

# Validation des simulations dynamique aux feux

## Note technique

---

### Contexte

Cette note est le rendu d'une commande de la DGITM/DIT/MARRN en vue de rationaliser les processus de calage et de validation des aspects relatifs aux carrefours à feux dans les modèles de simulation dynamique.

### Rédacteur

Christophe DAMAS – Cerema

### Relecteurs

Martin DE WISSOCQ – DGITM

Clément MORIN – DGITM

Bruno LEVILLY – Cerema

Nicolas SPEISSER – Cerema

## I) Introduction

L'évaluation d'une solution d'aménagement et de fonctionnement d'un carrefour ne requiert pas nécessairement d'étude de simulation dynamique. Lorsque le carrefour est simple et qu'il n'y a pas d'interaction avec d'autres carrefours proches, ni de stratégie dynamique de régulation du trafic, la simulation dynamique n'apporte aucune réelle expertise. Elle n'en demeure pas moins un outil pédagogique apprécié lors des réunions de présentation de projet.

Sur les carrefours composés, la simulation dynamique est particulièrement intéressante pour valider le fonctionnement des sas et les décalages entre lignes de feux successives. Pour les mêmes raisons elle est également très intéressante pour évaluer le fonctionnement de carrefours proches qui interagissent entre eux. Enfin, elle est particulièrement adaptée pour tester des stratégies de régulation dynamique des feux :

- micro-régulation,
- priorité aux feux,
- macro-régulation sur zone,
- régulation adaptative temps-réelle.

## II) Grandeurs nécessaires au calage et la validation des modèles

On supposera dans ce qui suit que le lecteur est familier des démarches analytiques d'évaluation des carrefours à feux. Si tel n'est pas le cas, l'annexe présente les éléments les plus fondamentaux.

### Longueur moyenne d'un véhicule à l'arrêt ( $\bar{L}_{uvp}$ ) :

Cette donnée est nécessaire pour évaluer la longueur des files d'attentes engendrées par les feux. Le guide carrefours à feux indique une valeur moyenne de 5m. Elle est rarement observée de nos jours et correspond plutôt à la densité des véhicules en stationnement. Des mesures supplémentaires ont été réalisées à partir de GoogleEarth®. La méthode consiste à ne retenir que des entrées avec des files d'attentes comportant au moins 6 véhicules, sans aucun véhicule franchissant le carrefour, pour éviter le moment où la file redémarre. Les deux derniers véhicules sont exclus pour éviter de prendre en compte des véhicules qui pourraient être encore en mouvement. Les files d'attentes observées sur GoogleEarth® se situent en Région Parisienne, Lyon, Bordeaux, Dijon, Marseille, Clermont-Ferrand, sur différents type d'axe. Une vérification à titre indicatif a été faite sur le terrain à Lyon, mais il faudrait multiplier ce type de vérification pour valider la méthode.

La valeur moyenne obtenue à partir des observations sur GoogleEarth® est d'environ 6,25 m. Pour simplifier et augmenter la marge de sécurité nous proposons de retenir une valeur moyenne de **6,5m par uvp**.

Le raffinement selon les différents types de véhicules n'est pas aisé à partir de ce type de méthode.

#### **Temps perdu au démarrage ( $\delta t_0$ ) :**

Lorsque le feu passe au vert, le premier véhicule à l'arrêt au feu ne redémarre pas immédiatement. Un temps de réaction est nécessaire. Cette donnée est importante pour les problèmes de coordination des feux et de vidage de sas. Une étude récente effectuée sur le boulevard circulaire de la Défense a montré un temps moyen de démarrage au feu égal à **2,91 s**. Cette valeur est conforme à d'autres travaux. On arrondira cette valeur à **2,9** secondes.

#### **Onde de redémarrage, retard au démarrage véhicule à véhicule ( $\delta t$ ) :**

Le remplissage et le vidage d'une file d'attente peut se modéliser sous la forme de deux ondes. L'onde de formation correspondant à l'allongement de la file d'attente vers l'amont et l'onde de redémarrage correspondant aux départs successifs des véhicules de la partie aval de la file d'attente. La file d'attente est entièrement résorbée lorsque l'onde de redémarrage rattrape l'onde de formation de la file.

La vitesse de l'onde de formation est fonction du débit d'arrivée des véhicules en amont et de la longueur moyenne des véhicules à l'arrêt.

La vitesse de l'onde de redémarrage est le produit de la longueur moyenne des véhicules à l'arrêt et du retard au démarrage entre deux véhicules. La moyenne des retards entre véhicules successifs par observation vidéo est de 1,38 s. Nous arrondirons à **1,4 s** cette durée que nous noterons  $\delta t$ . Avec les valeurs précédemment annoncées on obtient une vitesse de l'onde de redémarrage d'environ **16,5 km/h**.

