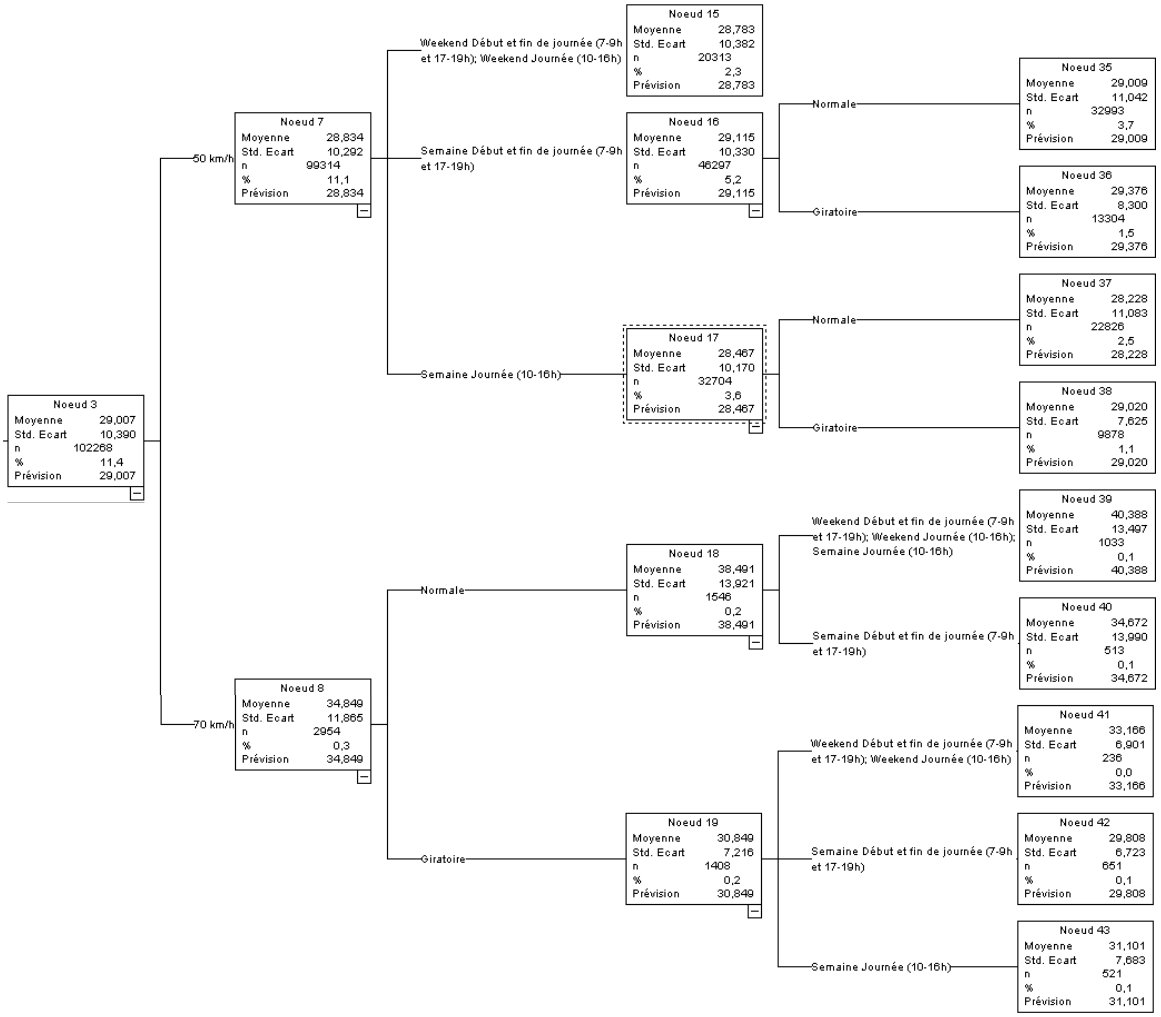


Figure 68 : Développement du nœud 3 de l'arbre de décision des intersections en urbain avec changement de direction

Pour les intersections urbaines avec manœuvre (Figure 65), le premier critère utilisé pour séparer les groupes est la VMA qui induit une différence des moyennes de près de 6 km/h (29 km/h pour la VMA de 50 km/h et 35 km/h pour la VMA de 70 km/h). Lorsque la VMA est à 50 km/h les critères de séparation suivants (créneau horaire et giratoire) induisent des différences de moyennes très fables (1 km/h). Par contre, lorsque la VMA est à 70 km/h, le critère Giratoire induit une différence de près de 7 km/h (38 km/h sans giratoire contre 31 km/h avec giratoire). Puis au niveau suivant, le critère créneau horaire induit une différence de 5 km/h dans les intersections urbaines sans giratoire entre les heures de pointe en semaine (35 km/h) et les autres situations (40 km/h) et une différence de 2-3 km/h dans les intersections urbaines avec giratoire entre la semaine (30-31 km/h) et le weekend (33 km/h).

