

---

## Des systèmes de transport intelligents pour gérer le trafic routier

---

Dans ce chapitre, nous présentons un état de l'art de la gestion du trafic routier à l'aide de systèmes de transport intelligents. Nous axons volontairement cette étude sur la gestion des feux de circulation puis, sur des aspects touchant aux systèmes distribués. Les classes de modèles de trafic existant sont tout d'abord décrites en section 2.1. Puis, nous détaillons le fonctionnement d'une intersection à feux de circulation en 2.2 et définissons le modèle classique ainsi que les métriques et paramètres qui sont traditionnellement utilisés (p. ex., le temps de feu vert). Ensuite, dans la section 2.3, nous caractérisons les systèmes de transport intelligents et leur application aux systèmes de gestion des feux de circulation. Les équipements permettant la détection des véhicules – entre autres – y sont également abordés. Enfin, nous terminons avec l'étude des réseaux de communication en section 2.4 et le cas des systèmes distribués, avec l'exemple de réseaux de capteurs sans fil, en section 2.5.

### 2.1 Modélisation du trafic routier urbain

Un réseau routier est conçu afin de permettre à ses usagers de se déplacer d'un point à un autre. Dans ce contexte, il est composé d'un ensemble de routes avec plus ou moins de voies, en fonction des zones d'activités et des lieux d'habitation. Les croisements entre les routes étant inévitables en milieu urbain, de par leur concentration, des intersections permettent de gérer les flux de véhicules entrant en conflit, pour leur sécurité et afin d'éviter les interblocages et de permettre aux automobilistes de changer de route. Ces intersections, ou dans certains cas des carrefours giratoires, régulent le trafic et appliquent généralement des règles de priorité à droite ou sont équipés de feux de circulation pour gérer les situations particulièrement dangereuses. Le réseau routier urbain peut donc être vu comme étant une collection d'intersections, liées les unes aux autres par des routes, auxquelles peuvent venir se greffer des éléments opérationnels (panneaux, feux de circulation, etc.).

Sur un réseau de plusieurs intersections, les axes sont généralement classifiés en *artères* principales ou secondaires, en fonction de leur utilisation et de leur capacité. À titre d'exemple, une grille d'intersections est représentée sur la figure 2.1. L'intersection centrale est située sur deux axes (artères). Les numéros indiquent le nombre de sauts qui séparent cette intersection des autres intersections. Ainsi, une ligne droite formée de plusieurs intersections consécutives et accueillant une majorité du trafic disponible est désignée comme une artère principale, tandis que les autres routes, accessibles sur chacune des intersections, sont désignées comme étant secondaires. Cette différenciation est utile pour la coordination des feux de circulation, qui s'effectuent dans la majorité des systèmes traditionnels sur les artères principales [US 08]. Elle est également utile à la compréhension de la formation des embouteillages, qui ont tendance à se former là où le trafic est plus fort. À ce stade, il n'est toutefois pas utile de décrire ces phénomènes, nous les introduisons toutefois dans le chapitre 6.