#### **Débit de saturation ( $Q_s$ ) :**

Il correspond au nombre maximum de véhicules pouvant s'écouler sur une file pendant une heure lorsque le feu est en permanence vert. Il traduit la distribution des temps inter-véhiculaires au niveau de la ligne de feux pendant le vidage de la file d'attente en l'absence de perturbations externes. Le débit de saturation est exprimé en uvp/h : unité de véhicule particulier par heure. Le débit de saturation est très variable d'un site à un autre : les plages usuelles varient de 1600 à 2000 uvp/h. La valeur de 1800 est souvent retenue dans la plupart des études, sans que ce choix soit toujours réellement justifié. Pour les aménagements neufs il n'est évidemment pas possible de mesurer le débit de saturation, on doit l'estimer en fonction du contexte et tenir compte des éléments suivants :

- vitesse autorisée ou pratiquée sur la section,
- géométrie,
- environnement routier ou très urbain,
- nature du trafic (habituels, ou occasionnels...).

Quelques exemples :

En présence d'un plateau, ralentisseur : sur les carrefours à plateau on observe des valeurs au alentour de 1500 uvp/h. Sur les voies peu perturbées en ville, on est proche de 1800 uvp/h. En revanche sur des boulevards avec voies larges. On peut observer des valeurs allant jusqu'à 2000 uvp/h (Boulevard de la Défense par exemple). En présence de pente conséquente, le débit de saturation diminue, des valeurs proches de 1500 upv/h ont fréquemment été observées.

#### **La demande de trafic d'une ligne de feu:**

Elle traduit pour chacune ligne de feu du carrefour le nombre de véhicules par heure géré par la ligne de feu et ventilés en fonction des différentes directions.

#### **La capacité de stockage interne en TAG ( $Q_s$ ) :**

De nombreux carrefours à feux fonctionnent à deux phases. Dans ce mode de fonctionnement les tourne-à-gauche se stockent à l'intérieur du carrefour et évacuent le carrefour en fin de vert. Reproduire correctement ce phénomène est indispensable pour évaluer le fonctionnement d'un carrefour à feux.

On parle souvent de stockage sans gêne. Il est évalué par le concepteur sur la base d'un plan à l'échelle. Il n'existe pas à ce jour de méthodes analytiques pour évaluer ce paramètre. Il faut également être très vigilant sur les poids-lourds. Si un PL = 2 UVP, en matière de stockage il en va tout autrement.

#### **Le non-respect des feux ( $Q_s$ ) :**

Le non-respect du jaune et du rouge par les véhicules peut influencer les résultats en terme de capacité. Lorsque ce taux est élevé, comme par exemple sur les feux de régulation d'accès, il conviendra de prendre en compte cette donnée.

## **II) Choix d'un outil de simulation dynamique**

Différents types d'outils dynamiques existent pour modéliser l'écoulement du trafic sur un réseau intégrant des intersections. Le choix d'un outil est une question complexe. Nous renvoyons le lecteur à la première partie du guide « Etudes de simulation dynamique de trafic, Guide de réalisation » du Cerema.

Concernant les carrefours à feux, il nous paraît essentiel que l'ensemble des grandeurs décrites dans le chapitre précédent puissent être reproduites correctement par l'outil. Si

tel n'est pas le cas, l'outil ne permettra pas forcément d'évaluer correctement un projet de carrefours à feux.

Il est donc fondamental d'avoir une bonne connaissance des lois d'écoulement du modèle, des lois traitent des intersections, ainsi que de l'ensemble des paramètres associés avant de se lancer dans la modélisation d'un projet intégrant des carrefours à feux.

### III) Calage et validation modèle dynamique de carrefour à feux

La méthode proposée est indépendante du modèle choisi. Les lois qui reproduisent l'écoulement des véhicules diffèrent d'un modèle à un autre. La mise en œuvre de la méthode ne fera pas forcément appel aux mêmes paramètres dans tous les modèles. Seule une connaissance approfondie du modèle de choisir les bons paramètres à ajuster pour caler les grandeurs mesurables retenues dans cette méthode.

#### III.1) Calage, validation, pré-calage

##### Calage

Le calage consiste à ajuster les paramètres de l'outil pour reproduire le plus fidèlement possible la situation observée et mesurée sur le terrain. Il repose sur la comparaison d'indicateurs issus du modèle et de la situation observée (jeu de donnée n°1).

##### Validation

La validation consiste à tester le paramétrage obtenu dans la phase de calage avec d'autres données d'entrées (jeu de données n°2) et de vérifier que les marges d'erreur entre le modèle et le deuxième jeu de données sont deux même ordre de grandeur que celles constatées lors du calage. Cela suppose de disposer de deux jeu de données distincts, à savoir deux périodes de mesures différentes.