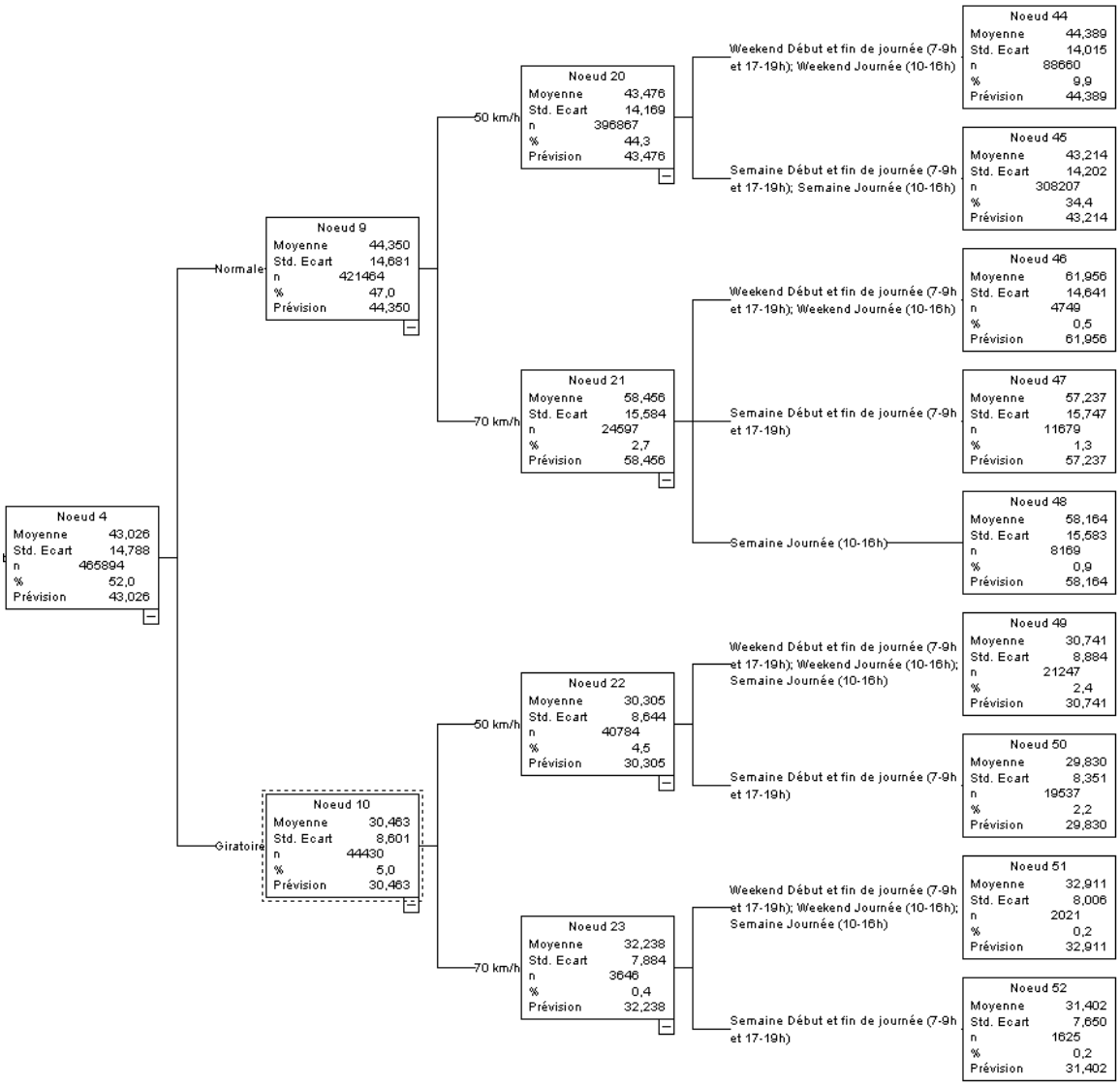


Figure 69 : Développement du nœud 4 de l'arbre de décision des intersections en urbain sans changement de direction

Pour les intersections urbaines sans manœuvre (Figure 66), le premier critère utilisé pour séparer les groupes est le type d'intersection qui induit une différence des moyennes de près de 14 km/h (30 km/h pour les giratoire et 44 km/h sans giratoire). Le deuxième critère est la VMA qui induit des différences de vitesse très faibles dans les giratoires (30 km/h à 50 km/h versus 32 km/h à 70 km/h) et beaucoup plus importantes dans les intersections sans giratoire (43 km/h à 50 km/h versus 58 km/h à 70 km/h). Dans les giratoires, le troisième critère est le créneau horaire qui n'induit pas de grosse différence de moyenne de vitesse (1 km/k avec VMA est à 50 km/h et 2 km/h avec VMA à 70 km/h). Dans les intersections sans giratoire le troisième critère est aussi le créneau horaire qui n'induit pas de grosse différence de moyenne de vitesse (1 km/k) lorsque la VMA est à 50 km/h mais un peu plus (4 km/h) avec une VMA à 70 km/h entre la semaine (57-58 km/h) et le weekend (61 km/h).

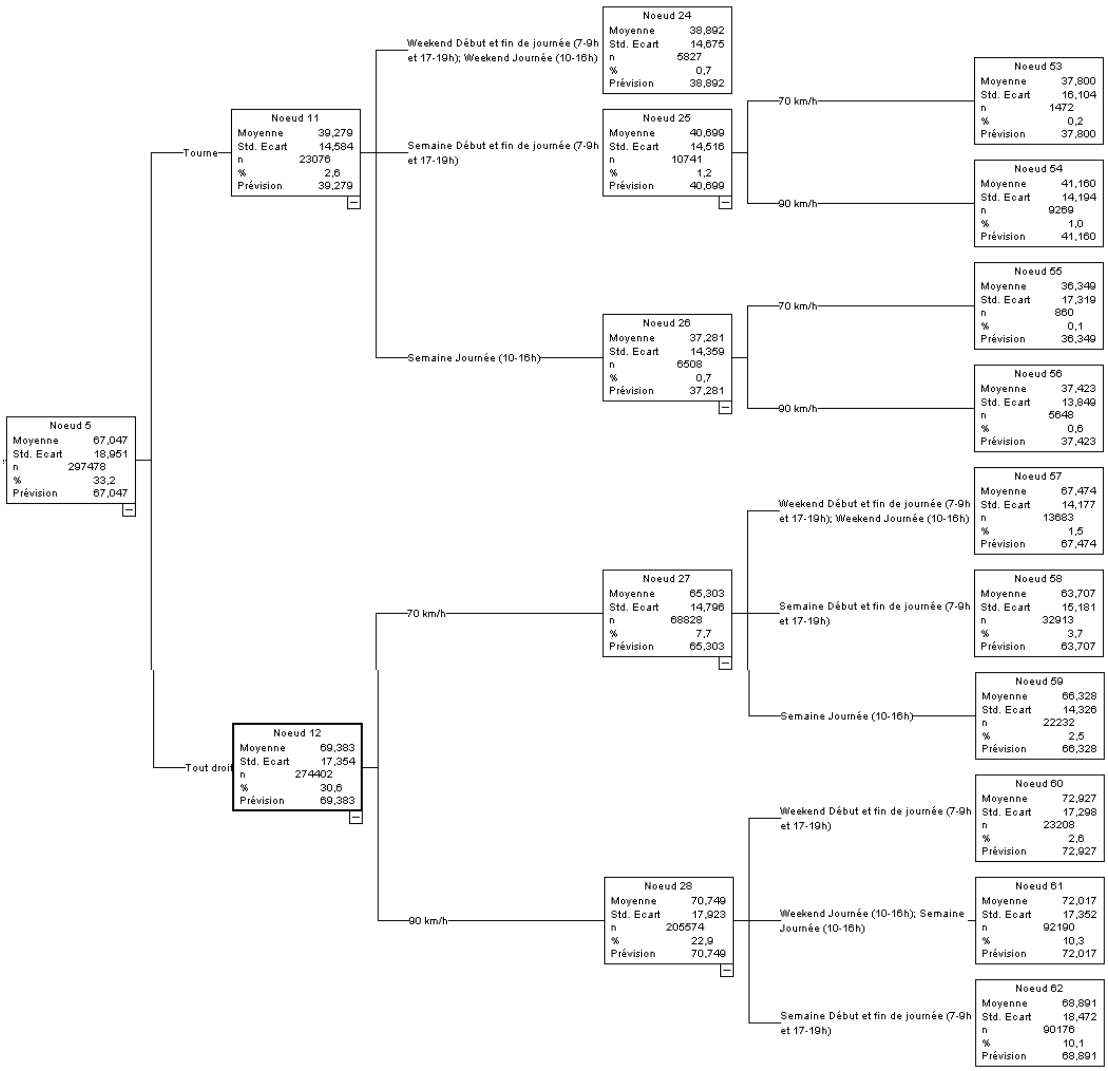


Figure 70 : Développement du nœud 5 de l'arbre de décision des intersections pour celles autres que les giratoires en milieu rural

Pour les intersections rurales sans giratoire (Figure 67), le premier critère utilisé pour séparer les groupes est la présence de manœuvre qui induit une différence des moyennes de près de 30 km/h (39 km/h avec manœuvre et 69 km/h sans). Lorsqu'il y a une manœuvre, les critères de séparation suivants (créneau horaire et VMA) induisent des différences de moyennes faibles (1-3 km/h). Par contre, lorsqu'il n'y a pas de manœuvre, le critère VMA induit une différence de 6 km/h (65 km/h avec une VMA de 70 km/h et 71km/h pour une VMA de 90 km/h). Puis au niveau suivant, le critère créneau horaire induit une différence de 3-4 km/h avec une VMA à 70 km/h entre les heures de pointe en semaine (64 km/h avec une VMA à 70 km/h et 69 km/h avec une VMA à 90 km/h) et les autres situations (66-67 km/h avec une VMA à 70 km/h et 72-73 km/h avec une VMA à 90 km/h).

