

Etat des connaissances sur les usagers et carrefours à feux



Work Package	WP2
Responsable du WP, affiliation	Vincent Ledoux, Cerema
Livrable n°	L.2.2
Version	V3
Auteur responsable du livrable	Christophe Damas, Cerema
Auteurs, affiliations	Christophe Damas, Cerema
Relecteurs, affiliations	Philippe Chrétien, Ceesar
Statut du livrable	finale



Veuillez citer ce document de cette façon :

Damas, C. (2020). *Livrable L2.2. État des connaissances sur les usagers et carrefours à feux*. Projet SURCA, financé par la FSR et la DSR. 29 p.

Historique des versions

Version	Date	Auteurs	Type des changements
Version 3	21/01/2020	Christophe Damas	Prise en compte remarques relecteur
Version 2	19/12/2019	Christophe Damas	Version pour relecture
Version 2	Mai 2019	Christophe Damas	Version initiale

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

La question du véhicule autonome et de son insertion dans les flux de véhicules et usagers vulnérables est au cœur des préoccupations de tous, au niveau des Etats, des constructeurs automobiles et des spécialistes d'infrastructure et de sécurité routière, avec l'espoir que cela contribue à réduire la mortalité routière. L'objectif global du projet « Sécurité des usagers de la route et conduite automatisées, SURCA » est de contribuer à une meilleure intégration des véhicules autonomes dans la circulation actuelle.

Les partenaires du projet (Ifsttar, DSR, Ceesar, Cerema, Vedecom, Lab, DSR), ont ainsi comme objectif d'identifier quelles interactions existent et quelles stratégies pertinentes sont mises en place par les conducteurs pour faire 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 les bases de données existantes sur la conduite des véhicules conventionnels et d'identifier les facteurs qui peuvent expliquer des comportements différents.

Ces connaissances seront donc utilisables pour aider à l'introduction des véhicules autonomes de niveaux 3, 4 et 5, mais pour des taux de pénétration faibles. En effet, 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. De plus, 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 non autonomes, deux roues motorisés, cyclistes, piétons) :
 - Étude des situations de négociation où les conducteurs gèrent cette interaction de manière anticipée sur des bases de données de conduite non autonome, et en utilisant la perception d'éléments difficilement mesurables par les systèmes automatisés (regard, connaissance a priori d'intention etc...),
 - Étude de la réaction des autres usagers face à un véhicule autonome alors que son conducteur est absorbé dans une tâche annexe,
 - L'identification des besoins de communication du véhicule autonome en phase active avec les autres usagers,
 - Analyse des besoins des usagers âgés et acceptabilité 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 chocs (lors de la réalisation de tâches annexes) et systèmes de retenue,
 - Évaluation 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.

Table des matières

1	CONTEXTE.....	4
2	TPOLOGIE DES CARREFOURS A FEUX	5
2.1	ROLE ET USAGE DES FEUX	5
2.2	PHASAGE D'UN CARREFOUR A FEUX	5
2.3	STOCKAGE DES TOURNES A GAUCHE	7
2.4	REGLÉ DU CONTOURNEMENT PAR LA DROITE	10
2.5	FONCTIONNEMENTS PARTICULIERS LORSQUE NECESSAIRE.....	11
2.6	TRAVERSEE DES PIETONS	12
2.7	CYCLISTES	13
2.8	INSERTION DES TRANSPORTS EN COMMUN.....	14
2.9	TYPES D'INTERSECTION ET EMPLOI DES FEUX	14
3	ACCIDENTALITE EN CARREFOUR A FEUX	17
3.1	CHIFFRES GLOBAUX	17
3.2	TPOLOGIE DES ACCIDENTS RENCONTRES.....	17
3.3	LES VICTIMES	18
4	LES FRANCHISSEMENTS DE ROUGE PAR LES AUTOMOBILISTES.....	20
4.1	INDICATEURS	20
	TAUX DE PASSAGE AU ROUGE	20
	TAUX DE CYCLES FRANCHIS.....	20
	TAUX DE NON-RESPECT	20
4.2	QUELQUES CHIFFRES SUR LES FRANCHISSEMENTS DE ROUGE	20
5	CAS PARTICULIER DU COMPORTEMENT DES PIETONS EN TRAVERSEE	22
5.1	COMPREHENSION DE LA SIGNALISATION	22
5.2	ACCEPTABILITE DES TEMPS D'ATTENTE	22
	PERCEPTION DU TEMPS D'ATTENTE.....	22
5.3	LES COMPORTEMENTS DES PIETONS.....	23
5.4	LES PRISES DES RISQUES	24
6	CONCLUSIONS.....	26
	REFERENCES	27

1 CONTEXTE

Le carrefour à feux est le mode de gestion qui permet d'écouler un maximum de flux dans un espace minimal. Ces carrefours se concentrent principalement sur les artères de la voirie urbaine et sont une étape obligée dans tout déplacement. Les feux sont à ce titre des équipements essentiellement urbains. La conception d'un carrefour à feux est une démarche bien spécifique qui associe étroitement aménagement de la voirie et fonctionnement des feux. Cette association est la condition indispensable pour garantir la performance du carrefour en matière d'écoulement des flux et de sécurité pour tous les usagers.

Dans cette analyse, le véhicule dit « autonome » est idéalisé avec une perception parfaite de son environnement et en particulier de l'état des feux.

Malgré cette hypothèse favorable, la traversée en conduite automatisée d'un carrefour à feux constitue un défi de taille, car les feux ne gèrent pas l'intégralité des priorités de passage dans l'intersection. De plus les règles de bases imposées par le code de la route ne sont pas toujours respectées à la lettre. Si les feux semblent simplifier en première approche l'insertion du véhicule autonome, il faut éviter toute approche réductrice qui ferait oublier les nombreuses difficultés à surmonter : bien comprendre les enjeux liés à ce type d'aménagement, les modes de fonctionnement les plus répandus mais aussi mesurer la grande diversité des configurations et comportements humains est indispensable pour étudier l'impact de la conduite automatisée sur la sécurité des usagers de la route au niveau de ce type d'intersection.

Le carrefour à feux est en ville un lieu où se croisent tous les types de flux, dans des volumes importants, avec des caractéristiques très différentes et une grande dispersion des comportements pour certaines catégories d'usagers :

- véhicules particuliers,
- poids-lourds,
- véhicules de transport en commun en site propre ou non,
- piétons,
- vélos,
- engin de déplacements personnels (trottinettes, mono-roues, etc...),
- véhicules d'interventions divers.

Ce document est un état de l'art à dire d'expert basé sur des retours terrains, des échanges avec les services gestionnaires de feux ainsi que d'études et évaluations menées par le Cerema. Il diffère en cela des états de l'art académiques basés sur une revue systématique de la littérature.

2 TYPOLOGIE DES CARREFOURS A FEUX

2.1 Rôle et usage des feux

Les signaux lumineux d'intersection ont pour objet **de dissocier dans le temps** les principaux flux de véhicules et de piétons incompatibles au niveau des carrefours. Ils sont également utilisés pour **gérer des passages piétons en section courante** (hors intersection) ou **des alternats** (lorsque la largeur de la chaussée est insuffisante pour permettre à deux véhicules de se croiser). Des signaux spécifiques « rouge clignotant » sont également utilisés pour interdire la traversée des voies ferrées lors des passages des trains ou tramways.

Lorsque les flux deviennent élevés, les règles usuelles de priorité ne suffisent plus car elles nécessitent la coopération simultanée entre d'un grand nombre d'usagers : s'en suivent de nombreuses hésitations, des refus de priorité sources de nombreux temps perdus pour l'écoulement. Les capacités d'écoulement s'en trouvent réduites. Les feux se substituent à une partie des règles qui gèrent les interactions entre les usagers.

Concernant les piétons, il est utile de rappeler que le code de la route donne la priorité aux piétons lorsqu'ils manifestent leur intention de traverser. Le piéton, bénéficie donc de fait d'une quasi-priorité. Le feu rouge lui réduit son droit en limitant cette priorité à la période du vert piéton : vu du piéton, sur le plan réglementaire, le feu n'a donc aucun intérêt. Néanmoins, on constate qu'environ un carrefour à feu sur deux est justifié pour faciliter la traversée des piétons. En effet, ces derniers ont du mal à s'imposer face aux véhicules. Entre la règle et les pratiques, l'écart est parfois grand.

Il existe moins fréquemment des carrefours où le flux piéton est incessant rendant impossible le passage des véhicules. De façon générale, le feu rééquilibre les pressions.

La capacité du feu à favoriser une branche par rapport à une autre, en fait un outil puissant de régulation des flux en ville. À ce titre, il permet aussi de favoriser les véhicules de transport en commun dans les traversées de carrefours.

Bien conçu, un carrefour à feux permet d'écouler, à surface égale, beaucoup plus de trafic que les autres types d'intersections.

2.2 Phasage d'un carrefour à feux

Dans un carrefour à feux, seuls les mouvements les plus conflictuels sont séparés dans le temps : ces derniers sont déclarés incompatibles. Ce choix est réalisé par le concepteur du carrefour par une analyse globale du contexte et des flux en présence. La notion de conflit est à considérer au sens de l'accès à une ressource partagée à savoir la zone où ces mouvements se croisent : zone qu'ils ne peuvent occuper simultanément. Le temps est alors partagé en plusieurs phases : chacune composée de mouvements compatibles. On appelle phasage, ce découpage en phases. Communément, on parle de carrefour à deux phases, trois phases, etc...

Le fonctionnement à deux phases est le plus simple et celui qui offre le meilleur rendement d'un point de vue du trafic. Il limite aussi les temps d'attentes de tous les usagers. En matière de conception deux règles s'imposent : orthogonalité des voies en conflit et alignement des voies en phases. L'orthogonalité est liée à la co-visibilité et limite les accidents en cas de franchissement de rouge, elle assure également une bonne visibilité des feux.

Cette orthogonalité du carrefour crée des angles moins évasés qui limitent la vitesse des mouvements tournants. Ce point est particulièrement important pour la sécurité des piétons.

Les deux schémas suivants illustrent le fonctionnement à deux phases d'un carrefour à 3 branches et d'un carrefour à 4 branches, qui compte tenu des règles énoncées précédemment ne peuvent qu'avoir respectivement la forme d'un T ou d'une croix.