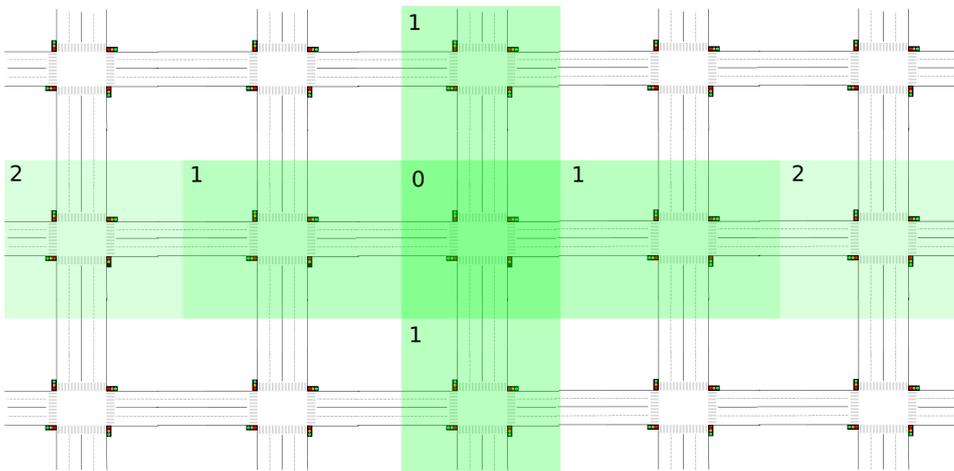


FIGURE 2.1 – Exemple d'une grille d'intersections.

Décrire le trafic routier existant sur ce type de réseau est crucial. Non seulement, ce type d'étude permet de planifier les évolutions à entreprendre sur le réseau routier (p. ex., travaux), mais elle permet également – de nos jours – de réaliser des simulations numériques permettant d'anticiper certaines difficultés, telles que les embouteillages ou accidents.

Le trafic routier a ainsi été décrit au travers de nombreux modèles [Dim12], notamment à partir des années 1930 où Greenshields et *al* [GCM+35] se sont intéressés à étudier les termes de densité (de véhicules), de capacité (des voies – routes) et de vitesse. La recherche de nouveaux modèles s'est ensuite accélérée dans les années 1950. Greenshields et *al* se sont intéressés aux performances des intersections routières [GSE46]. Chandler et *al* [CHM58] ont étudié le suivi de véhicules et les comportements que les conducteurs peuvent avoir les uns par rapport aux autres. Lighthill et *al* [LW55] ont, pour leur part, étudié des notions de débit dès les années 1955, tandis que des travaux se basant sur la théorie des files d'attente apparaissent [War52].

Ces travaux ont, entre autres, défini des modèles et des notions fondamentales de la gestion du trafic routier. Seulement, depuis leur publication, les conditions de circulation ont grandement évolué, de même que les technologies et les théories touchant aux mathématiques ou aux systèmes informatiques. Aujourd’hui, de nombreuses modélisations du trafic routier sont nées, se basant sur d’anciens modèles ou profitant de cette ascension. Pour cette raison, ces modèles sont généralement classifiés en deux principales familles [HB01], que nous décrivons ci-après. Tout d’abord, les modèles *microscopiques*, qui décrivent les véhicules individuellement. Ensuite, les modèles *macroscopiques*, qui décrivent la circulation à l’échelle d’un ensemble de véhicules sur une plus grande longueur de route.

Notons que deux autres classes de modélisations existent, mais sont moins courantes que les modèles microscopiques ou macroscopiques. D’une part, les modèles *mesoscopiques* sont une classe de modèles intermédiaire [PMN97 ; HB01]. Ils permettent de modéliser les véhicules par paquets, qui sont représentés par des pelotons pouvant s’échanger des véhicules. D’autre part, les modèles *sous-microscopiques* sont à un niveau en dessous des modèles microscopiques. Ils considèrent que chaque véhicule peut se diviser en plusieurs sous-structures (p. ex., modélisation de la vitesse de rotation du moteur par rapport à la vitesse du véhicule). Ces quatre classes de modèles sont représentés par la figure 2.2.