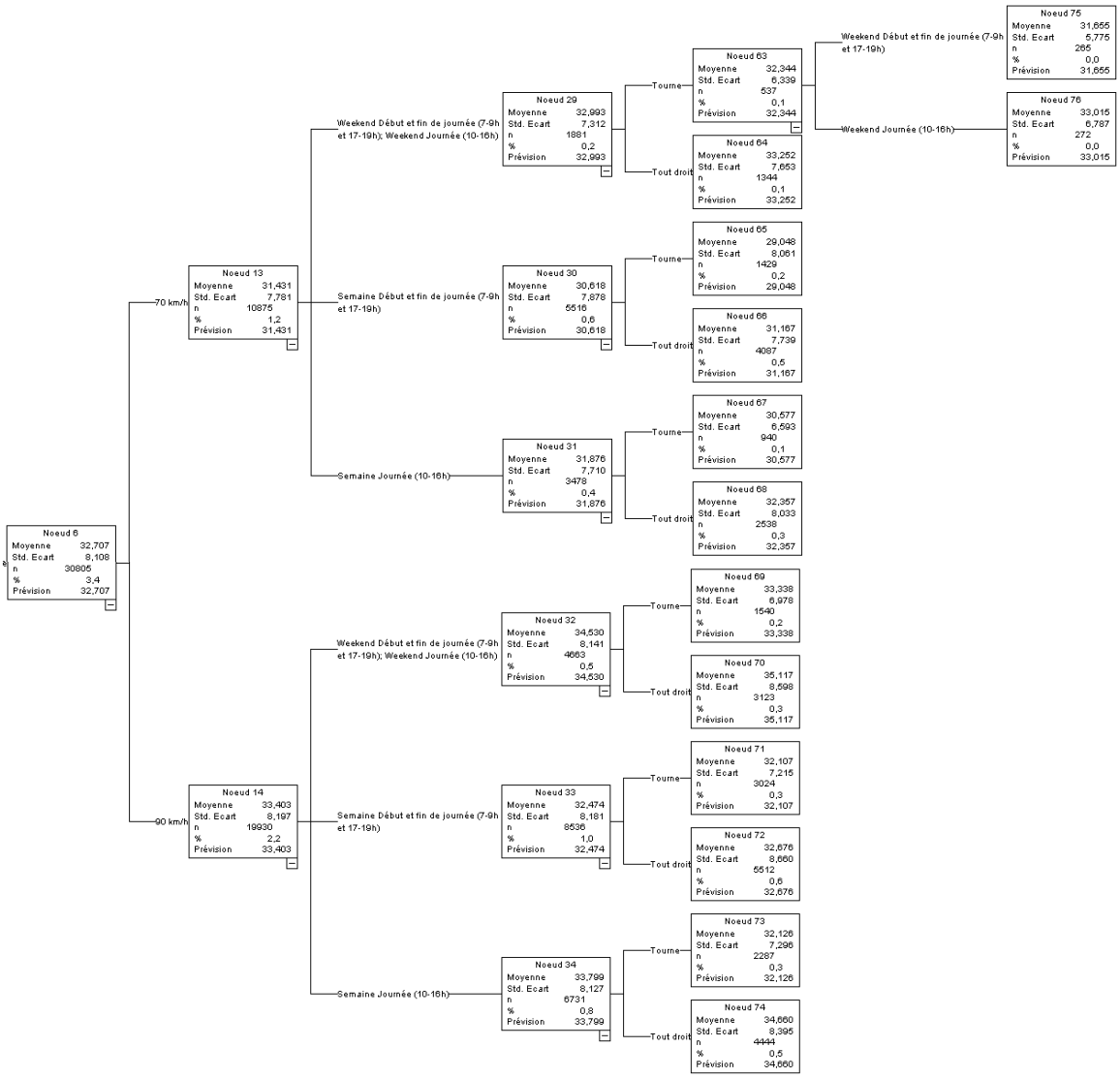


Figure 71 : développement du nœud de l'arbre de décision des intersections pour les giratoires en milieu rural

Pour les intersections rurales avec giratoire (Figure 68), le premier critère utilisé pour séparer les groupes est la VMA qui induit une différence des moyennes très faible de 2 km/h (31 km/h avec une VMA de 70 km/h et 33 km/h avec une VMA de 90 km/h). Les autres critères de créneau horaire et de manœuvre n'induisent pas de différence plus importante.

4.5.3 Analyse de l'impact de la présence des piétons dans les groupes de situations homogènes

Tableau 21 : Test statistique sur la présence de piétons en intersection en contexte urbain à 50 km/h avec manœuvre

Urbaine Tourne VMA = 50 km/h			Test de Levene sur l'égalité des variances		Test t pour égalité des moyennes							Effet	Vitesse Moyenne			
										Intervalle de confiance 95						
			F	Sig.	t	ddl	Sig. (bilat)	Diff moy	Diff erreur standard	Inf.	Sup.	G de Hedge	Situation	Nombre de cas	Valeur	Diff avec et sans piéton
Weekend	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	85,86	0,00	22,38	20311	0,00	4,20	0,19	3,83	4,57		Aucun piéton	16681	29,53	-
		Hyp de variances inégales			24,35	5879	0,00	4,20	0,17	3,86	4,54	0,45	Présence piéton	3632	25,33	4
Semaine Début et fin de journée Sans giratoire	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	260,06	0,00	31,03	32991	0,00	5,06	0,16	4,74	5,38		Aucun piéton	27693	29,82	-
		Hyp de variances inégales			34,63	8366	0,00	5,06	0,15	4,78	5,35	0,52	Présence piéton	5300	24,76	5
Semaine Début et fin de journée Giratoire	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	7,80	0,01	15,00	13302	0,00	3,70	0,25	3,22	4,19		Aucun piéton	12080	29,72	-
		Hyp de variances inégales			16,14	1535	0,00	3,70	0,23	3,25	4,15	0,48	Présence piéton	1224	26,01	4
Semaine Journée Sans giratoire	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	296,38	0,00	30,73	22824	0,00	5,12	0,17	4,79	5,45		Aucun piéton	17182	29,49	-
		Hyp de variances inégales			33,57	11333	0,00	5,12	0,15	4,82	5,42	0,52	Présence piéton	5644	24,37	5
Semaine Journée Giratoire	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	1,01	0,32	14,51	9876	0,00	3,24	0,22	2,80	3,68	0,43	Aucun piéton	8559	29,45	3
		Hyp de variances inégales			14,75	1770	0,00	3,24	0,22	2,81	3,67		Présence piéton	1319	26,21	-

Dans les intersections urbaines avec manœuvre et VMA de 50 km/h (Tableau 21), nous avons noté un effet faible de la présence de piétons (G de Hedge de 0,43 à 0,52) induisant des réductions de vitesse de 3 km/h dans les giratoires et de 5km/h dans les autres intersections et une vitesse moyenne de l'ordre de 25-26 km/h avec piétons versus 29-30 km/h sans piéton.