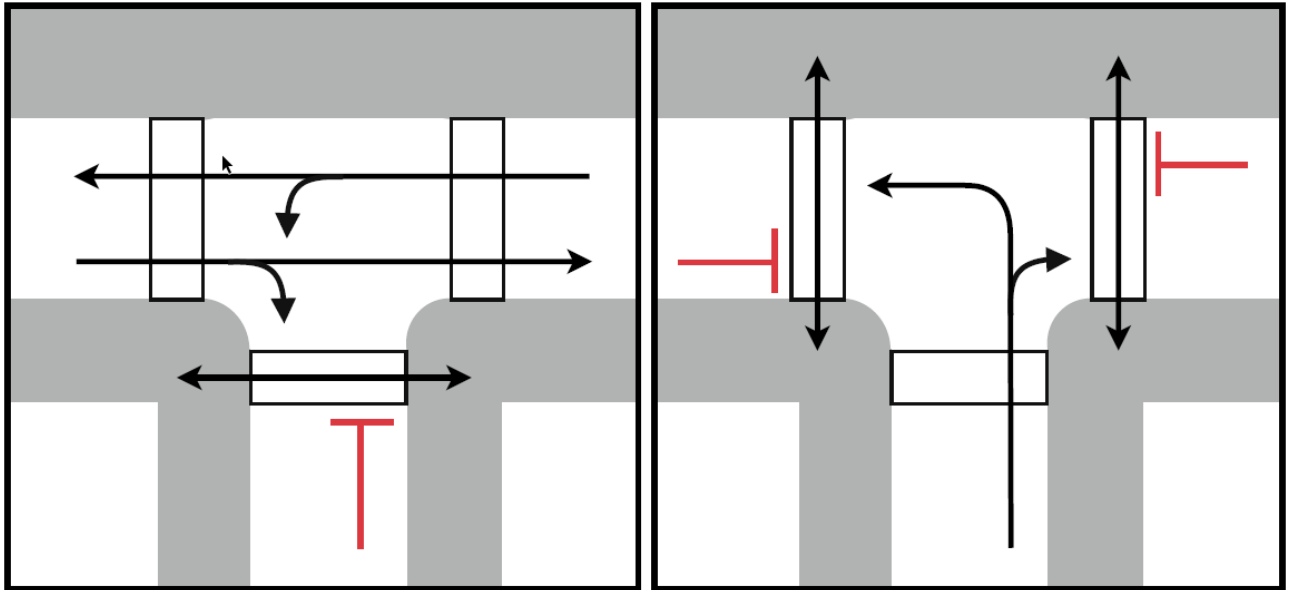


Figure 1 : modèle de fonctionnement du carrefour en T (3 entrées)

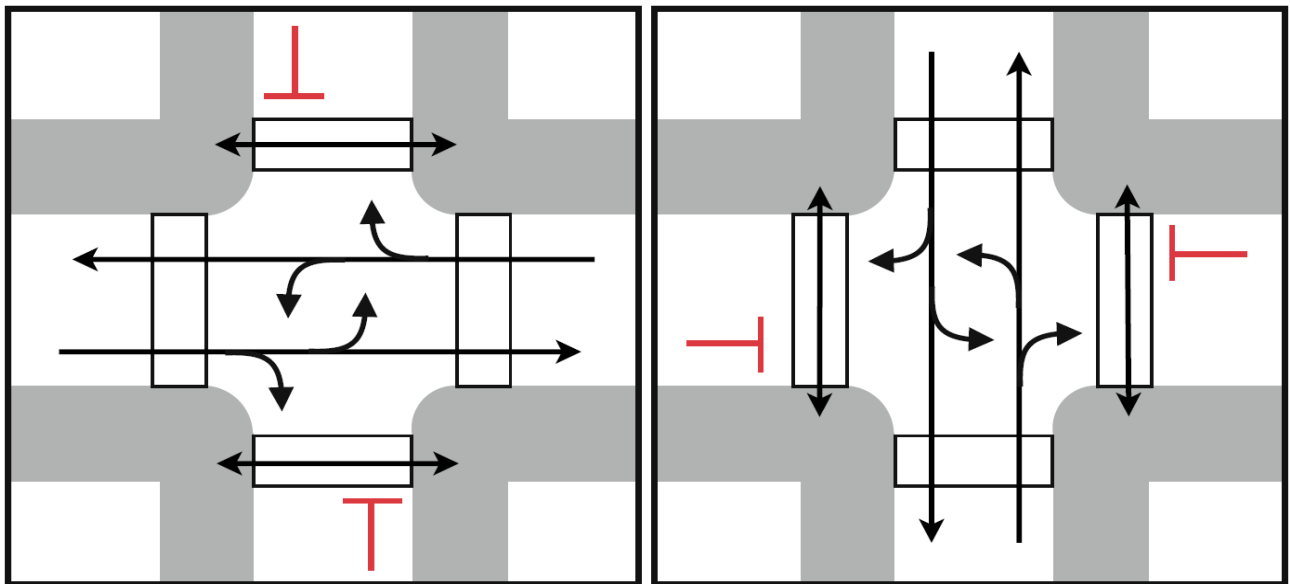


Figure 2 : modèle de fonctionnement du carrefour en X (4 entrées)

Ces deux schémas en T et en X constituent les deux modèles type de carrefours élémentaires, auquel il faut ajouter le passage piéton simple géré par feu.

Lorsque le nombre de branches est supérieur à 4 : il faut décomposer l'intersection en plusieurs carrefours élémentaires.

2.3 Stockage des tourne-à-gauche

Le fonctionnement à deux phases suppose que les véhicules qui tournent à gauche se stockent au centre de l'intersection et dégagent du carrefour lorsqu'un créneau dans le trafic adverse le permet : ce fonctionnement n'est donc possible que si les possibilités de stockage à l'intérieur du carrefour sont suffisantes. Différentes techniques permettent dans de nombreux cas d'y parvenir : en particulier les îlots. Ces derniers favorisent également les piétons.

Les schémas suivants illustrent le stockage dans différentes configurations. Les véhicules sont représentés par les rectangles bleu et rouge.

6% font demi-tour ou s'arrêtent pour attendre le vert.

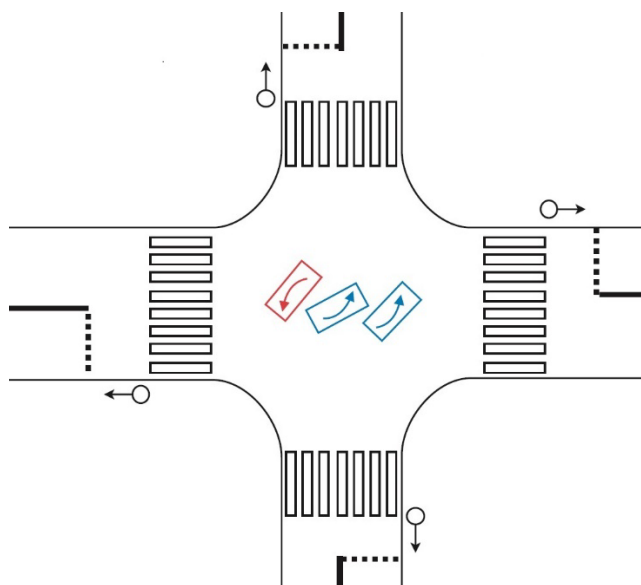


Figure 3 : stockage des véhicules qui tournent à gauche

Dans un petit carrefour, on stocke deux à trois véhicules. Les véhicules qui vont tout droit contournent le stock. Leur trajectoire n'est pas toujours rectiligne dans un carrefour. Ce point est particulièrement vrai aux heures de pointes. Il est illustré sur le schéma suivant :

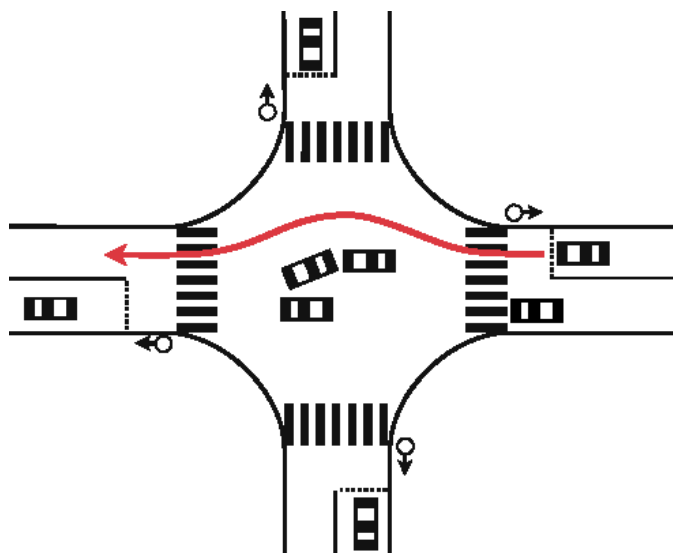


Figure 4 : déflexion des trajectoires des véhicules qui vont tout-droit du fait du stockage des véhicules qui tournent à gauche

Les îlots-refuge facilitent et sécurisent la traversée des piétons mais favorisent aussi le stockage des véhicules qui tournent à gauche.

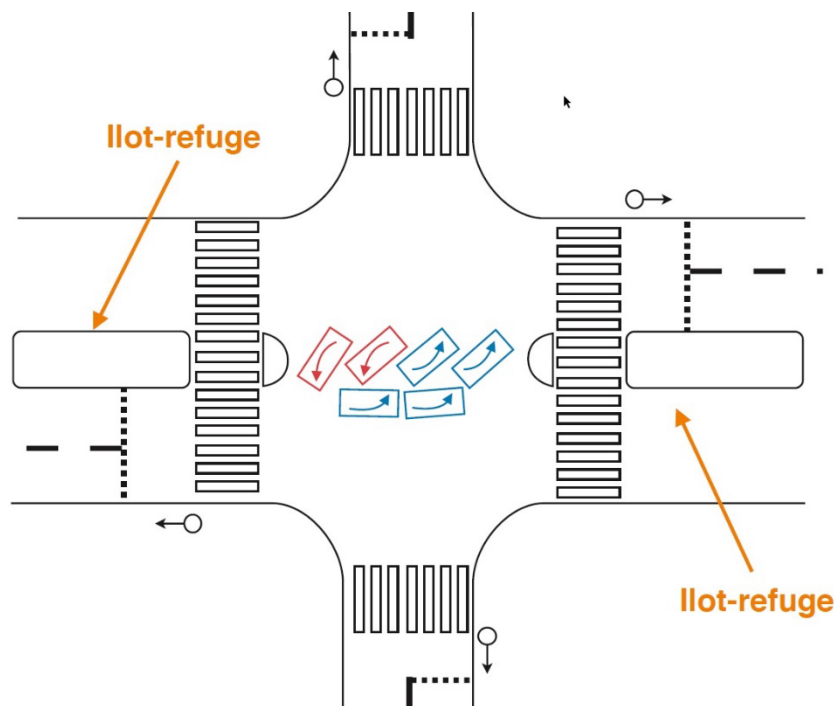


Figure 5 : carrefour en croix avec îlots-refuge.