##### Pré-calage

Préalablement au calage proprement dit, il est important que vérifier que l'outil est apte à reproduire correctement une file d'attente aux feux, notamment sa longueur et sa dynamique de vidage. Certaines grandeurs sont génériques et applicables à la plupart des aménagements. Parmi celles décrites en II :

- Longueur moyenne des véhicules à l'arrêt
- Temps perdus au démarrage
- Retard au démarrage entre deux véhicules (onde de vidage)

### III.2) Pré-calage/paramétrage

Ce pré-calage est réalisé sur un cas fictif : une file gérée par feu. Ce pré-calage est spécifique à chaque outil de simulation. Il est effectué une seule fois. Les valeurs des paramètres calés seront utilisées dans toutes simulations utilisant l'outil concerné.

Cependant si les équations régissant l'écoulement du trafic de l'outil sont modifiées, la démarche doit être refaite de nouveaux. Une vigilance s'impose lors des changements de version des logiciels.

#### 1. Caler la longueur moyenne d'un uvp à l'arrêt

Caler le paramètre de l'outil qui régit la distance entre les véhicules à l'arrêt pour représenter correctement la longueur moyenne d'un véhicule à l'arrêt. On modélisera une arrivée de 10 véhicules sur un feu au rouge permanent. Le paramètre devra être ajusté pour parvenir à une longueur totale moyenne de 65m. On effectuera une dizaine de réplication si le modèle est stochastique. Ce paramètre étant fixé il ne devra pas être modifié dans le processus de calage.

#### 2. Caler le temps perdu au redémarrage

On calera ensuite le paramètre ou les paramètres permettant de modifier le temps perdu au redémarrage pour qu'il colle à la valeur 2,9 secondes. On effectuera une trentaine de mesures si l'outil est stochastique. On ne modifiera plus par la suite, le ou les paramètres concernés.

#### 3. Caler l'onde de vidage

On calera ensuite les paramètres permettant de modifier la vitesse de l'onde de vidage. On modélisera une arrivée de 10 véhicules sur un feu au rouge. Puis, on vérifiera l'instant de démarrage du dernier véhicule (le dixième), de telle sorte que ce temps colle à la vitesse d'onde de 16,5 km/h.

Compte-tenu des valeurs indiquées à la section II. Le temps moyen de démarrage du 10ème véhicule est d'environ 15,5 secondes ( $\delta t_0 + 9 \times \delta t$ ).

Si le modèle est stochastique, on effectuera une vérification sur au moins 10 réplications.

### III.3) Etablir une table de correspondance entre débits de saturation / « vitesses désirée ».

Afin de faciliter le calage futur sur les situations réelles ou projetées, il est nécessaire d'avoir des tables qui permettent de traduire le débit de saturation en paramètres propres à l'outil. Dans de nombreux outils c'est la vitesse désirée par section ou sur les mouvements tournants qui est déterminante pour le débit de saturation.

On construira une table permettant de codifier les débits de 1200 à 2000 uvp/h en paramètres du modèle. C'est un point important qui permet aussi de tester l'aptitude de l'outil à reproduire la variabilité du débit de saturation.

Le débit de saturation correspond au trafic qui s'écoule au droit d'un feu au vert permanent avec une demande en entrée supérieure à la capacité.

Pour construire cette table de correspondance :

- 1) On choisit une valeur de « vitesse désirée »  $V_d$ .
- 2) On simule une entrée gérée par feu. Le feu est d'abord rouge, pour constituer une file d'attente. En amont, on continue d'injecter une demande supérieure à l'offre.
- 3) A partir de l'instant où le feu est vert, on mesure le nombre de véhicules qui franchissent le feu sur une période fixe d'une durée de 15mn de vert.
- 4) On multiplie par 4 le nombre de véhicules pour obtenir le débit de saturation.
- 5) On retourne à l'étape 1 en choisissant une autre valeur.

On pourra balayer les vitesses par pas de 5 km/h ou mieux précéder par dichotomie pour obtenir une table qui couvrent tous les débits de saturation par pas de 50 uvp/h

Qs	Vd
1200	V(1200)
1250	V(1250)
1300	V(1300)
...	
1900	V(1900)
1950	V(1950)
2000	V(2000)

Cette table est unique par modèle. Il n'est donc pas utile de la refaire à chaque fois. Cette table doit être annexée au rapport de simulation pour faciliter la vérification.

### III.4) Calage

Dans ce qui suit, on supposera que le paramétrage du modèle a été fait en respectant les trois premiers points de la section III.2.