Tableau 22 : Test statistique sur la présence de piétons en intersection en contexte urbain à 70 km/h avec manœuvre

Urbaine Tourne VMA = 70 km/h_			Test de Levene sur l'égalité des variances		Test t pour égalité des moyennes							Effet	Vitesse Moyenne			
										Intervalle de confiance 95						
			F	Sig.	t	ddl	Sig. (bilat)	Diff moy	Diff erreur standard	Inf.	Sup.	G de Hedge	Situation	Nombre de cas	Valeur	Diff avec et sans piéton
Sans giratoire Weekend et Semaine Journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	2,31	0,13	7,45	1031	0,00	13,94	1,87	10,27	17,62	1,06	Aucun piéton	981	41,09	14
		Hyp de variances inégales			8,17	58	0,00	13,94	1,71	10,52	17,36		Présence piéton	52	27,15	-
Sans giratoire Semaine Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	9,19	0,00	3,18	511	0,00	12,40	3,90	4,75	20,06		Aucun piéton	500	34,99	-
		Hyp de variances inégales			5,97	15	0,00	12,40	2,08	7,96	16,85	1,68	Présence piéton	13	22,58	12
Giratoire Weekend	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	1,37	0,24	1,13	234	0,26	2,07	1,84	-1,55	5,70		Aucun piéton	221	33,30	2
		Hyp de variances inégales			1,41	17	0,18	2,07	1,47	-1,02	5,17		Présence piéton	15	31,23	-

Giratoire Semaine Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	0,00	0,97	-2,05	649	0,04	-2,65	1,30	-5,20	-0,11	-0	Aucun piéton	623	29,69	- 3
		Hyp de variances inégales			-1,97	29	0,06	-2,65	1,35	-5,41	0,10		Présence piéton	28	32,35	-
Giratoire Semaine Journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	0,16	0,69	-0,49	519	0,63	-0,92	1,90	-4,65	2,80		Aucun piéton	504	31,07	- 1
		Hyp de variances inégales			-0,43	17	0,67	-0,92	2,14	-5,45	3,61		Présence piéton	17	31,99	-

En urbain à 70 km/h lors de manœuvres dans les intersections (Tableau 22), nous n'avons pas observé d'effet important de la présence de piétons dans les giratoires. Par contre, dans les autres intersections nous avons un effet très important (G de Hedge de 1.06 à 1.68) qui induit des différences de moyennes de 12 à 14 km/h avec des vitesses de l'ordre de 25 km/h.

En conclusion, lors de manœuvre dans les intersections sans giratoire en urbain, la présence de piétons induit des baisses de vitesse entre 5 et 14 km/h par rapport aux passages sans piétons et la vitesse moyenne de passage est de 25 km/h lors de la présence de piétons quelle que soit la VMA (50 ou 70 km/h). Dans les giratoires, les vitesses observées sont de l'ordre de 30 km/h avec ou sans présence de piéton.

Tableau 23 : Test statistique sur la présence de piétons en intersection hors giratoire en contexte urbain sans manouvre

Urbaine Tout droit Sans giratoire			Test de Levene sur l'égalité des variances		Test t pour égalité des moyennes							Effet	Vitesse Moyenne			
										Intervalle de confiance 95						
			F	Sig.	t	ddl	Sig. (bilat)	Diff moy	Diff erreur stand ard	Inf.	Sup.	G de Hedge	Situation	Nombre de cas	Valeur	Diff avec et sans piéton
50 km/h Weekend	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	235,97	0,00	63,87	88658	0,00	8,05	0,13	7,80	8,29		Aucun piéton	74593	45,67	-
		Hyp de variances inégales			71,98	22320	0,00	8,05	0,11	7,83	8,26	0,66	Présence piéton	14067	37,62	8
50 km/h Semaine	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	1221,20	0,00	131,36	#####	0,00	8,91	0,07	8,78	9,05		Aucun piéton	258809	44,64	-
		Hyp de variances inégales			149,05	79453	0,00	8,91	0,06	8,80	9,03	0,73	Présence piéton	49398	35,73	9
70 km/h Weekend	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	0,02	0,88	4,11	4747	0,00	4,49	1,09	2,35	6,64	0,31	Aucun piéton	4563	62,13	4
		Hyp de variances inégales			4,05	200	0,00	4,49	1,11	2,31	6,68		Présence piéton	186	57,64	-
70 km/h Semaine Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	0,03	0,87	6,01	11677	0,00	5,41	0,90	3,65	7,18	0,34	Aucun piéton	11366	57,38	5
		Hyp de variances inégales			6,19	331	0,00	5,41	0,87	3,69	7,13		Présence piéton	313	51,97	-
70 km/h Semaine Journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	0,00	0,98	5,03	8167	0,00	4,86	0,97	2,97	6,76	0,31	Aucun piéton	7902	58,32	5
		Hyp de variances inégales			4,97	284	0,00	4,86	0,98	2,94	6,79		Présence piéton	267	53,46	-

En urbain à 70 km/h sans manœuvre dans les intersections autres que giratoire (Tableau 23), nous avons un faible effet de la présence de piétons (G de Hedge de 0.31 à 0.34) qui induit des différences de moyennes de 5 km/h avec des vitesses de l'ordre de 55 km/h avec piéton. Par contre, à 50 km/h nous avons un effet important (G de Hedge de 0.66 à 0.73) qui induit des différences de moyennes de 8 km/h avec des vitesses de l'ordre de 36 km/h avec piéton.

Tableau 24 : Test statistique sur la présence de piétons en giratoire en contexte urbain sans manouvre

Urbaine Tout droit Giratoire			Test de Levene sur l'égalité des variances		Test t pour égalité des moyennes							Effet	Vitesse Moyenne			
										Intervalle de confiance 95						
			F	Sig.	t	ddl	Sig. (bilat)	Diff moy	Diff erreur standard	Inf.	Sup.	G de Hedge	Situation	Nombre de cas	Valeur	Diff avec et sans piéton
50 km/h Weekend et Semaine Journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	1,81	0,18	14,63	21245	0,00	2,70	0,18	2,34	3,06	0,31	Aucun piéton	18627	31,07	3
		Hyp de variances inégales			15,36	3512	0,00	2,70	0,18	2,35	3,04		Présence piéton	2620	28,38	-
50 km/h Semaine Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	32,75	0,00	8,12	19535	0,00	1,72	0,21	1,30	2,13		Aucun piéton	17839	29,98	-
		Hyp de variances inégales			7,64	1986	0,00	1,72	0,22	1,28	2,16	0,19	Présence piéton	1698	28,26	2
70 km/h Weekend et Semaine Journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	15,32	0,00	2,45	2019	0,01	1,89	0,77	0,38	3,40		Aucun piéton	1907	33,02	-
		Hyp de variances inégales			2,02	122	0,05	1,89	0,93	0,04	3,74	0,19	Présence piéton	114	31,13	2
70 km/h Semaine Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	1,95	0,16	0,28	1623	0,78	0,29	1,04	-1,75	2,33		Aucun piéton	1569	31,41	0
		Hyp de variances inégales			0,25	58	0,80	0,29	1,16	-2,04	2,62		Présence piéton	56	31,12	-

En urbain sans manœuvre dans les giratoires (Tableau 24), nous avons un faible effet de la présence de piétons (G de Hedge de 0.19 à 0.31) qui n'induit de différences de moyennes importantes (inférieures à 3 km/h). Nous n'avons pas observé de différence en période fort trafic (début et fin de journée en semaine). Quelles que soit la VMA et la présence ou non de piéton les vitesses sont de l'ordre de 30 km/h car elles sont contraintes par l'infrastructure.