Lorsqu'un seul des deux tourne-à-gauche présente un trafic qui excède la capacité de stockage interne, la technique dit du décalage à la fermeture permet de résoudre le problème. Le mouvement adverse est fermé plus tôt pour permettre aux tourne-à-gauche stockés de dégager le carrefour avant la phase de la rue sécante

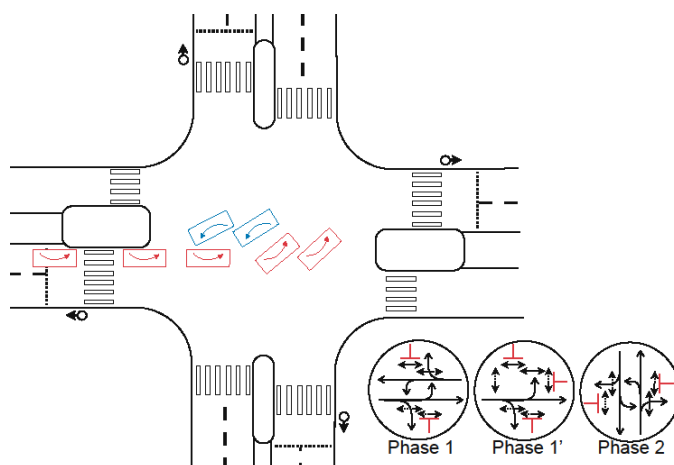


Figure 6 : carrefour en croix à deux phases avec décalage à la fermeture.

Enfin lorsque les volumes de tourne-à-gauche sont très importants, il faut dégager de l'emprise et optimiser le stockage interne. On aboutit par exemple à une configuration organisée autour d'un îlot central et au fonctionnement suivant :

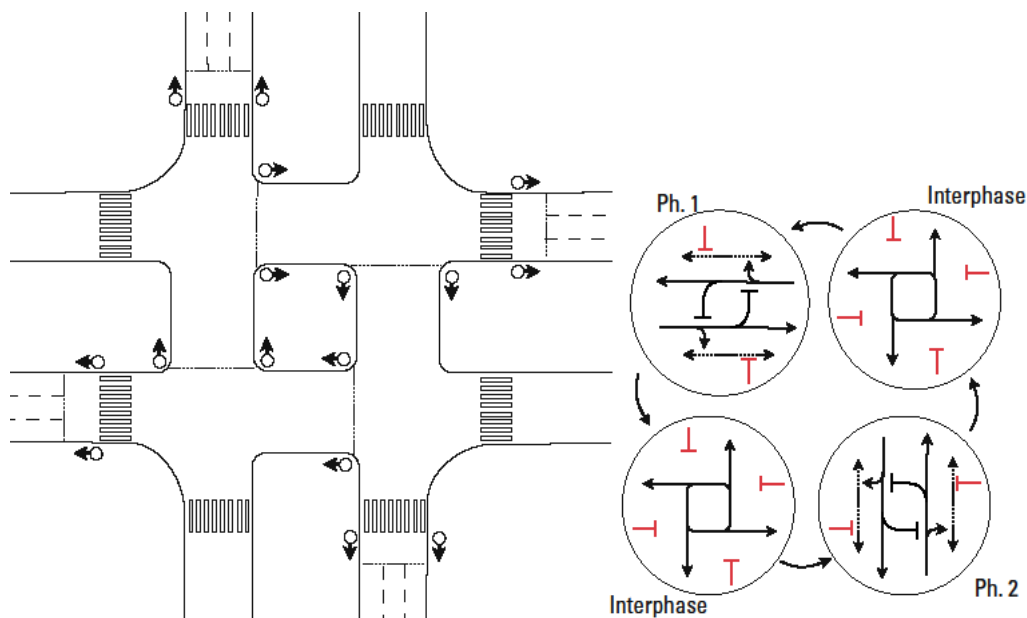


Figure 7 : Carrefour à feux à îlot central

Ce type de carrefour est composé de 4 carrefours élémentaires simples. Ce type de carrefour à feux permet d'écouler des volumes de trafic importants, très largement au-dessus des giratoires les plus « performants ». Ce carrefour est une simplification du carrefour à 4 phases suivant :

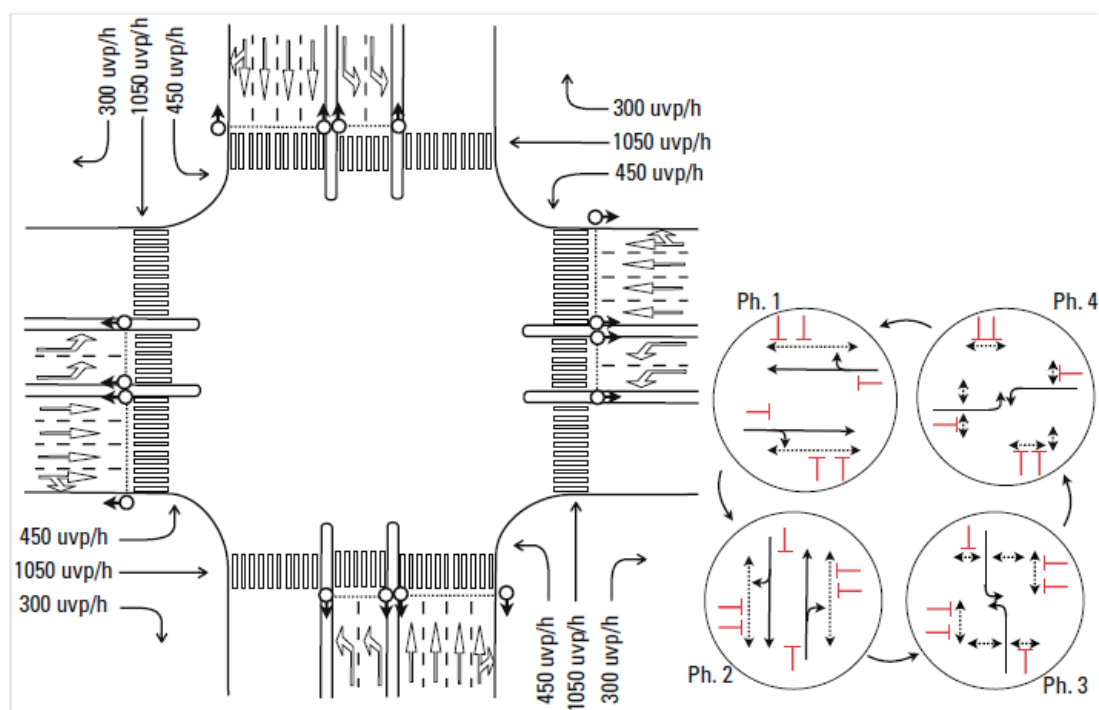


Figure 8 : Carrefour à 4 phases.

La transformation a permis de simplifier le fonctionnement du carrefour, de réduire fortement les temps d'attente et d'améliorer la capacité. De plus ce retraitement a permis de réduire fortement le nombre de points d'interaction potentiels, gage d'une meilleure sécurité.

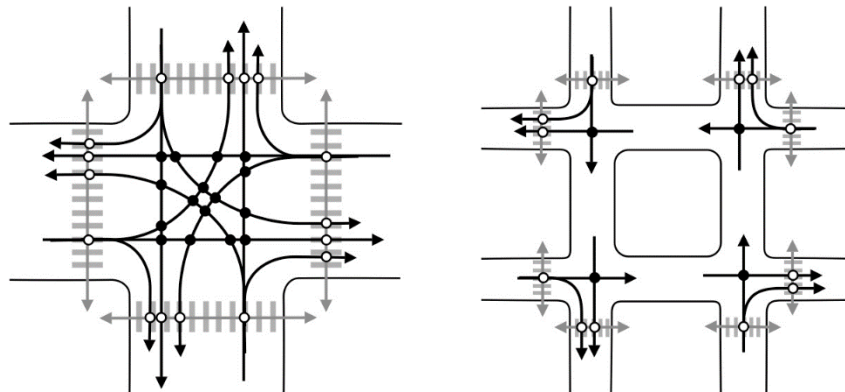


Figure 9 : réduction du nombre de points d'interaction potentiels (à gauche avant réaménagement, à droite après)

2.4 Règle du contournement par la droite

Conformément au code de la route, les véhicules qui tournent à gauche se contournent par la droite, sauf mention contraire signalée par une flèche au sol. Cette dernière approche, communément appelé « indonésienne », n'est pas recommandée pour les raisons suivantes :

- les véhicules stockés en face à face se masquent mutuellement la visibilité, rendant difficile l'identification des créneaux dans le flux adverse nécessaire pour quitter le centre du carrefour. Il s'en suit des prises de risques importantes pour terminer la manœuvre de tourner à gauche.
- dans le stockage à la « française » les véhicules qui tournent à gauche sont correctement positionnés par rapport aux véhicules de la sécante qui traversent tout droit. En effet ils sont devant, donc dans le bon ordre. A contrario, dans le stockage à l'indonésienne, les véhicules qui tournent à gauche attendent sur le côté vis à vis des tout-droits de la sécante. Tout retard du démarrage des véhicules qui tournent à gauche crée un conflit avec les véhicules issus de la sécante qui filent tout droit : la priorité à droite rend, de plus prioritaires les véhicules de la sécante.