#### 1) Calage/paramétrage des débits de saturation

Bien représenter le débit de saturation est fondamental, et c'est particulièrement important lorsque les durées de vert varient.

Situation existante	Situation future
Pour chaque ligne de feu, on mesure le débit de saturation sur le terrain, et on utilise la table de correspondance pour ajuster le modèle.	On procède à une estimation en fonction du contexte. Pour les mouvements tournants on tient compte des coefficients de pondération

Pour la mesure du débit de saturation, cf. annexe 1.	directionnels. Par exemple pour un TAD classique le coefficient est 1,1. Si le débit de saturation d'une file est de 1800, le débit de saturation pour le mouvement tournant est de $1800/1,1$ soit 1636 uvpd. La table de correspondance fournira le paramétrage pour le mouvement tournant en question. La question de l'interaction des mouvements tournants avec les piétons, est plus complexe : cf. section IV.
--	--

## 2) Calage en débit

Situation existante	Situation future
On mesure les écarts entre le modèle et le jeu de données n°1 sur les différents points de mesures. Les écarts peuvent traduire soit des erreurs aux étapes précédentes, soit des erreurs dans l'estimation de la demande. Une analyse spécifique sera faite sur les débits entrants et les débits sortants du réseau. Elle facilite la recherche des erreurs.	Il n'est pas possible de se caler sur un jeu de données existant. On vérifiera que les débits modélisés au droit des lignes de feux sont conformes aux calculs analytiques.

## 3) Calage en temps de parcours

Situation existante	Situation future
On mesure les écarts entre le modèle et le jeu de données n°1. Ce calage n'est valide que si les points origines de calcul des temps de parcours sont situés hors congestion.	Il n'est pas possible de se caler sur un jeu de données existant, et aucune méthode analytique ne peut être utilisée pour comparer.

### Calage temps de franchissement des carrefours (Optionnel)

Cette validation ne présente d'intérêt que pour valider un modèle par rapport à une situation existante sur certains carrefours particulièrement critiques.

Le temps de franchissement correspond au temps de parcours entre ces deux points :

- 1) Un point de mesure aval situé au droit des feux,
- 2) Un point de mesure amont situé avant la file d'attente.



#### 4) Calage en longueur de file d'attente (optionnel)

Situation existante	Situation future
On mesure les écarts entre le modèle et le jeu de données n°1. Cf. détails ci-dessous.	Il n'est pas possible de se caler sur un jeu de données existant.

**Détails :** Cette validation ne présente d'intérêt que pour valider un modèle par rapport à une situation existante. Elle est particulièrement intéressante pour les carrefours qui présentent des entrées saturées.

##### **Entrées non saturées :**

A chaque cycle le modèle fournira la longueur de la file d'attente en fin de rouge ou le nombre total de véhicules ayant été arrêtés. On effectuera autant de répliques nécessaires pour obtenir une distribution complète, et calculer la valeur moyenne et la valeur à 95%. Ces valeurs seront comparées aux mesures terrains.

##### **Entrées saturées :**

La méthode doit être calée par rapport aux relevés terrains. Un relevé périodique des files d'attente est effectué sur le terrain. On choisira une période multiple de la durée de cycle pour les fonctionnements à temps fixe. Le modèle devra calculer les longueurs de file d'attente pour chacun de ses instants de façon à disposer d'une chronique de la file d'attente. Elle sera ensuite comparée aux relevés terrain. Cette validation permet d'apprécier si la chronique de demande dans le modèle est bien calée.