En conclusion, lors de traversée dans les intersections sans manœuvre en urbain, la présence de piétons n'induit pas de baisse de vitesse dans les giratoires. Dans les giratoires, les vitesses observées sont de l'ordre de 30 km/h avec ou sans présence de piétons quelle que soit la VMA. Par contre, dans les autres intersections, la présence de piétons induit des baisses de vitesse entre 5 et 8 km/h. Dans ces intersections en présence de piétons la vitesse moyenne de passage est de 55 km/h lorsque la VMA est de 70 Km/h et 36 km/h lorsque la VMA est de 50 Km/h.

Tableau 25 : Test statistique sur la présence de piétons en intersection hors giratoire en contexte rurale avec manouvre

Rurale Sans giratoire Tourne			Test de Levene sur l'égalité des variances		Test t pour égalité des moyennes							Effet	Vitesse Moyenne			
			F	Sig.	t	ddl	Sig. (bilat)	Diff moy	Diff erreur standard	confiance 95 % Inf.	confiance 95 % Sup.	G de Hedge	Situation	Nombre de cas	Valeur	Diff avec et sans piéton
Weekend	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	4,25	0,04	4,36	5825	0,00	3,23	0,74	1,78	4,68		Aucun piéton	5406	39,13	-
		Hyp de variances inégales			4,64	499	0,00	3,23	0,70	1,86	4,60	0,23	Présence piéton	421	35,89	3
70 km/h Semaine Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	9,26	0,00	1,37	1470	0,17	3,67	2,68	-1,59	8,93		Aucun piéton	1435	37,89	-
		Hyp de variances inégales			1,75	39	0,09	3,67	2,09	-0,56	7,91		Présence piéton	37	34,22	4
70 km/h Semaine Journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	6,30	0,01	1,34	858	0,18	3,18	2,37	-1,48	7,84		Aucun piéton	803	36,56	-
		Hyp de variances inégales			1,46	66	0,15	3,18	2,18	-1,17	7,53		Présence piéton	57	33,38	3
90 km/h Semaine Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	0,50	0,48	8,02	9267	0,00	5,97	0,74	4,51	7,43	0,42	Aucun piéton	8893	41,40	6
		Hyp de variances inégales			8,64	413	0,00	5,97	0,69	4,61	7,33		Présence piéton	376	35,43	-
90 km/h Semaine Journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	21,17	0,00	8,72	5646	0,00	6,19	0,71	4,80	7,58		Aucun piéton	5243	37,87	-
		Hyp de variances inégales			10,07	496	0,00	6,19	0,61	4,98	7,39	0,52	Présence piéton	405	31,68	6

En milieu rural lors de manœuvres dans les intersections autres que giratoires (Tableau 25), nous avons un faible effet de la présence de piétons (G de Hedge de 0.23 le weekend et non significatifs dans les autres situations) avec une VMA de 70 km/h qui n'induit pas de différences de moyennes importantes (inférieures à 3 km/h). Par contre lorsque la VMA est de 90 km/h, l'effet est légèrement plus important (G de Hedge de 0.42 à 0.52) avec des différences de moyennes de l'ordre de 6 km/h. Quelle que soit la VMA et la présence ou non de piétons, les vitesses sont de l'ordre de 35 km/h car elles sont contraintes par la manœuvre.

Tableau 26 : Test statistique sur la présence de piétons en intersection hors giratoire en contexte rurale sans manouvre

Rurale Sans giratoire Tout droit			Test de Levene sur l'égalité des variances		Test t pour égalité des moyennes							Effet	Vitesse Moyenne			
			F	Sig.	t	ddl	Sig. (bilat)	Diff moy	Diff erreur standard	Intervalle de confiance 95 % Inf.	Intervalle de confiance 95 % Sup.	G de Hedge	Situation	Nombre de cas	Valeur	Diff avec et sans piéton
70 km/h Weekend	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	9,80	0,00	8,25	13681	0,00	5,45	0,66	4,16	6,75		Aucun piéton	13208	67,66	-
		Hyp de variances inégales			7,47	502	0,00	5,45	0,73	4,02	6,88	0,35	Présence piéton	475	62,21	5
70 km/h Semaine Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	9,39	0,00	1,71	32911	0,09	0,98	0,57	-0,14	2,10		Aucun piéton	32197	63,73	-
		Hyp de variances inégales			1,57	742	0,12	0,98	0,63	-0,25	2,21		Présence piéton	716	62,75	1
70 km/h Semaine Journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	4,21	0,04	6,47	22230	0,00	3,52	0,54	2,45	4,58		Aucun piéton	21515	66,44	-
		Hyp de variances inégales			6,81	770	0,00	3,52	0,52	2,50	4,53	0,26	Présence piéton	717	62,93	4

90 km/h Weekend Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	30,84	0,00	11,53	23206	0,00	8,33	0,72	6,91	9,74		Aucun piéton	22623	73,14	-
		Hyp de variances inégales			10,07	607	0,00	8,33	0,83	6,70	9,95	0,42	Présence piéton	585	64,81	8
90 km/h Weekend Journée et Semaine Journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	89,24	0,00	30,86	92188	0,00	10,29	0,33	9,63	10,94		Aucun piéton	89424	72,33	-
		Hyp de variances inégales			27,63	2902	0,00	10,29	0,37	9,56	11,02	0,53	Présence piéton	2766	62,04	10
90 km/h Semaine Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	24,25	0,00	20,13	90174	0,00	8,68	0,43	7,83	9,52		Aucun piéton	88308	69,07	-
		Hyp de variances inégales			18,85	1936	0,00	8,68	0,46	7,77	9,58	0,44	Présence piéton	1868	60,40	9

En milieu rural lors de traversée sans manœuvre dans les intersections autres que giratoires (Tableau 26), nous constatons un faible effet de la présence de piétons (G de Hedge de 0.06 à 0.35) avec une VMA de 70 km/h qui induit des différences de moyennes inférieures à 3 km/h la semaine et 5 km/h le weekend. Les vitesses moyennes pratiquées sont de 62-63 km/h avec piétons soit 7-8 km/h de moins que la VMA. Par contre lorsque la VMA est de 90 km/h l'effet est légèrement plus important (G de Hedge de 0.42 à 0.53) et se traduit par des différences de moyennes de l'ordre de 8-10 km/h. Les vitesses, sans piétons, sont comprises entre 69 et 73 km/h, et avec piétons, entre 60 et 65 km/h soit près de 30 km/h de moins que la VMA.

En conclusion, lors de traversée dans les intersections autres que giratoires en milieu rural, la présence de piétons n'induit pas de baisse importante de vitesse s'il y a une manœuvre. Les vitesses sont de l'ordre de 35 km/h car elles sont contraintes par la manœuvre. Par contre, sans manœuvre, la présence de piétons induit des baisses de vitesse entre 3 et 10 km/h. Dans ces intersections en présence de piétons la vitesse moyenne de passage est de 63 km/h lorsque la VMA est de 70 Km/h et 71 km/h lorsque la VMA est de 90 Km/h.