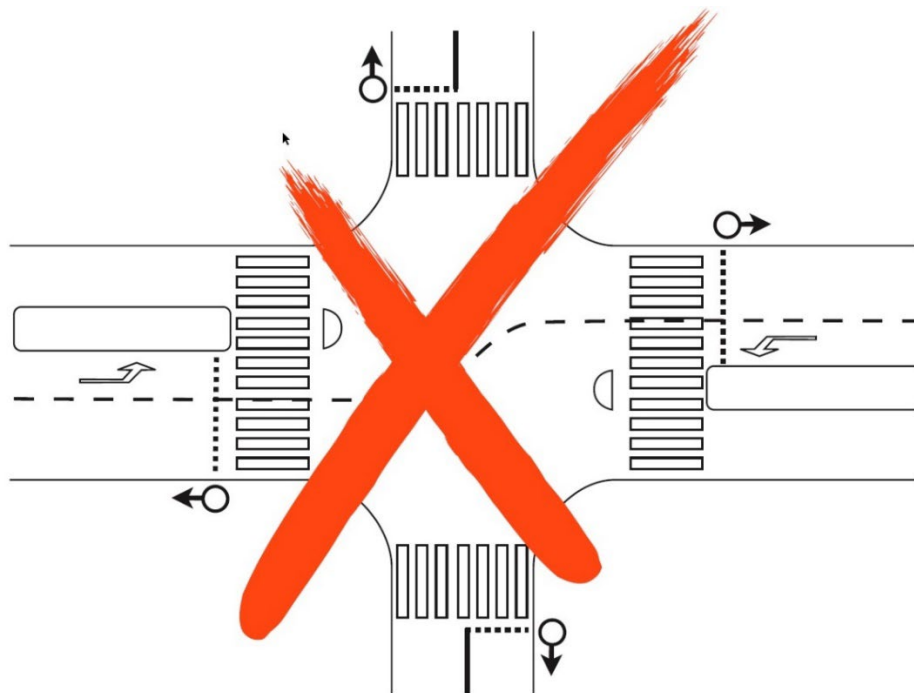


Figure 10 : tourne-à-gauche dit à l'indonésienne

On constate néanmoins que les comportements des conducteurs varient d'une région à une autre, et que dans certains contextes les usagers ne se stockent pas conformément au code de la route :

- absence d'îlots,
- îlots non alignés correctement,
- géométrie qui ne respecte pas la règle d'orthogonalité.

2.5 Fonctionnements particuliers lorsque nécessaire

Lorsque le stockage interne au carrefour est insuffisant vis-à-vis des trafics correspondants, il faut recourir à une ou plusieurs phases supplémentaires.

L'adjonction d'une phase réduit la part du temps de vert pour chaque mouvement et en conséquence la capacité de chaque entrée. Cette réduction est souvent compensée par une augmentation du nombre de voies. Le carrefour est alors plus vaste, propice aux vitesses élevées et aux manœuvres de changement de voies, et donc aux accidents qui en découlent.

Ce type de fonctionnement est aussi plus complexe pour les piétons et les vélos car il est source d'erreurs d'interprétation : les piétons ont tendance, par réflexe, à traverser dès que les véhicules s'arrêtent à leur gauche et les vélos dès que le flux principal sur la sécante est au rouge.

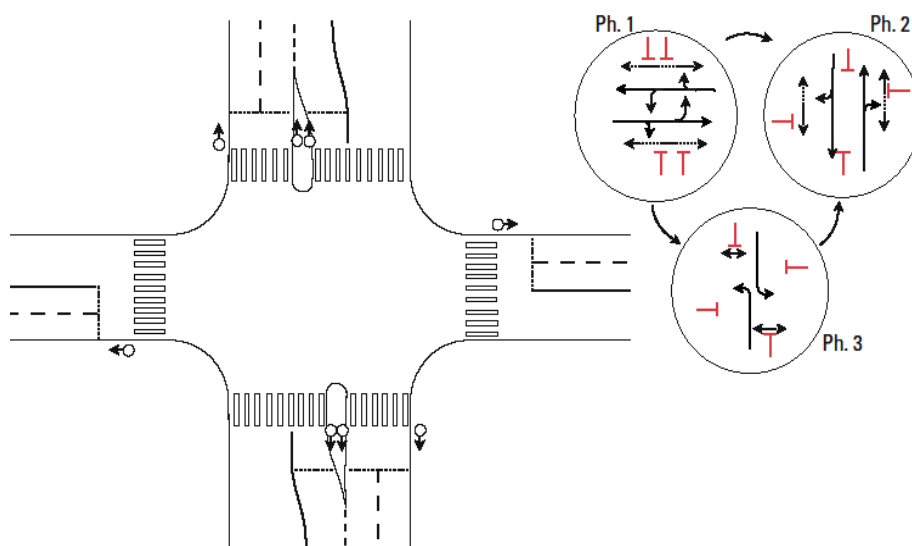


Figure 11 : tourne-à-gauche admis en phase spéciale.

On y constate également des accidents de franchissement de rouge en plus grande proportion. Il est toutefois difficile de faire des comparaisons de sécurité avec les carrefours à deux phases car les contextes globaux sont en général différents. Dans bien des cas, les feux utilisés sont des feux fléchés qui sont de ce fait moins visibles (surface lumineuse réduite) et moins lisibles (plus complexes à interpréter) que les feux pleins.



Figure 12 : feu fléché pour les tourne-à-droite et les tout-droit.

Enfin on trouve de nombreux autres types de fonctionnement, peu recommandés en matière de sécurité (accès branche par branche), voire à proscrire pour la même raison comme l'exemple suivant. La prise de vitesse sur le mouvement principal combinée à la non orthogonalité des voies en conflits explique les problèmes de sécurité rencontrés.

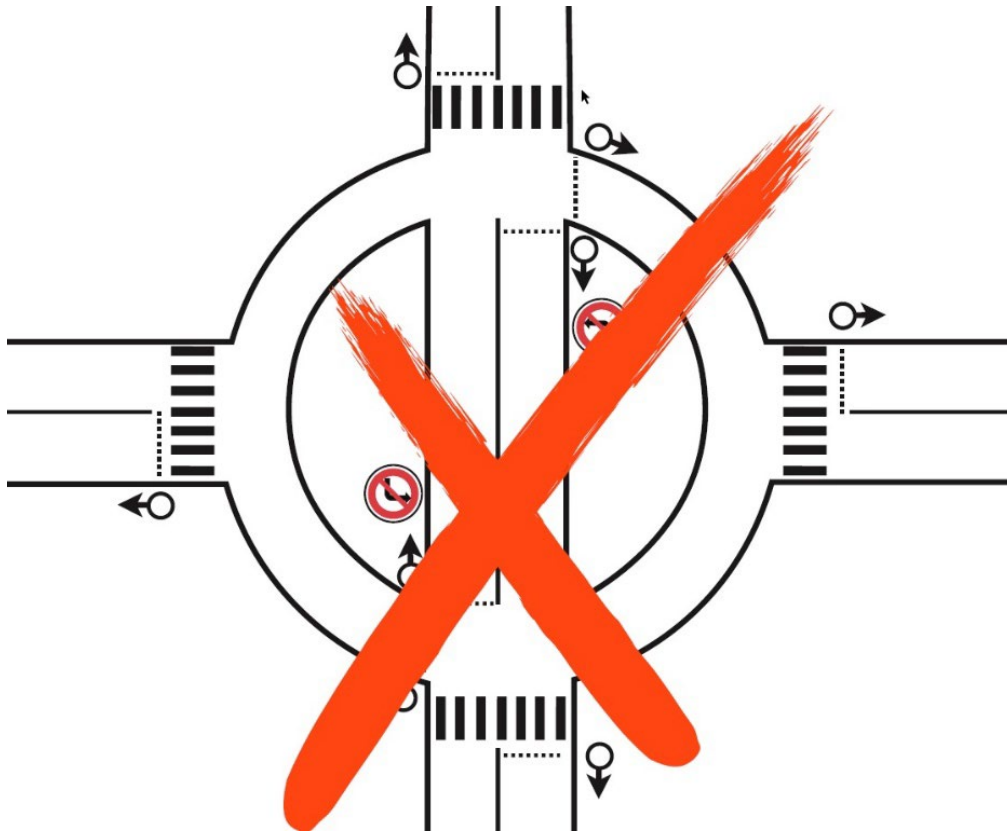


Figure 13 : carrefour où les tourne-à-gauche s'effectuent par la droite. Communément appelé carrefour hamburger aux US.

2.6 Traversée des piétons

Dans les carrefours à feux à deux phases, les piétons traversent en parallèle des véhicules de l'axe sur lesquels ils circulent. Les véhicules qui tournent à gauche ou à droite doivent céder le passage aux piétons qui traversent la rue sur laquelle ils vont s'engager. Ce mode de fonctionnement est majoritaire en France et généralement bien compris. Lorsque les mouvements tournants sont forts ou lorsque le flux piéton est trop important : il faut séparer dans le temps le passage des piétons et flux tournants concernés. Dans ce cas un travail sur l'aménagement et le phasage sont nécessaires.

Ce fonctionnement à deux phases est plus facile à comprendre pour les piétons. Il se traduit par : lorsque le feu véhicule adjacent passe au rouge pour les voitures, les piétons peuvent traverser. Les fonctionnements qui ne respectent pas cette règle présentent un risque élevé d'erreur d'interprétation pour les piétons. Si tel est le cas, des mesures d'aménagement telle que l'insertion d'un îlot refuge doivent être proposées.

2.7 Cyclistes

Là encore le fonctionnement à deux phases demeure le plus simple à interpréter pour le cycliste.

Des aménagements spécifiques pour les vélos sont mis en œuvre pour favoriser les cyclistes dans les carrefours à feux.

Le SAS vélo

Pendant le rouge, il permet aux cyclistes de se positionner devant les véhicules. Ainsi, ils sont à l'abri des pots d'échappements et plus visibles. Cette mesure facilite le tourne-à-gauche des cyclistes et améliore donc à la fois leur confort, leur santé et leur sécurité. La conduite automatisée doit prévoir la remontée de file des vélos lorsqu'un véhicule autonome s'arrêtera à un feu.

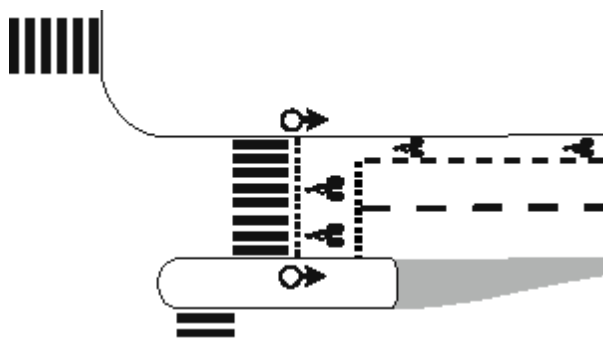


Figure 14 SAS vélo.

Le cédez le passage cycliste au feux.