### III.3) Validation

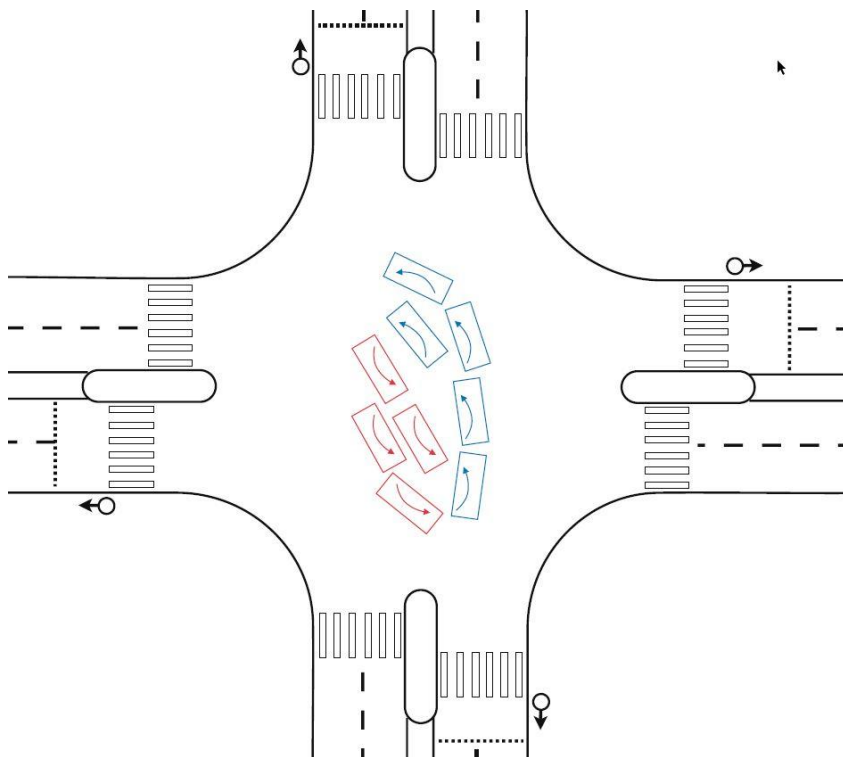
On répète les points 2, 3, 4 de la section précédente avec le jeu de données n°2. Pour que cette étape soit intéressante, il faut disposer d'un jeu de données n°2 assez différent du premier jeu : demandes différentes, et réglages des feux différents. Par exemple HPM et HPS, ou jour de semaine, samedi etc... Seule une connaissance approfondie du terrain permet de bien choisir les périodes à mesurer.

## IV) Vérifications supplémentaires

### **Le stockage des véhicules à l'intérieur du carrefour**

C'est l'un des gros points faibles des modèles dynamiques, notamment des modèles microscopiques. Les véhicules sont assujettis à suivre des trajectoires invariables dans le temps. Or le stockage des véhicules à l'intérieur du carrefour est complexe. Les poids-

lourds suivent des trajectoires différentes de celles des véhicules légers et les véhicules se stockent différemment selon la pression du trafic. On vérifiera pour les cycles les plus chargés, le nombre de véhicules stockés en fin de vert à l'intérieur du carrefour. Une vérification sur 15 cycles paraît suffisante. On comparera ces valeurs à celle estimées à partir du plan du stockage dit « sans gêne » pour les nouveaux aménagements ou aux valeurs estimées par observation visuelle pour les carrefours existants.



### Interaction piétons/véhicules

Les outils de simulation microscopique ont tous un module de simulation des piétons et leurs interactions avec les véhicules. Ils nécessitent toutefois une connaissance fine des flux de piétons. Cette approche en urbain est sans doute préférable à l'utilisation de méthode type coefficients sur les mouvements tournants. Il est d'usage de prendre un coefficient de 1,3 dès que le flux piéton est supérieur à 250 piétons par heure. Mais ce coefficient est sujet à caution. Il doit être compris comme une marge de sécurité dans les calculs.

Pour les situations existantes on pourra vérifier l'impact des traversées piétonnes sur les mouvements tournants à l'aide de deux indicateurs : le nombre moyen et le nombre maximum de véhicules arrêtés par cycle. Cela permettra de vérifier si l'interaction piétons/véhicules est fidèle à la réalité.

Si l'interaction piéton/véhicule n'est pas modélisée. On pourra observer sur le terrain le pourcentage du vert où l'écoulement des TAD est bloqué par le passage des piétons. Ce pourcentage fournira une valeur approchée du débit de saturation pour le mouvement tournant.

Exemple : avec 40% du temps bloqué, le débit de saturation du mouvement directionnel est de 60% de celui du mouvement tout-droit. Pour le calcul de la demande en uvpd décrite dans l'annexe1, il faudra appliquer au mouvement tournant une pondération de  $1 / 0.6$  soit 1,66.

## V) Documents nécessaires

Pour vérifier la qualité d'une prestation de simulation dynamique. Il est indispensable de disposer d'un certain nombre de documents, au-delà des animations.

1. Table de correspondance des débits de saturation
2. Schéma du réseau modélisé avec (les hypothèses de débits de saturation, modélisation des intersections, coefficient sur les mouvements tournants, etc...)
3. Chroniques de demande de trafic.
4. Schémas de trafic (débits) sur les sections et mouvements tournants aux différentes heures, ratio de vert par heure pour chaque ligne de feux,
5. Tableaux des indicateurs suivis pour le calage et la validation.

# ANNEXE I

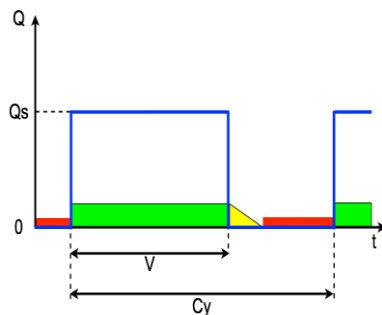
## Calculs analytiques des carrefours à feux

### Rappels et limites des méthodes

#### I) Fonctionnement des entrées d'un carrefour à feux

Le modèle d'écoulement le plus couramment utilisé repose sur le fait que le temps perdu au démarrage par les véhicules est compensé par les passages au jaune. On fait alors les hypothèses simplificatrices suivantes :

- les véhicules s'écoulent dès le début du vert et au même rythme (débit de saturation  $Q_s$ ) durant tout le vert,
- aucun véhicule ne passe pendant le jaune et le rouge.