Tableau 27 : Test statistique sur la présence de piétons en giratoire en contexte rurale à 70 km/h

Rurale Giratoire 70 km/h			Test de Levene sur l'égalité des variances		Test t pour égalité des moyennes							Effet	Vitesse Moyenne			
										confiance 95 %						
			F	Sig.	t	ddl	Sig. (bilat)	Diff moy	Diff erreur standard	Inf.	Sup.	G de Hedge	Situation	Nombre de cas	Valeur	Diff avec et sans piéton
Tout droit Weekend	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	0,48	0,49	-0,94	1342	0,35	-1,11	1,17	-3,41	1,20		Aucun piéton	1300	33,22	- 1
		Hyp de variances inégales			-0,92	46	0,36	-1,11	1,20	-3,52	1,31		Présence piéton	44	34,32	-
Tout droit Semaine Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	2,49	0,12	-0,26	4085	0,80	-0,24	0,95	-2,11	1,63		Aucun piéton	4020	31,16	- 0
		Hyp de variances inégales			-0,22	68	0,83	-0,24	1,10	-2,44	1,95		Présence piéton	67	31,41	-
Tout droit Semaine Journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	0,46	0,50	1,52	2536	0,13	1,34	0,88	-0,39	3,06		Aucun piéton	2452	32,40	1
		Hyp de variances inégales			1,38	90	0,17	1,34	0,97	-0,58	3,26		Présence piéton	86	31,07	-
Tourne Semaine Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	0,19	0,67	0,09	1427	0,93	0,17	1,77	-3,31	3,64		Aucun piéton	1408	29,05	0
		Hyp de variances inégales			0,09	21	0,93	0,17	1,84	-3,66	3,99		Présence piéton	21	28,88	-
Tourne Semaine Journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	1,23	0,27	-1,47	938	0,14	-2,09	1,42	-4,88	0,70		Aucun piéton	918	30,53	- 2
		Hyp de variances inégales			-1,29	22	0,21	-2,09	1,63	-5,47	1,29		Présence piéton	22	32,62	-

Tourne Weekend Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	2,24	0,14	-0,49	263	0,63	-1,08	2,22	-5,45	3,28		Aucun piéton	258	31,63	-
		Hyp de variances inégales			-0,37	6	0,73	-1,08	2,96	-8,28	6,12		Présence piéton	7	32,71	-
Tourne Weekend Journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	2,37	0,13	-1,19	270	0,24	-2,59	2,19	-6,89	1,71		Aucun piéton	262	32,92	-
		Hyp de variances inégales			-0,89	9	0,40	-2,59	2,91	-9,13	3,95		Présence piéton	10	35,51	-

En rural dans les giratoires (Tableau 27) sur une route dont la VMA est de 70 km/h, nous n'observons pas d'effet de la présence de piétons (test non significatifs) avec des différences de moyennes peu importantes (inférieures à 1 km/h). Il faut noter que le nombre d'intersections avec piétons est faible. Quel que soit la manœuvre et la présence ou non de piétons les vitesses sont de de l'ordre de 33 km/h car elles sont contraintes par l'infrastructure.

Tableau 28 : Test statistique sur la présence de piétons en giratoire en contexte rural à 90 km/h

Rurale Giratoire 90 km/h			Test de Levene sur l'égalité des variances		Test t pour égalité des moyennes							Effet	Vitesse Moyenne			
										confiance 95 %						
			F	Sig.	t	ddl	Sig. (bilat)	Diff moy	Diff erreur standard	Inf.	Sup.	G de Hedge	Situation	Nombre de cas	Valeur	Diff avec et sans piéton
Tourne Weekend	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	0,05	0,83	0,05	1538	0,96	0,04	0,81	-1,55	1,63		Aucun piéton	1462	33,34	0
		Hyp de variances inégales			0,05	87	0,96	0,04	0,76	-1,48	1,56		Présence piéton	78	33,30	-
Tout droit Weekend	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	1,84	0,18	1,43	3121	0,15	1,18	0,83	-0,44	2,80		Aucun piéton	3011	35,16	1
		Hyp de variances inégales			1,39	119	0,17	1,18	0,85	-0,50	2,86		Présence piéton	112	33,98	-
Tourne Semaine Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	0,03	0,86	0,87	3022	0,39	0,59	0,68	-0,74	1,91		Aucun piéton	2906	32,13	1
		Hyp de variances inégales			0,88	127	0,38	0,59	0,67	-0,74	1,91		Présence piéton	118	31,54	-
Tout droit Semaine Début et fin de journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	2,03	0,16	2,42	5510	0,02	1,66	0,68	0,32	3,00	0,19	Aucun piéton	5347	32,73	2
		Hyp de variances inégales			2,26	173	0,03	1,66	0,73	0,21	3,11		Présence piéton	165	31,07	-
Tourne Semaine Journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	0,00	0,97	2,75	2285	0,01	2,03	0,74	0,58	3,47	0,28	Aucun piéton	2185	32,22	2
		Hyp de variances inégales			2,73	110	0,01	2,03	0,74	0,55	3,50		Présence piéton	102	30,19	-
Tout droit Semaine Journée	Moyenne de la vitesse dans l'intersection	Hyp de variances égales	0,57	0,45	2,50	4442	0,01	1,67	0,67	0,36	2,98	0,20	Aucun piéton	4281	34,72	2
		Hyp de variances inégales			2,63	176	0,01	1,67	0,64	0,42	2,93		Présence piéton	163	33,05	-

En milieu rural dans les giratoires (Tableau 28) sur route à 90 km/h, nous avons observé soit des réductions de vitesse non significatives, soit un effet très faible de la présence de piétons (G de Hedge < 0.28) avec différences de moyennes peu importantes (inférieures à 2 km/h). Quelle que soit la manœuvre les vitesses sont de l'ordre de 31 à 34 km/h car elles sont contraintes par l'infrastructure.

En conclusion, lors de traversée dans les giratoires en milieu rural, la présence de piétons n'induit pas de baisse importante de vitesse. Les vitesses sont de l'ordre de 35 km/h car elles sont contraintes par l'infrastructure.

4.6 Conclusions et recommandations pour les vitesses du VL en présence de piétons

L'analyse des vitesses pratiquées avec et sans présence de piétons a été réalisée en plusieurs étapes. Nous avons segmenté les données en deux types de segments : les sections courantes et les intersections. Puis nous avons recherché des groupes homogènes en termes de vitesses pratiquées sur les segments ne comportant pas d'arrêts. Puis pour chacun de ces groupes, nous avons mesuré l'impact de la présence de piétons sur la vitesse moyenne.

Il faut noter que les recommandations suivantes concernent les vitesses de consigne du VA en cas de présence de piétons en dehors de la route (par exemple sur les trottoirs). Si un piéton est sur la route, le VA doit le gérer avec ses algorithmes propres pour éviter les collisions.

Un premier constat est que les vitesses sont réduites dans le giratoires et dans les manœuvres de tourne à droite ou à gauche. Il faut donc analyser les intersections avec giratoire et les intersections dans lesquelles un changement de direction est opéré dans des groupes séparés de celles hors giratoire sans changement de direction. En effet, les giratoires amènent des contraintes sur la vitesse dues à l'infrastructure et lors de changement de direction ces contraintes sont dues à la trajectoire. Nous avons pu observer que :

- Lors de traversée dans les giratoires en milieu rural, la présence de piétons n'induit pas de baisse importante de vitesse et les vitesses sont de l'ordre de 35 km/h.
- Lors de traversée des giratoires sans ou sans manœuvres en urbain, la présence de piétons n'induit pas de baisse de vitesse et les vitesses observées sont de l'ordre de 30 km/h.
- Lors de manœuvres dans les intersections autres que giratoires en milieu rural, la présence de piétons n'induit pas de baisse importante de vitesse mais les vitesses sont de l'ordre de 35 km/h quelle que soit la VMA (70 ou 90 km/h).
- Lors de manœuvres dans les intersections sans giratoire en urbain, la présence de piétons induit des baisses de vitesse comprises entre 5 et 14 km/h par rapport aux passages sans piétons. La vitesse moyenne de passage est de 25 km/h en présence de piétons quelle que soit la VMA (50 ou 70 km/h).