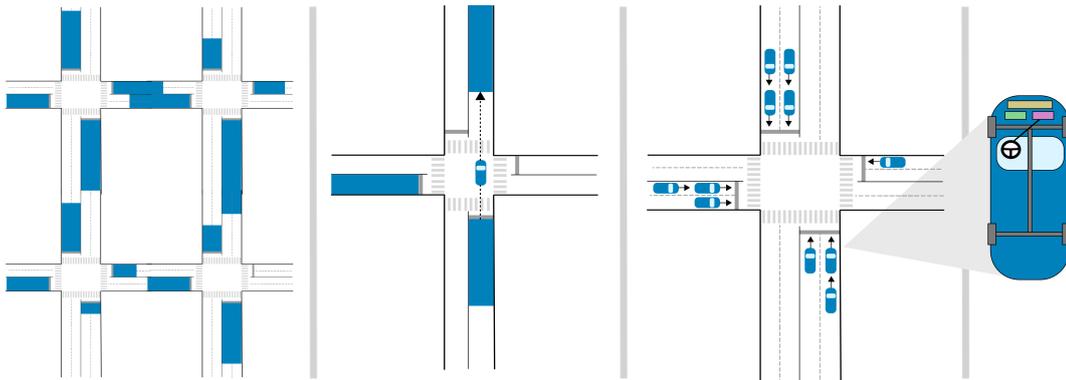


FIGURE 2.2 – Les quatre classes de modèles du trafic routier. De gauche à droite : macroscopique, mesoscopique, microscopique et sous-microscopique.

### 2. 1. 1 Modèles microscopiques

Les modèles microscopiques permettent de décrire le comportement individuel de chaque véhicule et conducteur sur le réseau routier. Beaucoup de paramètres sont généralement à prendre en compte, mais ils permettent de réaliser des simulations numériques réalistes (p. ex., simulateur SUMO [BBEK11 ; KEBB12]). Dans ces modèles, le comportement d’un véhicule est perçu de façon individuelle par ses voisins.

La physique statistique permet d’étudier le comportement de systèmes physiques comprenant un nombre élevé de particules. Autrement dit, il est possible de décrire un système macroscopique à partir des caractéristiques de ses éléments, qui sont microscopiques. Le rapprochement avec le trafic routier urbain est évident : les véhicules sont les éléments mobiles et sont donc les particules du système. Les interactions

entre les particules sont déterminées par la façon dont les véhicules influencent le mouvement des uns et des autres [CSS00]. L'un des modèles suivant ce principe et représentatif des modèles microscopiques est le modèle de suivi de véhicules (*car following model* [CHM58]), qui décrit le comportement d'un véhicule en suivant un autre.

Les modèles à base d'automates cellulaires sont apparus plus récemment et sont également adaptés à la modélisation microscopique du trafic routier [NS92]. Ils sont composés d'une grille régulière de cellules pouvant chacune posséder un état, choisi parmi un ensemble fini et qui peut évoluer au cours du temps. L'état d'une cellule à un instant est fonction de l'état d'un nombre fini de cellules voisines à l'instant précédent. À chaque unité de temps, les règles sont appliquées sur chacune des cellules de la grille, produisant ainsi de nouvelles générations de cellules héritant directement de la génération précédente. Nagel et *al* [NS92] ont proposé au début des années 1990 un modèle basé sur des automates cellulaires permettant de représenter l'évolution du trafic sur une autoroute. Chaque cellule représente une portion de l'autoroute, pouvant être occupée ou non par un véhicule roulant à une vitesse variable. Chaque véhicule avance donc à chaque changement d'état avec une distance proportionnelle à sa vitesse. D'autres modèles considèrent le temps de réaction des conducteurs, rendant les états métastables [BSSS98]. Ces temps de réactions sont intégrés en faisant dépendre une probabilité de freinage à la vitesse du véhicule. Certains modèles permettent aux véhicules d'anticiper la vitesse des véhicules qui les précèdent [KSS00]. Notons que les automates cellulaires trouvent également utilité dans les applications liées au trafic, comme la gestion des feux de circulation, où nous pouvons imaginer dédier une cellule à une intersection qui se coordonnerait par rapport à ses voisines.