**Limites du modèle :** les verts trop courts ou trop longs conduisent à des estimations optimistes de la capacité. En effet, il a été observé sur plusieurs sites que seulement un à deux véhicules par cycle franchissent les feux lorsque le vert est fixé à son minimum réglementaire de 6 secondes. Pour les durées de verts très longues on constate également des capacités anormalement faibles. La littérature canadienne indique que les temps inter-véhiculaires sont à peu près constants entre la 15ème et la 35ème secondes. Ils augmentent légèrement entre la 35ème et la 50ème secondes. Ils augmentent fortement à partir de la 50ème seconde. Cette raison a conduit les Canadiens à effectuer les calculs de capacité par tranche de 5 secondes.

**Temps perdu au démarrage :** 2,9 secondes.

**Passage au jaune et passage au rouge :** les franchissements de jaune et de rouge sont variables d'un carrefour à l'autre, d'une entrée à l'autre. On observe une grande diversité qui va de 0,5% à plus de 10% selon les études. Lors d'une étude nationale

réalisée en 2011 sur 50 carrefours tests, le taux de franchissement moyen au rouge était de 1,56%. Les taux de franchissement aux heures de pointes sont plus faibles qu'aux heures creuses. Les franchissements au jaune sont plus nombreux.

**Capacité d'une file de circulation au droit d'un feu :** la capacité  $C_a$  d'une voie (ici au sens de la file) gérée par un feu est égale à  $Q_s \times V / C_y$ ,  $Q_s$  étant le débit de saturation, c'est-à-dire le nombre maximum de véhicules pouvant s'écouler sur une file pendant une heure lorsque le feu est en permanence vert.

Le débit de saturation ne prend pas en compte les perturbations externes sur l'écoulement (arrêts de véhicules, traversées de piétons). Des mesures récentes montrent que dans le contexte urbain de nombreuses perturbations impactent la capacité des entrées et que les valeurs horaires données par la formule de capacité sont en général optimistes.

**Le débit de saturation :** il est lié à la distribution des temps inter-véhiculaires au niveau de la ligne de feux pendant le vidage de la file d'attente en l'absence de perturbations externes.

Sa mesure est délicate. La littérature nord-américaine montre que les temps inter-véhiculaires sont plus longs au début et se stabilisent à partir du 5<sup>ème</sup> véhicule et tant que la file d'attente n'est pas vide. Une première méthode pour mesurer le débit de saturation consiste à noter le numéro du dernier véhicule et mesurer l'écart entre le passage de ce dernier et le passage du 5<sup>ème</sup> véhicule. De répéter l'opération sur environ 30 cycles. La valeur moyenne  $\bar{h}$  du temps inter-véhiculaire ainsi obtenue permet d'accéder au débit de saturation :  $Q_s = 3600 / \bar{h}$ .

Une deuxième méthode consiste à n'observer que les cycles saturés et non perturbés sur une file dédiée au tout-droit :

- 1) Sommer le volume de trafic en uvp  $\sum q$  ;
- 2) Sommer les durées de vert  $\sum V$  ;
- 3) Sommer les durées de cycles  $\sum C_y$ .

On obtient alors le débit de saturation :  $Q_s = \sum q \times \sum C_y / \sum V$ .

Le débit de saturation est exprimé en uvp/h : unité de véhicule particulier par heure. Des coefficients d'équivalence propres à chaque type de véhicules permettent de calculer le trafic en uvp. Le guide carrefour à feux donne les valeurs suivantes :

Type de véhicule	Coefficient uvp
Vélos	0,3
Deux-roues motorisés	0,5
Véhicules légers	1

Poids lourds/bus	2
Bus articulés	3

Le guide sur la modélisation du trafic de Transport for London, donne les valeurs suivantes :

Vehicle	PCU Value
Pedal Cycle	0.2
Motor Cycle	0.4
Passenger Car	1.0
Light Goods Vehicle (LGV)	1.0
Medium Goods Vehicle (MGV)	1.5
Buses & Coaches	2.0
Heavy Goods Vehicle (HGV)	2.3
Articulated Buses	3.2

Source : *Traffic Modelling Guidelines V3 (Transport for London)*

**Déclivité** : on pourra tenir compte de la déclivité en réduisant de 50 uvp/h par degré de déclivité pour les montées. On ne modifiera pas le débit de saturation pour les descentes.