Introduit récemment dans le code de la route, il autorise les cyclistes à franchir le feu au rouge pour la ou les directions indiquées sur le signal tout en cédant le passage aux autres usagers. Il permet au cycliste de pas démarrer en même temps que la file véhicule (source de nombreux accidents graves avec les véhicules de gros gabarit). Cette autorisation se matérialise sur le carrefour soit sous forme statique via un panneau M12 soit sous forme de signal lumineux dit R19

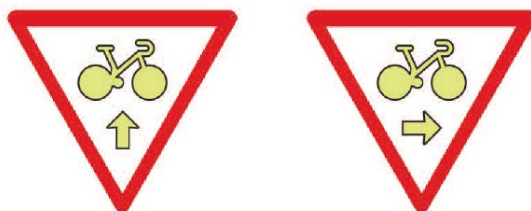


Figure 15 : exemple de panneau M12.

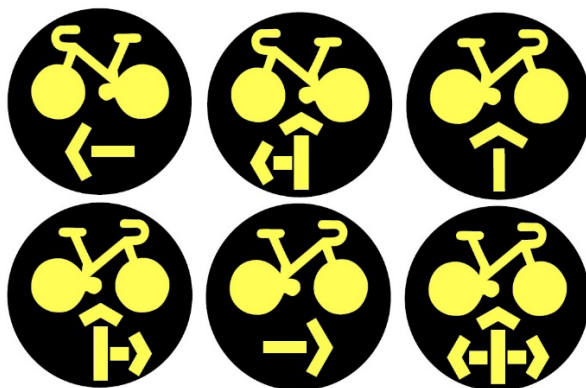


Figure 16 : signaux R19

2.8 Insertion des transports en commun

Lorsque les véhicules de transport en commun sont mêlés à la circulation générale ou bénéficie d'une simple voie réservée (voie de droite), le fonctionnement à deux phases est tout à fait adapté. Il assure un bon niveau de performance. La priorité aux feux permet dans la majorité des cas de réduire voire d'annuler l'attente aux feux.

Lorsque les véhicules de transport en commun sont séparés de la circulation générale, le fonctionnement à deux phases n'est guère possible.

Le fonctionnement proposé est alors le suivant : fonctionnement à deux phases pour la circulation générale + une phase spécifique pour les véhicules de transport en commun. En l'absence de transport en commun, la phase pour les véhicules de transport en commun est escamotée.

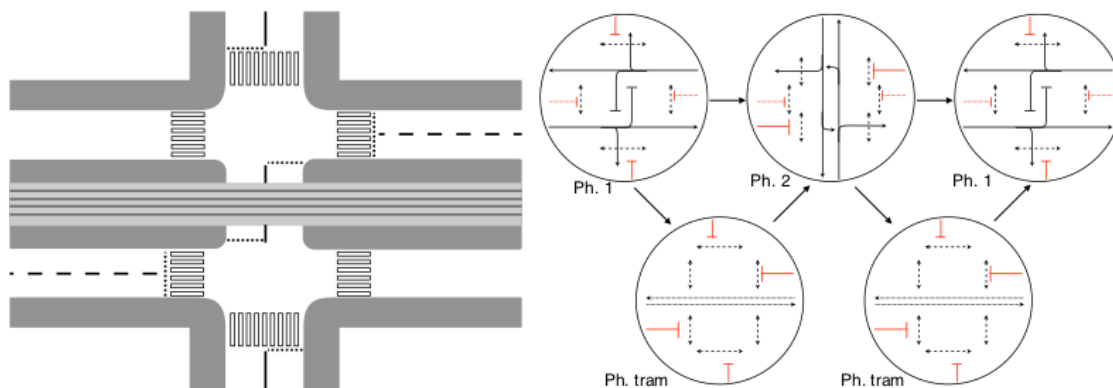


Figure 17 : carrefour à feux traversé par site propre tramway axial, fonctionnement à deux phases + phase spéciale tramway

2.9 Types d'intersection et emploi des feux

Les deux modèles de base présentés à savoir le carrefour en T et le carrefour en croix à deux phases cachent une très grande diversité des aménagements de carrefour à feux. Il n'est pas possible d'en faire une réelle typologie. On retrouve plutôt des familles de fonctionnement telles que décrites précédemment.

Afin d'illustrer cette diversité, les schémas ci-après présentent quelques exemples parmi d'autres.

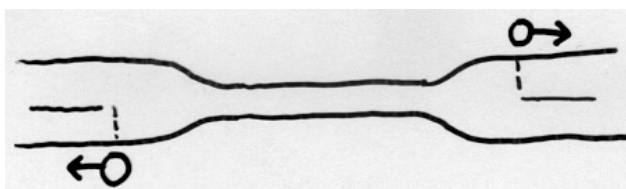


Figure 18 : alternat : pour gérer par feux une section de rue trop étroite pour admettre les deux sens circulation en même temps.

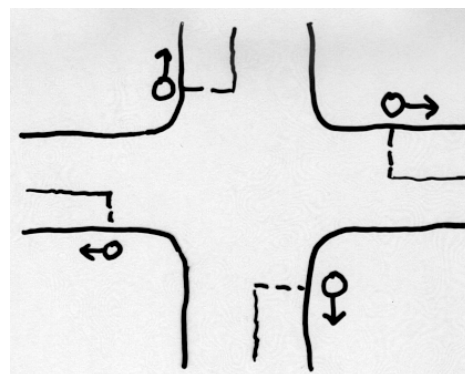


Figure 19 : carrefour à feux classique : carrefour en croix traditionnel

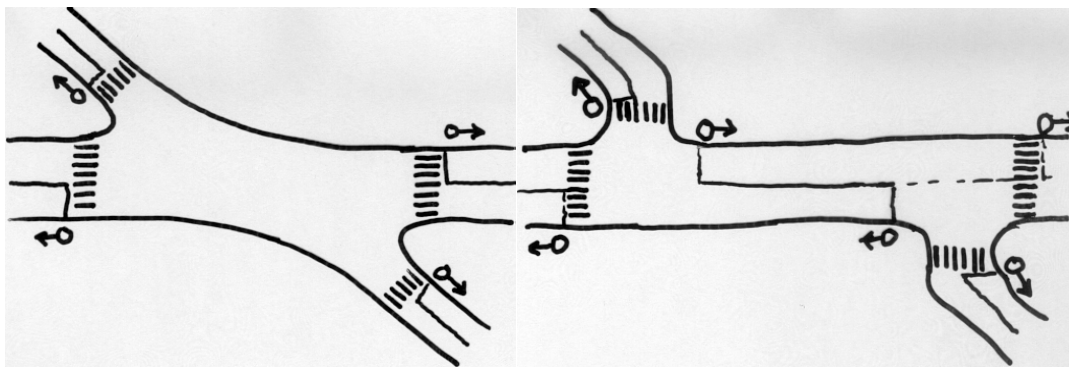


Figure 20 : à gauche carrefour en X trop vaste transformé à droite en carrefour baïonnette : il est composé de deux carrefours en T et de deux sas. Les deux intersections fonctionnent comme un tout.

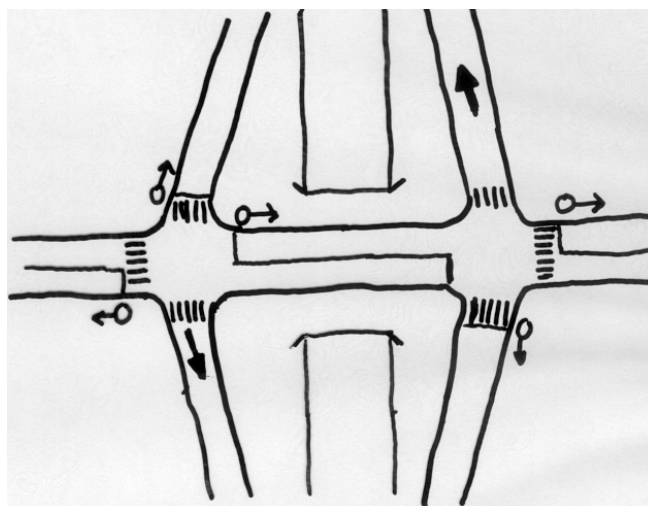


Figure 21: échangeur géré par feux : composé également de deux carrefours élémentaires fonctionnant comme un tout.

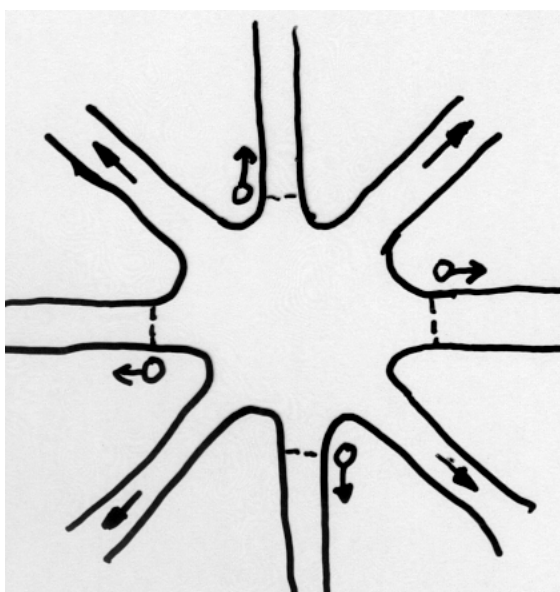


Figure 22 : carrefour en croix avec sorties disjointes : on rencontre ce type de carrefour sur quelques places parisiennes.