## 2. 1. 2 Modèles macroscopiques

Les modèles macroscopiques servent à la théorie analytique et permettent de décrire le comportement de flux de véhicules, sans distinguer les véhicules individuellement. Le trafic est ainsi représenté de manière agrégée. Ces modèles sont parmi les plus anciens et considèrent le trafic comme étant un phénomène continu [Whi11 ; LW55 ; GCM+35]. Ils sont généralement dérivés de la mécanique des fluides, plus particulièrement de la dynamique des fluides (c.-à-d., fluides en mouvement). L'exemple le plus parlant est celui des autoroutes homogènes, où aucune distinction n'est opérée sur les véhicules. Un autre exemple d'application est le cas des carrefours giratoires. [LL11] décrit par exemple les flux de circulation comme étant des fluides en opposition. Le constat établi est que généralement, le plus gros flux (en termes de véhicules) prend le dessus (et donc la priorité) sur le flux de plus faible importance. Ces modèles sont toutefois plutôt utilisés pour des études de densité de trafic et de capacité.

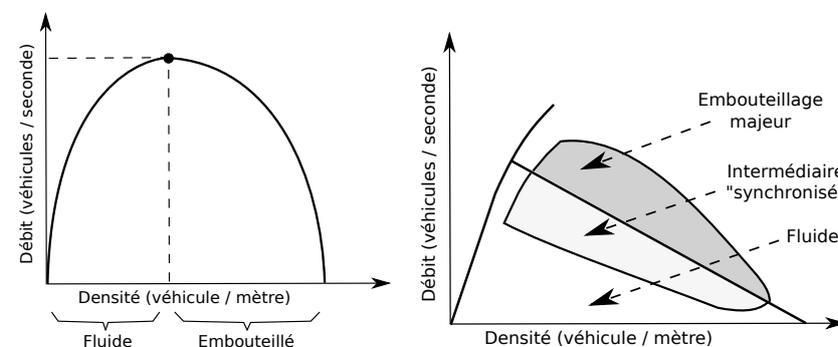
La théorie des files d'attente rentre dans la catégorie des modèles macroscopiques et se veut bien adaptée au cas du trafic routier [War52 ; Akç97 ; YAKS10]. Cette théorie appartient au domaine des probabilités et permet une description détaillée des files d'attente de véhicules, réparties sur un ensemble de voies. Dans le cas des intersections, une file d'attente se crée lorsque le nombre d'automobilistes (clients) dépasse un certain seuil ou lorsque, par exemple, un feu est au rouge (serveur). Il est

particulièrement facile avec cette théorie de calculer des valeurs telles que le nombre moyen de véhicules en attente, en service, le temps moyen d'attente ou encore de séjour dans le système. Ceci, en prenant généralement pour modèle une file M/M/1, où l'unique serveur est un feu de circulation. Notons par exemple  $\lambda$  la fréquence moyenne d'arrivée et  $\mu$  la fréquence moyenne de service. La charge du système est décrite par  $C = \lambda/\mu$ . Si  $C < 1$ , nous pouvons obtenir le temps moyen d'attente avec  $C/(\mu \cdot (1 - C))$ , le nombre moyen de véhicules en attente par  $C/(1 - C)$ , ou encore le temps moyen de séjour dans le système par  $(1/\mu) \cdot (1/(1 - C))$ .

Dans la suite de cette thèse, les algorithmes que nous définissons ont plutôt tendance à privilégier des modèles macroscopiques. Dans le cas des feux de circulation, nous pouvons par exemple considérer qu'un feu doit passer au vert si l'une de ses files contient un nombre trop important de véhicules. À l'inverse, les véhicules pourraient être considérés individuellement, comme par exemple lorsqu'il s'agit de détecter une fraude (p. ex., passage au feu rouge) ou un obstacle. Le principal simulateur utilisé dans cette thèse, SUMO [BBEK11 ; KEBB12], possède une vision microscopique du trafic routier, afin de modéliser les comportements individuels des automobilistes et de se rapprocher d'un cas de figure réel.

### 2. 1. 3 Le diagramme fondamental du trafic

Le diagramme fondamental du trafic est une alternative aux modélisations précédentes et permet de décrire la relation entre le débit et la densité d'un réseau routier [CSS00]. Il est observé théoriquement, et plusieurs variations sont identifiables expérimentalement [Ker00]. Il distingue deux états de trafic différents : le cas où le trafic est fluide (c.-à-d., vitesse proche de la vitesse libre) et le cas où il est embouteillé (c.-à-d., les véhicules se déplacent à une vitesse inférieure à la vitesse libre). La figure 2.3(a) représente la forme générale de ce diagramme. Des variantes existent, telles que celle suggérée par la théorie des trois phases du trafic, de Kerner [Ker00]. Elle considère un état supplémentaire d'embouteillage, comme représenté sur la figure 2.3(b).