#### Méthodes d'estimation du débit de saturation :

On trouve dans la littérature relativement ancienne du Setra une formule composée par la multiplication d'une série de facteurs. Chaque facteur fait l'objet d'une formule ou d'une série de valeurs permettant de prendre en compte la largeur des voies, la présence de stationnement, la taille de l'agglomération, les déclivités, l'environnement de l'intersection. Cette méthode est la traduction française de méthodes développées dans le Highway Capacity Manual, adaptée à la France. On ne trouve pas de trace d'évaluation de la performance de cette méthode.

La version actuelle du Highway Capacity Manual présente une méthode similaire qui n'a pas évolué dans ses principes si ce n'est dans l'explicitation des différents facteurs. On ne dispose pas d'évaluation systématique de la précision de cette méthode. Le guide canadien sur la capacité des carrefours à feux reprend la méthode du HCM mais l'adapte. Il ajoute un facteur d'ajustement fonction de la durée du vert.

Le TRRL a développé une formule globale permettant de prédire le débit de saturation d'une voie au feu en fonction des caractéristiques géométriques. Une évaluation a été

conduite sur 64 entrées de carrefours à feux : elle montre un coefficient de corrélation de 0,52 et un écart résiduel d'environ 120 uvp. Le manuel de référence au Pays-Bas reprend la méthode du TRRL mais en y ajustant certains paramètres.

**Réserve de capacité d'une ligne de feu** : la réserve de capacité  $R$  d'une ligne de feu est la différence entre la capacité de la ligne de feu et la demande de trafic  $R = Ca - d$ .

**Demande de trafic au niveau d'une ligne de feu** : elle correspond au flux exprimé en uvpd/h de la file la plus chargée gérée par la ligne de feu.

**L'uvpd (unité de véhicule particulier direct)** : permet de tenir compte de la gêne à l'écoulement que subissent les mouvements tournants par la giration ou leur interaction avec les piétons. Le passage des uvp aux uvpd se fait par application de coefficients multiplicateurs sur les mouvements tournants conformément au tableau suivant.

	coefficient
Mvt. tout-droit	1
Mvt. tournant	1,1
Mvt tournant avec giration délicate	1,2
Mvt tournant avec de nombreux piétons (>250 piétons/h)	1,3

L'interaction avec les piétons est très difficile à évaluer par les méthodes analytiques. De plus dans de très nombreux cas on ne dispose pas de comptage de flux piéton. Mais les observations sur les carrefours à feux urbains montrent que cette interaction impacte largement les capacités d'écoulement aux feux. Le coefficient 1,3 doit surtout être considéré comme une marge de sécurité dans les calculs.

## II) Fonctionnement interne d'un carrefour à feux

De nombreux carrefours à feux fonctionnent à deux phases. Les véhicules qui tournent à gauche se stockent à l'intérieur du carrefour et dégagent le carrefour en fin de vert. Une insuffisance de stockage au regard du nombre de TAG à chaque cycle peut être à l'origine de blocages internes du carrefour qui réduiront fortement la capacité d'écoulement des entrées.

Dans les hypothèses d'aménagement on prend comme hypothèse que les tournes-à-gauche ne s'écoulent qu'en fin de vert et n'utilisent pas les créneaux disponibles dans le flux adverse. En effet ceux-ci sont rares aux heures de pointe. Le nombre moyen de véhicule en TAG à chaque cycle est égal au nombre total de TAG divisé par le nombre de cycles arrondi à l'unité supérieure. C'est en général cette valeur qui est utilisée. Certains préfèrent utiliser une approche statistique avec le nombre de TAG dont la

probabilité de dépassement est inférieure à 0,95. L'utilisation d'une loi de Poisson est sujet à caution car le flux par cycle est borné par la valeur de vert. En régime saturé l'utilisation d'une loi binomiale avec  $p$  proportion de TAG et  $n$  nombre max de véhicules autorisés par le vert semble plus approprié.

La présence régulière de poids-lourds est très contraignante. Il est donc important de ne pas oublier ces derniers qui se cachent dans les flux exprimés en uvp. En effet, en matière de stockage 1 poids-lourd n'est pas égal à deux véhicules légers car ces derniers peuvent se stocker côte à côte.