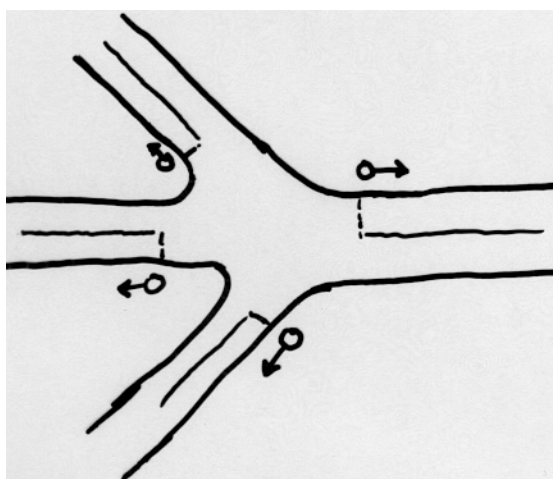


Figure 23 : carrefour en forme de patte d'oie, impossible à faire fonctionner à deux phases

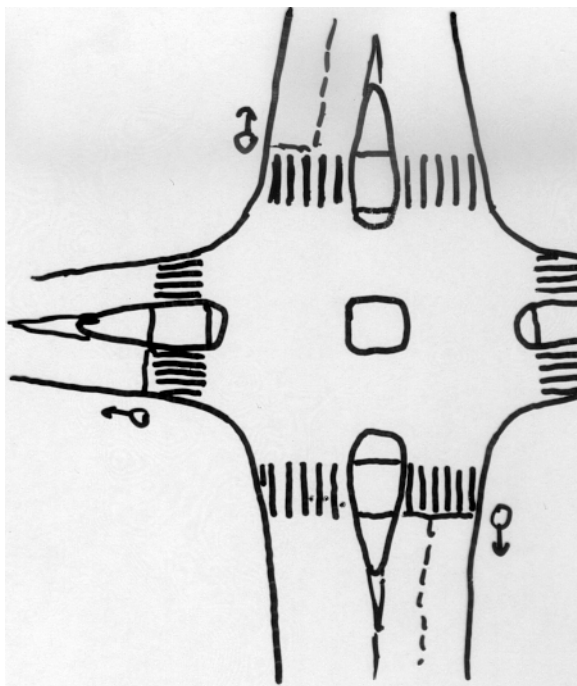


Figure 24 : carrefour à feux avec îlot central sans feux à l'intérieur

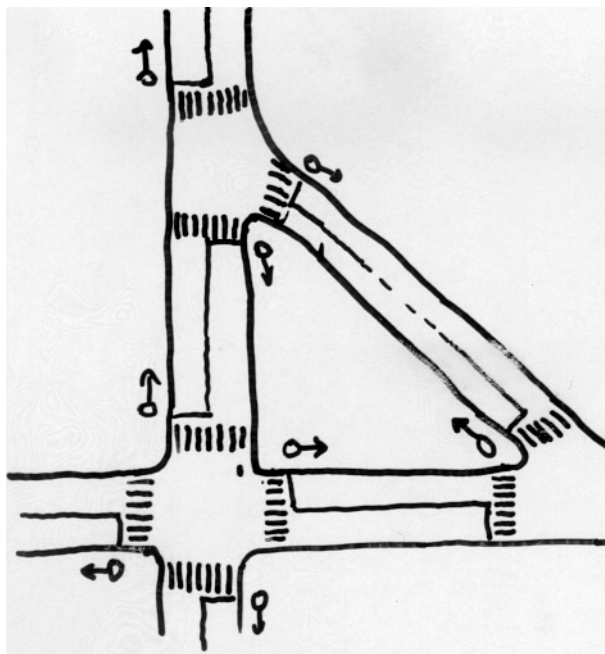


Figure 25 : carrefour composé avec tourne-à-gauche par la droite.

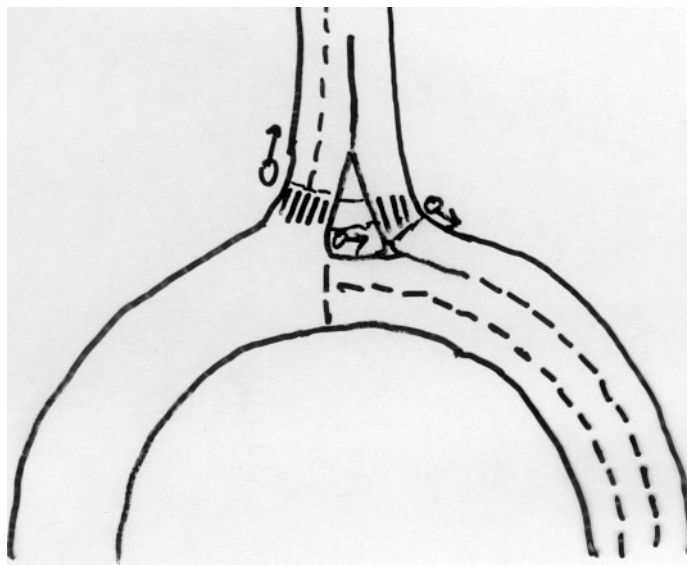


Figure 26 : carrefour circulaire de grande taille composée de carrefour en T et de passage piéton gérés par feux.

3 ACCIDENTALITE EN CARREFOUR A FEUX

3.1 Chiffres globaux

Les carrefours à feux sont perçus par les usagers comme des outils permettant de sécuriser les intersections, mais l'analyse de l'accidentalité nous offre un constat beaucoup plus nuancé.

Depuis 2004, la connaissance de l'accidentalité en carrefour à feux n'est plus accessible de manière exhaustive à l'échelle du territoire suite à la disparition du champ carrefours à feux du BAAC : cette notion a heureusement été réintroduite récemment en 2018.

Les statistiques actuelles sont basées sur une extrapolation à partir de tendances exprimées à travers les données antérieures à 2004 et croisées avec des études sectorielles. La base de données détaillée VOIESUR réalisée sur l'accidentalité de 2011 permet aussi des analyses.

En 2011 et probablement lors des années voisines, on a dénombré environ 10 000 accidents corporels par an en carrefour à feu. Ces accidents font environ 150 tués et 1 200 blessés graves chaque année. En 2016 parmi les 20 carrefours les plus accidentogènes de l'agglomération Bordelaise, 19 étaient équipés de feux. Un certain nombre de ces carrefours ont été retraités depuis (suppression de feux, mise en place de giratoire, etc.).

Contrairement aux idées reçues, un accident en carrefour à feux n'implique pas forcément un franchissement de rouge. Seuls 1/4 à 1/3 des accidents en carrefour à feux comportent un franchissement de rouge selon les études.

3.2 Typologie des accidents corporels rencontrés entre 1999 et 2003

Les éléments présentés dans cette section sont issus d'une étude sectorielle sur le département des Hauts-de-Seine. Ces statistiques diffèrent peu de celles observées sur d'autres agglomérations.

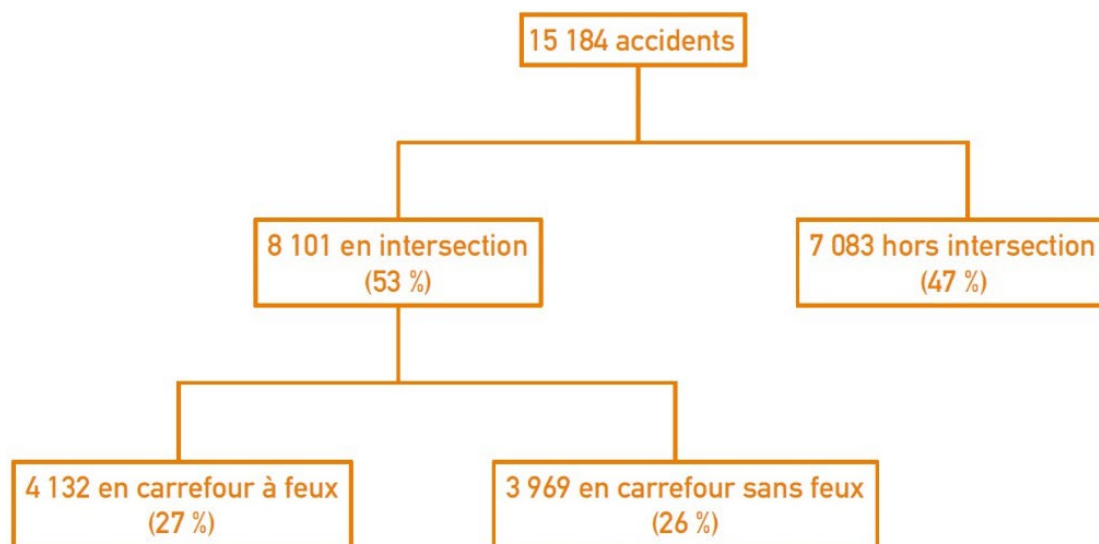


Figure 27 : répartition des accidents dans le département des Hauts-de-Seine (1999/2003)

Les accidents en carrefour sont particulièrement graves. Ainsi l'indice de gravité urbain (IGU)¹ est plus élevé en carrefour à feux qu'en carrefour sans feux (10,3 versus 8,9). Cette gravité est encore plus saillante pour les accidents impliquant un piéton (17,6 versus 12,4) ou un cycliste (13,1 versus 6,3).

Les principaux types d'accidents en carrefour à feux sur ce département selon la nature du choc se répartissent comme suit :

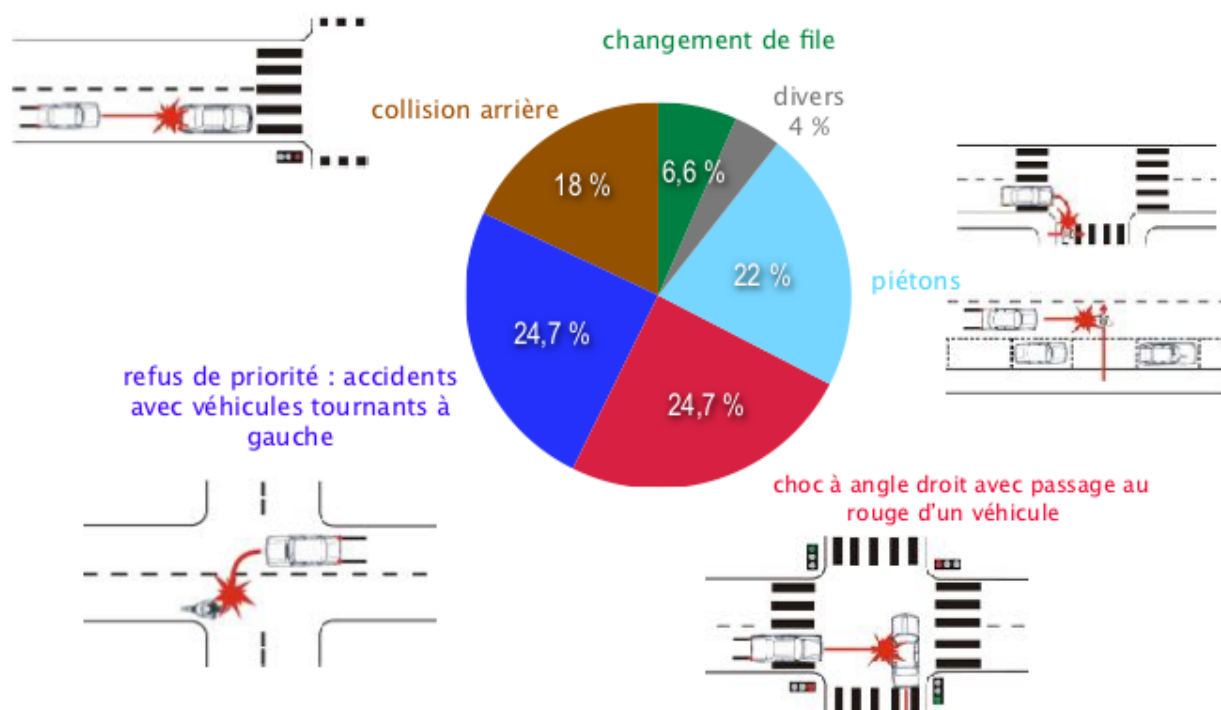


Figure 28 : : accidents et type de chocs dans le département des Hauts-de-Seine (1999/2003)