(a) Diagramme fondamental du trafic. (b) Théorie des trois phases du trafic.

FIGURE 2.3 – Diagrammes débit-densité.

La modélisation du trafic routier peut suivre différentes théories. Toutefois, dans la plupart des cas, il est question de quantifier les flux de véhicules. En d'autres termes, le fonctionnement d'un système de transport dépend fortement de sa charge. Il y a une nécessité de contrôler – et donc de mesurer – les variations du trafic routier afin d'optimiser le fonctionnement du système de transport. Dans la partie suivante, nous étudions plus particulièrement le fonctionnement des feux de circulation, afin d'appuyer ces remarques. Nous étudions ensuite les systèmes intelligents mis en place de nos jours.

## 2. 2 Le cas particulier des feux de circulation

### 2. 2. 1 Fonctionnement traditionnel d'une intersection

Le modèle d'intersection classique est représenté sur la figure 2.4. Il est composé d'un ensemble de quatre *directions* ou *routes* possibles notées  $D$  (p. ex.,  $E$  sur la figure 2.4). Ce modèle est celui utilisé dans la plupart des travaux de la littérature, mais rien n'interdit de l'étendre. Chaque direction peut être décomposée en une *direction entrante* et une *direction sortante*, ou bien des deux. Une direction entrante permet aux véhicules, répartis sur une ou plusieurs *voies*, de traverser l'intersection vers une direction sortante, qui fait le lien avec une intersection voisine. Sur chaque direction entrante, les véhicules tournant à gauche utilisent la voie la plus à gauche, tandis que la voie la plus à droite est généralement utilisée pour les véhicules allant tout droit ou tournant à droite. Nous nous plaçons dans un scénario où les conducteurs conduisent du côté droit de la route.

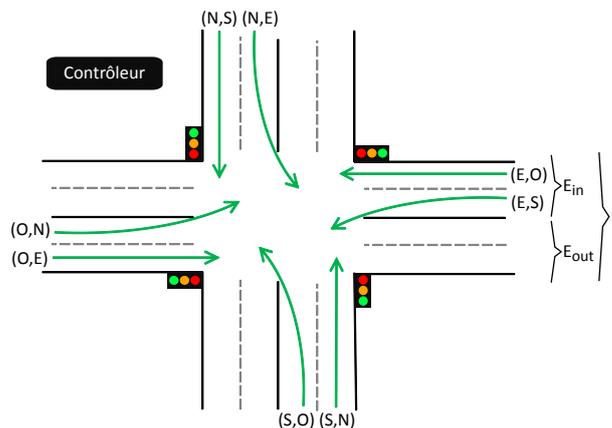


FIGURE 2.4 – Modèle de carrefour généralement utilisé dans la littérature.

Typiquement, un véhicule entre sur l'intersection par une direction  $a \in D$  et ressort par une direction  $b \in D$  (les cas où  $a = b$  sont possibles). Chaque possibilité d'entrée-sortie décrit par le couple  $(a, b)$  est un *mouvement* possible sur l'intersection. Sur la figure 2.4, le mouvement  $(E, S)$  est par exemple le mouvement allant de la direction  $E$  à la direction  $S$ . Un mouvement peut être accessible depuis plusieurs voies (p. ex., deux voies qui permettent d'aller tout droit). À l'inverse, une voie peut

proposer plusieurs mouvements possibles (p. ex., aller tout droit ou tourner à droite). Nous supposons ici qu'un feu de circulation contrôle un mouvement ou, au moins, une direction entrante. Enfin, notons que les mouvements allant à droite ne sont pas représentés car sont confondus avec les mouvements allant tout droit. Il paraît évident de dire que si un mouvement allant à droite rentre en conflit avec un autre mouvement, alors cela est nécessairement le cas pour le mouvement allant tout droit qui y est associé.