Recommandation 24

Lors de changements de direction, en présence de piétons hors de la route, il est recommandé de réduire la vitesse de consigne du VA à 25 km/h maximum en urbain quelle que soit la VMA (50 ou 70 km/h) et à 35 km/h maximum en milieu rural quelle que soit la VMA (70 ou 90 km/h).

Lors d'un franchissement de giratoire, en présence de piétons hors de la route, il est recommandé de réduire la vitesse de consigne du VA à 30 km/h maximum en urbain quelle que soit la VMA (50 ou 70 km/h) et à 35 km/h maximum en milieu rural quelle que soit la VMA (70 ou 90 km/h).

Pour les sections droites et les passages des intersections sans manœuvre, l'impact de la vitesse maximale autorisée est très important. Nous avons donc regroupé les résultats et recommandations par ce critère de VMA.

Dans les analyses de situations urbaines avec une VMA de 50 km/h, nous avons observé que :

- Lors de traversées dans les intersections autres que giratoire et sans manœuvre, la présence de piétons induit des baisses de vitesse comprises entre 5 et 8 km/h. Dans ces intersections en présence de piétons la vitesse moyenne de passage est de 36 km/h.
- Dans les sections courantes urbaines, les vitesses pratiquées sont plus basses en présence de piétons : de 5 à 10 km/h en dessous de la valeur de la VMA soit 35 à 45 km/h.

Recommandation 25

Lors d'une traversée d'intersection sans changement de direction, en présence de piétons hors de la route, il est recommandé de réduire la vitesse de consigne du VA à 35 km/h maximum en urbain lorsque la VMA est de 50 km/h.

Dans les sections courantes, en présence de piétons hors de la route, il est recommandé de réduire la vitesse de consigne du VA à 40 km/h maximum en urbain lorsque la VMA est de 50 km/h.

Dans les analyses de situations urbaines avec une VMA de 70 km/h, nous avons observé que :

- Lors de traversées dans les intersections autres que les giratoires et sans manœuvre en urbain, la présence de piétons induit des baisses de vitesse entre 5 et 8 km/h. Dans ces intersections en présence de piétons la vitesse moyenne de passage est de 55 km/h.
- Dans les sections urbaines sans suivi, les vitesses pratiquées sont de l'ordre de 66 km/h avec ou sans piéton. En suivi, les vitesses pratiquées sont de l'ordre de 63 km/h sans piétons et 57km/h avec piéton.

Recommandation 26

Lors de traversée d'intersections sans changement de direction et dans les sections courantes en urbain, en présence de piétons hors de la route, il est recommandé de réduire la vitesse de consigne du VA à 55 km/h maximum lorsque la VMA est de 70 km/h.

Dans les analyses de situations rurales avec une VMA de 70 km/h, nous avons observé que :

- Lors de traversées dans les intersections autres que les giratoires en milieu rural et sans manœuvre, la présence de piétons induit des baisses de vitesse entre 3 et 10 km/h et la vitesse moyenne de passage est de 63 km/h.
- Dans les sections rurales à 70 km/h, nous observons des différences de vitesse importantes dans les situations de suivi (7 à 10 km/h) avec 14 km/h de moins que la VMA la plupart du temps, soit 56 km/h.

Recommandation 27

Lors de traversées d'intersections sans changement de direction et dans les sections courantes en milieu rural et en présence de piétons hors de la route, il est recommandé de réduire la vitesse de consigne du VA à 60 km/h maximum lorsque la VMA est de 70 km/h.

Dans les analyses des situations rurales avec une VMA de 90 km/h, nous avons observé que :

- Lors de traversées dans les intersections autres que les giratoires et sans manœuvre, la présence de piétons induit des baisses de vitesse entre 3 et 10 km/h et la vitesse moyenne de passage est de et 71 km/h.
- la présence de piétons induit des baisses importantes de la vitesse, de l'ordre de 10km/h, avec des vitesses de 70 km/h.

Recommandation 28

Lors de traversées d'intersections sans changement de direction et dans les sections courantes en milieu rural, en présence de piétons hors de la route, il est recommandé de réduire la vitesse de consigne du VA à 70 km/h maximum lorsque la VMA est de 90 km/h.

5 Conclusion

Les travaux présentés dans ce livrable ont permis de faire des recommandations pour améliorer les interactions avec les piétons et les cyclistes lors de l'introduction des VA dans la circulation. Pour cela, les analystes ont utilisé des données d'observations bord de voie des interactions entre cyclistes et/ou piétons et les autres véhicules selon différents aménagements routiers (parties 2 et 3) et des données de conduite en situations naturelles Udrive (partie 4).
Des recommandations sont proposées sur différents aspects allant de la détection des piétons ou cyclistes jusqu'au comportement du VA en passant par la prise de décision en présence de piétons ou cyclistes. Des recommandations générales sont également formulées pour les performances du VA et la conception de l'infrastructure.

Pour la détection des cyclistes :

- Le VA doit inclure des zones de détection spécifiques pour les cyclistes et EDPM dans lesquelles ces usagers s'arrêtent souvent. Il doit les surveiller en continu pendant la traversée du carrefour pour s'assurer de leur arrêt.

Pour la prise de décision en présence de cyclistes :

- Le véhicule automatisé ne doit pas utiliser la position latérale des cyclistes / EDPM au niveau du feu pour prédire la direction qu'ils vont emprunter.

Pour le comportement du VA en présence de cyclistes :

- En cas de présence avérée d'un cycliste/EDPM, le VA doit traverser avec une faible vitesse.

Pour la détection de piétons :

- Il est nécessaire que le véhicule autonome puisse mesurer la vitesse instantanée d'un piéton. L'application de valeurs moyennes se révèle insuffisante.
- Pour éviter les conflits, il convient que le VA puisse, en temps réel, mesurer la position et la vitesse du piéton pour infléchir sa trajectoire.
- La détection des piétons sur la chaussée en cas de circulation au pas ou à l'arrêt doit se faire dans l'ensemble des directions dans un rayon faible (1m) pour anticiper les trajectoires entre véhicules.
- Dans les cas où la traversée des piétons se fait en présence de masques à la visibilité mobile (véhicule en circulation sur les voies adjacentes par exemple), le VA doit être en capacité de suivre la trajectoire d'un piéton mais également de différencier plusieurs piétons afin d'anticiper plusieurs trajectoires individuelles.

Pour la prise de décision en présence de piétons :

- Le véhicule automatisé doit respecter le code de la route et être en mesure de s'arrêter dès que le piéton est présent sur la chaussée en traversée : le fait de continuer à circuler à vitesse constante alors qu'un piéton est au bord du trottoir et manifeste son intention de traverser, ou est en train de traverser est contraire au code de la route.