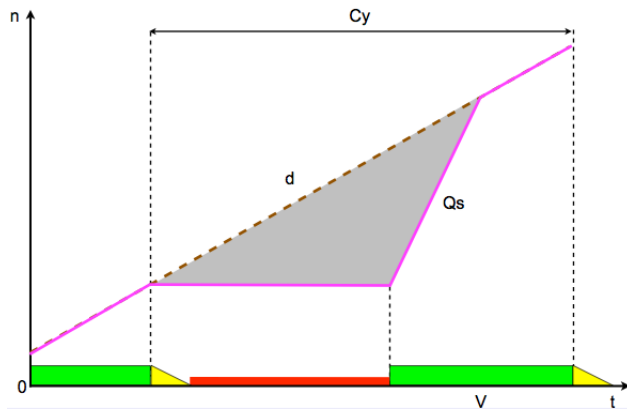
L'estimation du stockage sans gêne se fait en dessinant sur un plan à l'échelle un certain nombre de véhicules de telle sorte qu'ils ne gênent pas l'écoulement des véhicules en tout-droit et qu'il n'y ait pas d'auto-blocage des TAG.

### III) Analyse des files d'attente

L'analyse des files d'attente n'a de sens que si le fonctionnement interne du carrefour est valide. La file d'attente est la résultante d'un écart entre l'offre et la demande de trafic. La nature de l'arrivée des véhicules a une grande influence sur la file d'attente (arrivée uniforme ou arrivée pulsée), présence d'une coordination entre carrefours proches ou non.

**Modèle de file d'attente (verticale) :** ce type de modèle est basé sur la méthode des débits cumulés. On prend comme hypothèse une arrivée uniforme des véhicules. Ce modèle est donc plutôt adapté aux carrefours dit isolés. Il est représenté sur la figure suivante. Le nombre de véhicules ayant franchi la ligne d'effet des feux en fonction du temps est figuré en violet pour la situation où les feux fonctionnent : il dépend du fonctionnement des feux et de la demande de trafic  $d$ . Lorsque le feu est au vert permanent, le nombre de véhicules ayant franchi la ligne des feux est figuré en tireté et violet : il dépend uniquement de la demande de trafic  $d$  (trafic de la voie la plus chargée gérée par la ligne de feu en question). La différence entre les deux courbes constitue le stock au niveau du feu.





**Le retard individuel moyen :** il représente le temps moyen perdu par chaque véhicule et s'exprime alors comme suit :

$$\bar{r} = \frac{(Cy - V)^2}{2Cy(1 - \frac{d}{Qs})}$$

Sur la figure il est représenté par l'aire totale hachurée en gris divisé par le nombre de véhicules écoulés en un cycle.

**La longueur de la file d'attente en fin de rouge :** En supposant constante la densité de véhicule, elle est égale à :

$$\bar{L}_{uvp} \times d \times (Cy - V) / 3600$$

Avec  $\bar{L}_{uvp}$  la longueur moyenne de la file d'attente associée à un uvp.

**L'extension maximale de la file d'attente :** elle correspond à la position du dernier véhicule impacté par la file d'attente. Avec le modèle précédent elle s'exprime de la manière suivante :

$$\bar{L}_{uvp} \times \frac{d (Cy - V)}{3600(1 - \frac{d}{Qs})}$$

**$\bar{L}_{uvp}$  : 6,5m par uvp.**

Le raffinement selon les différents types de véhicules n'est pas aisé à partir de ce type de méthode.

**Modèle horizontal de file :** on peut également évaluer en procédant par ondes (l'onde de redémarrage rattrape l'onde de formation de la file).

Les observations montrent que le retard au démarrage par véhicule est d'environ 1,4 s, appelons  $\delta t$  cette durée. La moyenne observée sur les mesures réalisées par

observation vidéo est de 1,38s. L'onde remonte plus vite que dans le modèle vertical précédent.

On va raffiner le modèle en ajoutant le temps de réaction au vert  $\delta t_0$ .

L'extension maximale de la file d'attente s'exprime alors sous cette forme :

$$\bar{L}_{uwp} \times d \times \frac{(Cy - V + \delta t_0)}{3600(1 - d \times \frac{\delta t}{3600})}$$

Elle donne en général des valeurs plus faibles que la première formule, et les écarts entre les deux sont faibles.

**Variabilité de la file d'attente** : les formules précédentes fournissent des valeurs moyennes de file d'attente pour une arrivée uniforme des véhicules en amont des feux en absence de saturation. Les retours d'expérience montre qu'elles sont suffisantes en milieu urbain pour évaluer le dimensionnement des zones d'attentes (élargissement). En revanche lorsque l'on souhaite traiter de problèmes de sécurité ou de positions de capteurs, une approche probabiliste est nécessaire. L'utilisation de la loi de Poisson pour compter le nombre de véhicules à chaque cycle est pertinente. Soit  $m$  la valeur moyenne de la file d'attente calculée par l'une des formules exposées précédemment. La valeur, dont la probabilité d'être dépassée est inférieure à 5%, est approchée par la formule  $m + 1,7\sqrt{m}$ .