Afin de régir le fonctionnement des feux de circulation, des mécanismes combinatoires et temporels spécifiques sont utilisés. Nous les introduisons ci-après et fournissons l'annexe A en guise de support et d'illustration.

## 2. 2. 2 Gestion des séquences de feux

### 2. 2. 2. 1 Vocabulaire

**Définition 2.** Un **contrôleur de feux** est un équipement permettant de veiller au bon fonctionnement des feux de circulation. Il applique une stratégie de signalisation en enclenchant séquentiellement les feux. Il est traditionnellement rattaché à un seul carrefour mais peut, dans certains cas, en gérer plusieurs. Typiquement, un contrôleur possède les éléments principaux suivants [Min06] :

- Une *unité d'énergie*.
- Une *unité de contrôle*, donnant l'ordre d'enclenchement des feux.
- Une *unité d'avertissement rapide*, réagissant en cas d'erreur critique (p. ex., en mettant un feu orange clignotant sur l'ensemble des feux).
- Une *unité de gestion des conflits*, qui est programmée avec les combinaisons de feux verts autorisés et qui vérifie les données envoyées par l'unité de contrôle. Elle utilise généralement une *matrice de conflits* afin de savoir quels mouvements peuvent se dérouler simultanément. Différents types de conflits existent et peuvent être triés en fonction de leur gravité. Les conflits entre mouvements latéraux sont, par exemple, généralement interdits. A l'inverse, certaines configurations autorisent le déroulement de deux mouvements conflictuels, plus légers, simultanément (p. ex., mouvements tournant à gauche). La figure 2.5 donne un exemple d'une telle matrice, qui pourrait être utilisée sur l'intersection décrite en 2. 2. 1. Sur cet exemple, nous pouvons constater que le mouvement  $(N, S)$  peut avoir le feu vert avec le mouvement  $(S, N)$ , mais pas avec le mouvement  $(E, 0)$ , pour des raisons de sécurité. Cette unité fait appel à l'unité précédente en cas d'erreur ou de faute constatée sur l'un des feux.
- Une *unité d'administration*, pour prendre le contrôle du carrefour (p. ex., par la police, ingénieurs).
- Dans certains cas, une *unité de détection*, connectée à des *détecteurs* de véhicules.

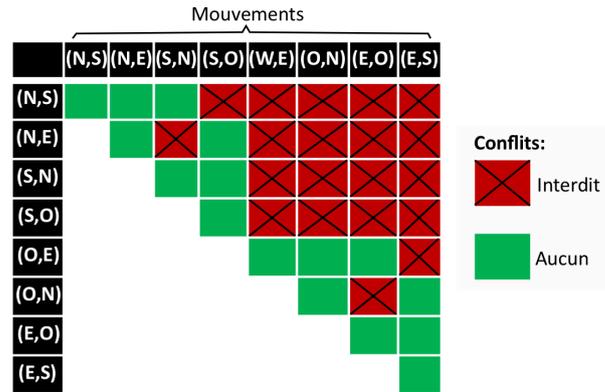


FIGURE 2.5 – Exemple de matrice des conflits.

**Définition 3.** Un **détecteur** est une technologie permettant de récolter et transmettre des informations environnementales à un nœud traitant.

**Définition 4.** Une **phase** est un intervalle de temps durant lequel une combinaison de feux verts autorisée par l'unité de gestion des conflits est activée. Les phases sont déterminées à partir des mouvements que chaque direction peut effectuer. Dans la mesure du possible, elles ne doivent pas mettre de mouvement en *conflict*, le principe même des feux de circulation étant d'assurer une certaine sécurité entre les flux d'usagers.