- Les constructeurs devront expliciter les critères choisis pour leur modèle d'anticipation de la traversée des piétons (critères de détection, limite de détection) et la fiabilité du pronostic. Cette fiabilité sera forcément faible dans certaines situations.
- Si un carrefour à feux est congestionné et s'il y a des piétons aux abords de la traversée, la probabilité de traversées piétonnes est très élevée (presque quasi certaine) quelle que soit la couleur du feu. Le VA devra intégrer cette donnée.
- S'il y a de nombreux piétons aux abords de la traversée et si un ou plusieurs piétons engagent leur traversée, il est probable que la majorité des usagers suivent profitant de l'arrêt des véhicules et de l'ouverture d'un créneau de passage. C'est l'effet d'entrainement documenté de nombreuses fois dans la littérature. Le VA devra intégrer cette donnée.
- Il est peut-être nécessaire de définir la liste des scénarios gérables par le VA .En cas de situations non reconnues par le VA, le conducteur devra être alerté pour repasser en manuel. Il semble en effet difficile de définir l'exhaustivité des configurations de conduite rencontrées par un VA.
- Il faut identifier les situations nécessitant le traitement simultané de 2 conflits potentiels entre mouvements de véhicules et mouvements de piétons tels que des mouvements de tourne à gauche sans possibilité de stockage.
- Il faut identifier la position de stockage du VA la plus pertinente pour le véhicule automatisé par un marquage au sol détectable dans certains carrefours gérés par feux en mouvements tournants.
- Il faut identifier les configurations complexes : nombre de conflits, types d'usagers, temps de réaction très élevé du VA nécessaires et peut-être les limites du VA dans ces cas.

Pour le comportement du VA en présence de piétons :

- Le véhicule automatisé doit avoir un comportement qui se rapproche d'un véhicule sans automatisme pour la cinématique d'arrêt même si ses performances lui permettraient de freiner plus tardivement par exemple. Il pourrait également émettre des signaux qui avertiraient le piéton de leur prise en compte par le véhicule automatisé.
- Il est nécessaire de définir des distances d'arrêt du VA en amont du passage piéton pour le confort de l'usager hors arrêt d'urgence.
- Dans les carrefours à feux en mouvements tournants, le véhicule automatisé doit adapter sa vitesse non pas en fonction de la vitesse autorisée mais de ses capacités de détection du piéton (approche environnementale en temps réel) en tenant compte des éventuels masques à la visibilité, et du comportement du piéton confiant.
- Le VA doit adapter sa vitesse en tenant compte des vitesses pratiquées actuellement par les automobilistes avec et sans présence de piétons et ainsi définir des seuils de vitesses de consigne du VA en cas de présence de piétons en dehors de la route (par exemple sur les trottoirs). Si un piéton est sur la route, le VA doit le gérer avec ses algorithmes propres pour éviter les collisions.
    - Lors d'un changement de direction et en présence de piétons hors de la route il est recommandé de réduire la vitesse de consigne du VA à
        - 25 km/h maximum en urbain quelle que soit la VMA (50 ou 70 km/h)
        - 35 km/h maximum en milieu rural quelle que soit la VMA (70 ou 90 km/h).
    - Lors du franchissement de giratoires et en présence de piétons hors de la route il est recommandé de réduire la vitesse de consigne du VA à
        - 30 km/h maximum en urbain quelle que soit la VMA (50 ou 70 km/h)
        - 35 km/h maximum en milieu rural quelle que soit la VMA (70 ou 90 km/h).
    - Lorsque la VMA est de 50 km/h en urbain et en présence de piétons hors de la route, il est recommandé de réduire la vitesse de consigne à

        - 35 km/h maximum lors d'une traversée d'intersection sans changement de direction
        - 40 km/h maximum dans les sections courantes.
    - Lors de traversées d'intersections sans changement de direction et dans les sections courantes et en présence de piétons hors de la route, il est recommandé de réduire la vitesse de consigne du VA à
        - 60 km/h maximum lorsque la VMA est de 70 km/h en milieu rural
        - 70 km/h maximum lorsque la VMA est de 90 km/h en milieu rural
        - 55 km/h maximum en urbain lorsque la VMA est de 70 km/h en urbain

Recommandations pour la conception de l'infrastructure

- Si les véhicules automatisés se généralisent avec des comportements de conduite entrainant des diminutions de débit, cet impact devra être pris en compte dans la conception de la voirie dans les zones à forts trafics véhicules ou fort flux piétons.
- Il est important d'identifier les configurations pour lesquelles l'écoulement des flux de circulation est problématique en mouvements tournants.

Recommandations pour les performances générales du VA

- Les performances du VA qui suivent devront être définies car il s'agit de détecter des situations et des mouvements dans un laps de temps compatible avec la conduite en situation réelle :
    - Capacités, fiabilité et vitesse d'analyse de la détection en statique des piétons,
    - Capacités, fiabilité et vitesse d'analyse de la détection dynamique : analyse des mouvements, mesure de la vitesse des piétons.
- Les performances du VA doivent subir des tests normalisés pour obtenir des valeurs seuils compatibles avec toutes les situations de conduite rencontrées et la conception des infrastructures. Par exemple, pour les traversées piétonnes, la compatibilité avec les triangles de visibilité existants.
- Il faut enfin prévoir une mise en conformité des mises à jour du VA en fonction des modifications du code de la route mais aussi de l'apparition de nouveaux aménagements ou de nouveaux usages.

Bibliographie

Arrêté (2018), Instruction Interministérielle de la Signalisation routière, art 117.4 https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000037964816https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000037964816

Biever W, Angell L, Seaman S. (2020) Automated Driving System Collisions: Early Lessons. Human Factors. 2020; 62(2):249-259. https://doi.org/10.1177/0018720819872034

Bjørnskau, T., De Ceunynck, T., Fyhri, A., Hagenzieker, M., Ivina, D., Johansson, O. J., & Laureshyn, A. (2019). Cyclists interacting with self-driving buses – hypotheses and empirical findings in real traffic. Paper presented at the International Cycling Safety Conference, Brisbane, Australia.

CETUR (2010) Guide carrefour à feux- cerema-2010, ISBN 978-2-11-098937-6, ISSN 1263-3313, disponible sur https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/guide-conception-carrefours-feux?v=7012

Code la route : Article R415-11, R414-4, R.412-39, R412-33, R.433.1, R. 433-17, R.412-37 https://www.legifrance.gouv.fr/codes/texte_lc/LEGITEXT000006074228/2024-06-19/

Coeugnet, S. Honeine, JL, Merlhiot, G. (2019) Livrable L2.1. Synthèse sur le comportement piétons – partie 1: état de l'art, version révisée, Projet SURCA https://surca.univ-gustave-eiffel.fr/livrables-et-publications/wp2-etat-de-lart-donnees-accidentologiques

Dommes A., (2017) Comprendre et améliorer les décisions de traversée de rue des piétons âgés. Synthèse des travaux du LEPSIS- UGE 2017, 6p. ffhal-01545701 https://hal.science/hal-01545701/document

Hoogendoorn, S, Bovy, P. (2003). Simulation of pedestrian flows by optimal control and differential games. Optimal control applications and methods, 24(3), 153-172. DOI: 10.1002/oca.727

Lagarde Y., Battaglia V., (2016) Etude sur le choix du piéton de traverser à un carrefour à feux-Cerema

Pokorny P. Skender B., Bjørnskau T., Johnsson E.,Performance of automated shuttles at signalized intersections- transportokonomisk institut – 2021, https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=55332

Reynaud, J. L. (2016). *Voirie urbaine-Guide d'aménagement*. Disponible sur https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/voirie-urbaine

Wakim C. (2005) Étude de la prédiction de chocs véhicule-piéton. Mathématiques [math]. Université Paris Sud - Paris XI, 2005. Français. ffNNT : ff. fftel-00081906f https://theses.hal.science/tel-00081906/file/ch_wakim-these-.pdf