3.3 Les victimes

On ne dispose pas d'éléments à l'échelle de la France entière mais l'étude sectorielle sur les Hauts-de-Seine montre la répartition suivante :

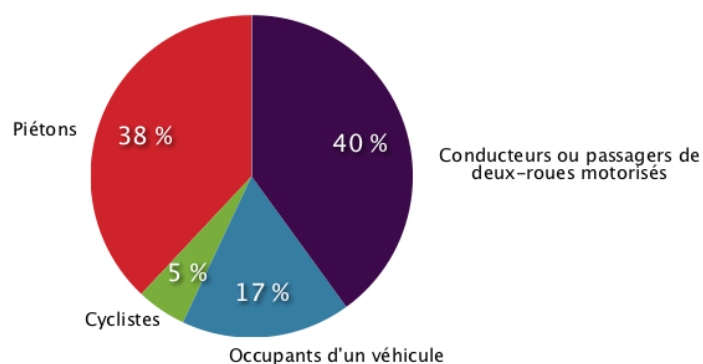


Figure 29 : répartition des victimes

¹ IGU = nombre d'accidents avec au moins un blessé hospitalisé / nombre d'accidents * 100

Sans surprise, les usagers vulnérables représentent la majorité des victimes en carrefour à feux. Ce fait n'est pas spécifique aux accidents de carrefours à feux en urbain. Cependant, les accidents de vélos et de piétons y sont plus graves que sur les autres types d'intersections.

Enfin, la catégorie deux-roues motorisés est très représentée dans les Hauts-de-Seine. Dans les villes où la part modale du 2RM est plus faible, cette catégorie est moins représentée.

4 LES FRANCHISSEMENTS DE ROUGE PAR LES AUTOMOBILISTES

4.1 Indicateurs

Les franchissements de rouge ne sont pas faciles à quantifier et plusieurs indicateurs peuvent être proposés.

Taux de passage au rouge

L'indicateur taux passage au rouge (nb de véhicules franchissant le rouge / nb total de véhicules franchissant la ligne de feux) ne doit pas être confondu avec le taux de non-respect. En effet, cet indicateur est fortement influencé par le rapport vert/cycle, par la présence ou non d'une coordination et par le taux de saturation des files :

- un rapport vert/cycle élevé fait augmenter la probabilité d'arriver pendant le vert ;
- les coordinations sont calées pour qu'un maximum de véhicules bénéficie du vert. Toutefois sur les carrefours soumis à la priorité dynamique pour les véhicules de transport en commun tramways, la coordination est peu répandue, car incompatible avec les demande de passage des véhicules de transport en commun.
- pendant le rouge, seuls les véhicules en première position ont la possibilité de passer au rouge, et donc statistiquement, la probabilité individuelle de franchir le rouge est moins élevée en cas de saturation de la branche en entrée.

Cet indicateur est toutefois facile à mesurer automatiquement et on peut ainsi obtenir des échantillons de grande taille.

Taux de cycles franchis

L'indicateur taux de cycles franchis par file (nombre de cycle avec au moins un franchissement de rouge/nombre de cycle x nombre de files) est moins biaisé. Mais si on le calcule automatiquement avec un capteur au droit de la ligne de feux, on intégrera des cycles où aucun véhicule ne s'est présenté pendant le rouge, ce qui peut arriver dans les périodes creuses, ou au niveau des sas parfaitement coordonnés.

Taux de non-respect

L'indicateur qui traduit plus directement le non-respect du feu est plus complexe, car un véhicule ne respecte vraiment le rouge que s'il s'arrête au rouge en première position et ne repart qu'au vert: $\text{nb de passages au rouge} / (\text{nb de véhicules ayant respecté le rouge} + \text{nombre de passages au rouge})$.

Il ne faut donc pas compter ceux qui sont en deuxième position, sauf si la place est libérée par le véhicule en première position en franchissant le rouge, etc...

4.2 Quelques chiffres sur les franchissements de rouge

Les valeurs mesurées varient dans des proportions très importantes d'un aménagement à un autre.

Une étude conduite dans le cadre de l'évaluation du contrôle automatisé des franchissements de rouge sur 50 carrefours affiche une valeur moyenne de 1,56% de taux de passage au rouge.

Une étude sur l'agglomération de Toulouse montre un taux moyen de 2,9%. Il faut noter qu'un quart de ces franchissements a lieu au-delà de 10 secondes de rouge. Enfin cette étude a été suivie par un deuxième bilan 10 ans plus tard : on constate une augmentation de 25% du taux de passage au rouge.

Concernant le taux de cycles franchis : on peut retenir une valeur moyenne de 10% des cycles avec au moins un franchissement de rouge. Cependant ce chiffre cache de grandes disparités. Des observations récentes faites sur des carrefours traversés par des tramways montrent des taux allant de 3% à 40%.

5 CAS PARTICULIER DU COMPORTEMENT DES PIÉTONS EN TRAVERSEE

5.1 Compréhension de la signalisation

Une enquête de 2005 réalisée par le Cerema montre qu'environ 25 % des piétons pensent que le rouge est un conseil et non une obligation.

La compréhension des signaux lumineux par les piétons et la perception de leur utilité sont sujets à débat.

La notion de rouge de dégagement est très mal comprise par les piétons mais également les conducteurs. Lorsque le signal piéton passe au rouge, le piéton dispose de 1 seconde par mètre de traversée piétonne avant que feu véhicule en conflit ne passe au vert. Les villes nous font part de nombreuses altercations entre automobilistes et piétons. Les premiers, en particulier lorsqu'ils effectuent un mouvement de tourne-à-droite ou de tourne-à-gauche, ne comprennent pas que des piétons puissent être encore présents sur le passage piéton alors que le signal piéton est rouge.

Lorsque la traversée est longue, le rouge de dégagement est important. Les observations montrent qu'à partir de 5 ou 6 secondes de rouge de dégagement les piétons en attente sur le trottoir commencent à s'engager. Dans bien des cas, ils n'ont pas le temps d'arriver sur le trottoir en face avant que le feu véhicule ne passe au vert.

De nombreuses solutions ont été testées pour résoudre ce problème, sans succès. Parmi elles, l'affichage du décompte de rouge de dégagement restant expérimentée dans 6 villes françaises. Hélas, de nombreux usagers comprenaient le message à l'envers et débutaient leur traversée lorsque le compteur affichait 0.

5.2 Acceptabilité des temps d'attente

L'acceptabilité du temps d'attente repose en grande partie sur deux notions :

1. La perception du temps d'attente.
2. Le seuil acceptable qui varie d'un individu à une autre et selon le contexte.

Perception du temps d'attente.

Le cerveau humain est muni d'une sorte de tic-tac interne qui permet d'estimer les temps d'attente sur des durées de l'ordre de la minute. Ce temps perçu est assez proche du temps réel sauf lorsque l'attention du sujet est partagée par une autre tâche (lecture, conversation, etc.). Le temps perçu est alors fortement réduit.

L'usage massif des smartphones a largement bouleversé l'appréhension des temps d'attente et il y a nécessité de revoir les observations. Les exploitants de trafic observent de plus en plus souvent des démarrages tardifs aux feux, les conducteurs étant concentrés sur leur smartphone. L'impact sur la capacité des carrefours n'a cependant pas été quantifié.

Le seuil d'attente est très variable et sujet au contexte.

L'attente est acceptée si elle justifiée : si un tramway arrive les usagers acceptent l'attente, en revanche si le feu est au rouge et qu'il ne passe rien, les usagers attendent peu.

Les circonstances liées au motif du déplacement ou les conditions climatiques modifie le seuil d'attente.

5.3 Les comportements des piétons

Les **franchissements de rouge** par les piétons sont beaucoup plus élevés que ceux des véhicules motorisés.

Des observations effectuées à Toulouse portant sur un total de 18 685 traversées de piétons montrent que :

- 65 % s'engagent au vert,
- 8 % durant le rouge de dégagement
- 27 % après le rouge de dégagement.

Ces chiffres ne sont qu'une moyenne et de fortes variations existent d'une installation à l'autre comme le montre le schéma suivant :

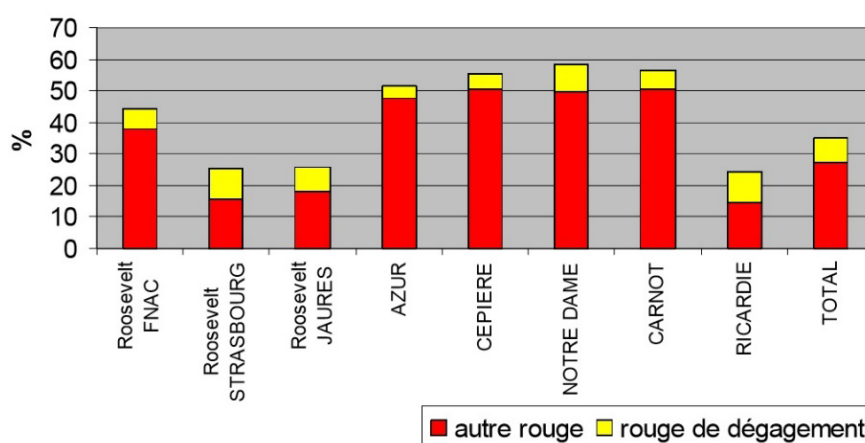


Figure 30 : taux d'engagement au rouge des piétons.

On constate également que la plupart des piétons, qui traversent au rouge, courent ou marchent vite. Par ailleurs, 6% font demi-tour ou s'arrêtent pour attendre le vert.