**Définition 5.** Un **cycle** correspond à l'enchaînement d'un ensemble de phases successives. Il déroule l'ensemble des phases et mouvements possibles, de manière à ce que toutes les voies aient au moins une fois le feu au vert. Lorsque l'intersection est équipée de dispositifs de mesure, cette règle n'est pas nécessairement appliquée (par exemple, les voies sans véhicules peuvent ne pas avoir le feu vert pendant un ou plusieurs cycles).

**Définition 6.** Un **plan de feux** correspond à la description d'un cycle donné, et définit les différentes phases à dérouler ainsi que leur durée. Généralement, un plan de feu est conçu pour une tranche horaire spécifique, en fonction du niveau de trafic moyen à absorber (p. ex., un plan de feu plus court pour la nuit, un autre plus long en heure de pointe). Exemple donné en annexe A où le plan de feux est constitué d'un cycle de trois principales phases.

### 2. 2. 2. 2 Création d'un plan de feux

Face à la multitude de constructeurs et de spécifications, plusieurs organisations se sont regroupées dans le but de mettre en place des nomenclatures, afin de favoriser le développement des STI et d'éviter les incompatibilités techniques et fonctionnelles. Aux États-Unis par exemple, dès le début des années 1990, la NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) s'est chargée de la rédaction de telles normes. Nous prenons ici l'exemple de cet organisme en détaillant la manière dont les plans

de feux peuvent être créés et la logique de fonctionnement standard des contrôleurs de feux, probablement l'une des plus répandues traditionnellement [Uni ; Gor+05 ; Nat98]. Notons que certains pays possèdent une logique similaire, comme le cas de la France avec la norme DIASER (*dialogue standard pour les équipements de régulation*).

Un *diagramme de phases* rassemble l'ensemble des phases d'un cycle, où chaque phase est représentée par un bloc. Afin de dérouler un cycle sans conflit entre les phases, il suffit de dérouler ce diagramme. La figure 2.6 décrit par exemple un diagramme de phases possédant trois phases que nous nommons  $\phi A$ ,  $\phi B$  et  $\phi C$ .

Un *diagramme en anneaux* permet de définir chacune des phases d'un diagramme de phases, en s'assurant de la bonne compatibilité entre les mouvements existant, comme représenté sur la figure 2.7. Les diagrammes en anneaux sont constitués de barrières qui isolent les mouvements appartenant aux rues en conflit latéral d'une intersection : les mouvements d'un côté de la barrière ne doivent pas se dérouler en même temps que les mouvements de l'autre côté. Ainsi, une phase représente un ensemble de mouvements sans barrières. La sélection des mouvements de chaque phase se fait à l'aide des anneaux présents de part et d'autre des blocs : chaque anneau sélectionne un mouvement et leur assemblage forme une phase. Sur une intersection à 4 directions, la barrière permet par exemple de séparer les mouvements de deux rues orthogonales. Selon le nombre de mouvements utilisés dans le diagramme en anneaux, plusieurs diagrammes de phases peuvent être créés. Notons qu'une matrice des conflits est un bon complément à ce type de diagramme (sec. 2. 2. 2. 1). Lorsque des phases sont appliquées, une matrice des conflits permet de vérifier, en toute circonstance, que leur composition respecte bien les règles de sécurité. En dehors du cadre de la NEMA, nous pouvons également imaginer composer des phases en se basant uniquement sur cette matrice.

Pour finir, soulignons que le nombre de phases dans un cycle est un élément important. Si il y a trop de phases, leur durée est plus courte ou le temps d'attente est plus long, ce qui peut être mal perçu par les usagers. Si le nombre de phases est moins important, chacune autorise plus de mouvements simultanés : l'intervalle entre deux sélections du même mouvement est donc réduit. Il y a un compromis entre la capacité, sécurité et attente. Selon [Gor+05], depuis plusieurs années déjà, le nombre de phases est limité à huit dans la plupart des contrôleurs de feux, afin de ne pas provoquer des arrêts inutiles ou un rallongement du temps de cycle. Il est toutefois courant pour des intersections d'avoir deux à quatre phases.