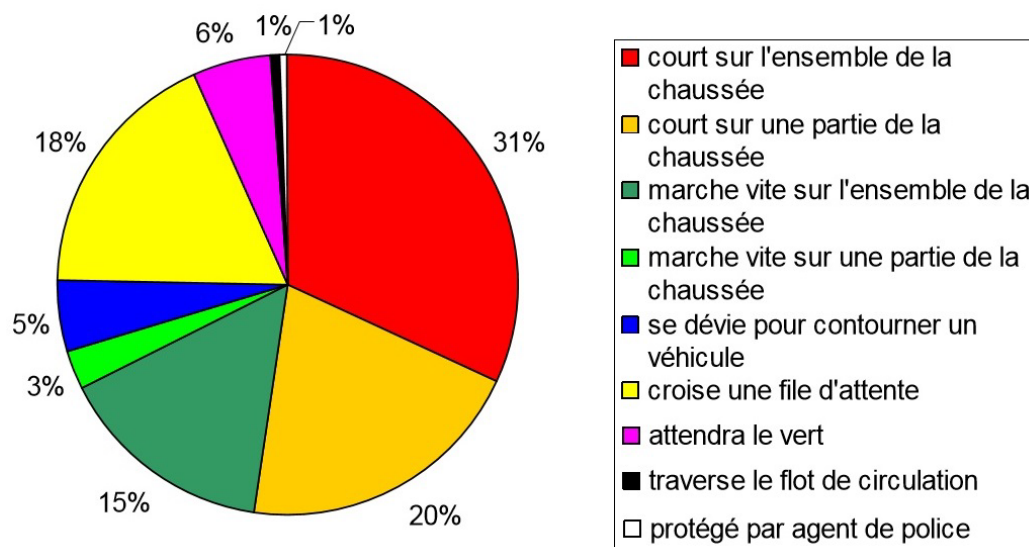


Figure 31 : comportement des piétons qui traversent au rouge.

Interaction piétons véhicules : elles sont relativement fréquentes. Il ne faut pas extrapoler ces interactions en facteurs d'insécurité. Dans bien des cas il y a négociations entre les usagers par échange de regards ou de gestes. Une majorité de traversées illicites se font sans gêne pour les véhicules.

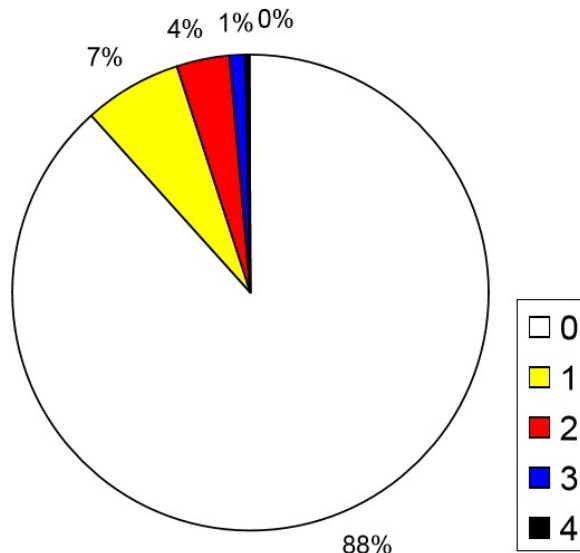


Figure 32 : Parts des traversées illicites qui ne gênent aucun véhicule, qui gênent 1, 2, 3 ou 4 véhicules..

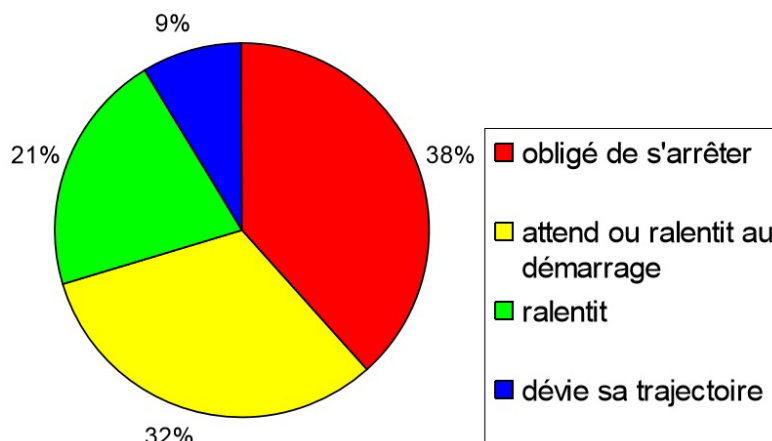


Figure 33 : comportement du véhicule gêné

5.4 Les prises des risques

L'identification des situations de traversée à risque est complexe car très variable. Il est tentant d'assimiler le passage au rouge à une situation à risque et la traversée pendant le vert à une situation sans risque, mais c'est une vision simpliste qui n'a pas de sens.

C'est le contexte global qui a un sens :

Passer au vert, sans regarder est plus risqué qu'une traversée au rouge quand il n'y a aucun véhicule en approche.

Etre sûr qu'il n'y a aucun véhicule en approche repose sur la capacité de la personne à faire cette analyse. Cette capacité peut être altérée par un handicap (visuel, auditif, cognitif, stress, attention partagée). Par ailleurs, cette capacité s'acquiert au fil du temps, c'est pourquoi la traversée de voies circulées est peu aisée pour les enfants qui ont du mal à identifier les créneaux dans le trafic leur permettant de traverser en toute sécurité.

Il est bon de rappeler une nouvelle fois que le piéton est prioritaire et que c'est à l'automobiliste de céder le passage et non au piéton d'attendre un éventuel créneau dans le trafic. Cette règle est

insuffisamment respectée par les automobilistes et les piétons sont dans bien des cas contraints de forcer le passage d'autant plus rapidement qu'ils souhaitent :

- se diriger vers un abri en cas d'averse ou d'orage,
- réaliser la correspondance avec un bus qui vient d'arriver en station.

Ces comportements sont également observés lorsque le feu piéton est rouge.

Les études d'accidentalité montrent que la prise de risque n'est forcément maîtrisée et encore plus en période nocturne, notamment l'hiver.

La présence d'une gare, la présence de bus en correspondance est toujours une situation à risque qui nécessite d'être prise en compte dans les aménagements et les fonctionnements proposés.

6 CONCLUSIONS

Les diversités de géométrie/fonctionnement des carrefours à feux et de comportements d'usagers montrent que le carrefour à feux n'est aucunement un objet simple à franchir pour les véhicules autonomes. Bien au contraire, c'est un objet particulièrement complexe et délicat.

Il simplifie la traversée pour un grand nombre d'usagers, mais les règles usuelles de priorité à droite, de priorité aux piétons, de cédez-le-passage au mouvement adverse demeurent.

Le feu vert ne donne pas la priorité mais autorise simplement l'utilisateur à franchir la ligne d'effet des feux.

Sauf à insérer les véhicules à conduite automatisée dans des sites propres et à gérer leur traversée en phase spéciale, la gestion des priorités demeure tout aussi complexe que dans les autres carrefours si ce n'est plus compte tenu de nombreux phénomènes particuliers propres aux carrefours à feux.

Les feux ne peuvent à eux seuls garantir la sécurité pour l'insertion des véhicules à conduite automatisée car les franchissements de rouge resteront possibles, notamment par les piétons. Enfin les observations montrent également que la négociation entre usagers est largement présente dans les carrefours à feux.

Pour conclure il nous paraît important de mettre en exergue trois difficultés qui posent de véritables défis :

La manœuvre du véhicule à conduite automatisée qui souhaite tourner à gauche

Dans un carrefour qui fonctionne à deux phases le véhicule à conduite automatisée qui tourne à gauche doit se stocker à l'intérieur du carrefour en respectant la règle du contournement par la droite mais avec la possibilité que les véhicules adverses ne respectent pas cette règle : doit-il alors lui-même transgresser cette règle pour ne pas bloquer le carrefour ? Il est impossible d'identifier des trajectoires prédéfinies : le stockage des véhicules dépend beaucoup du contexte de trafic, des types de véhicules en présence.

Enfin le véhicule à conduite automatisée doit identifier les créneaux, s'il en existe, dans le flux adverse pour quitter la zone de stockage : cette manœuvre complexe mais indispensable dans tout carrefour qu'il soit équipé de feux ou non. Il faut aussi que le passage piéton sur la rue à destination soit libre, ce qui complexifie encore plus la manœuvre.

Les franchissements de rouge

Quelles réactions doit adopter le véhicule à conduite automatisée en cas de franchissements de rouge de la part des piétons, des engins de déplacements personnels, des vélos ?

Les trajectoires illicites

Quelles réactions doit adopter le véhicule à conduite automatisée quand

- un conducteur ne respecte pas les flèches au sol ?
- des piétons traversent en dehors des passages prévus, y compris en diagonal

Sur les carrefours, beaucoup de conflits sont réglés sans difficulté par interaction entre humains, ce qui ne sera plus possible en conduite automatisée.

REFERENCES

Sécurité des routes et des rues : Setra, Cetur 1992

Instruction interministérielle sur la signalisation routière : livre 1, sixième partie (remise à jour régulièrement)

Guide conception des carrefours à feux, Certu, 2010

Typologie des accidents en carrefour à feux, Cerema (2001)

http://www.lescarrefoursafeux.fr/IMG/pdf/typologie_acci_caf_2001_cle832ded.pdf

http://www.lescarrefoursafeux.fr/IMG/pdf/typologie_acci_caf_annexes_2001_cle41d973.pdf

Note accidents et franchissement de rouge, Cerema (2005) :

http://www.lescarrefoursafeux.fr/IMG/pdf/typologie_acci_caf_annexes_2001_cle41d973.pdf

Etude d'accidentalité des carrefours à feux des Hauts-de-Seine, Cerema (2006)

http://www.lescarrefoursafeux.fr/IMG/pdf/acci_caf_hauts-de-seine_2006_cle88c32c.pdf

Accidentalité en carrefour à feux, Cerema (2012)

http://www.lescarrefoursafeux.fr/IMG/pdf/acci_caf_synthese_2012_cle08e158.pdf

Improvement of pedestrian and safety and comfort at traffic lights: results from French, British and Dutch field tests, PUSSYCATS European project (1992)

http://www.lescarrefoursafeux.fr/IMG/pdf/pussycats_cle8b4615.pdf

Analyse du comportement des piétons sur les passages piétons gérés par feux (2005)

http://www.lescarrefoursafeux.fr/IMG/pdf/inter-pieton-vpinitial_cle011826.pdf

Mémoire de fin d'étude : amélioration de la signalisation lumineuse pour les piétons (2009)

http://www.lescarrefoursafeux.fr/IMG/pdf/tfe_feux_pietons_2009_cle4e8b4b.pdf

Evaluation du système Sécurifeux : décompte du temps de dégagement piéton (1998)

http://www.lescarrefoursafeux.fr/IMG/pdf/securifeux_cete-est_2008_cle86cde6.pdf

Evaluation d'un décompte de temps d'attente aux feux piétons Strasbourg (2015)

http://www.lescarrefoursafeux.fr/IMG/pdf/20151208_evaluation_decompteur_pieton_cle03c1fa.pdf