## 2. 2. 3 Gestion du temps de feux

### 2. 2. 3. 1 Temps inter-véhiculaire

Soit  $\tau^h$ , la moyenne du temps séparant le passage de deux véhicules successifs à un feu de circulation, comme représenté par la figure 2.8. Ce temps peut être utilisé, par exemple, pour estimer le temps que peut mettre une file d'attente à passer un feu vert. Dans des conditions ne prenant pas en compte les ralentissements liés au début ou à la fin d'une phase, ce temps est estimé à 2 secondes [Gor+05 ; US 08].

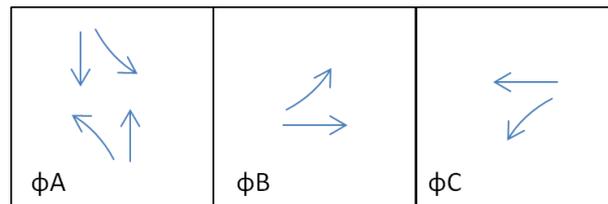


FIGURE 2.6 – NEMA - Diagramme de phases.

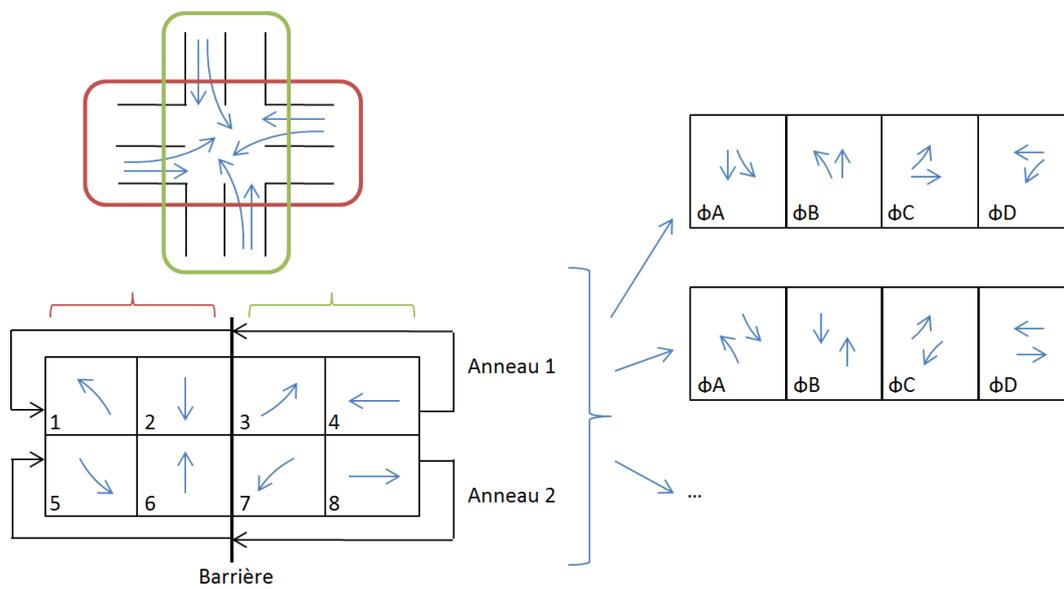


FIGURE 2.7 – NEMA - Diagramme en anneaux.

Notons que le temps inter-véhiculaire permet généralement de déterminer la capacité des routes.

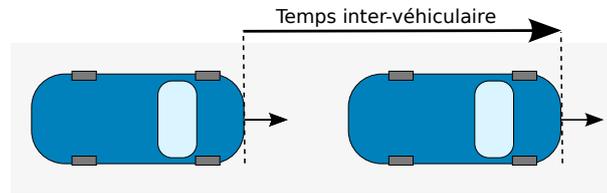


FIGURE 2.8 – Temps inter-véhiculaire, séparant deux véhicules successifs.

### 2. 2. 3. 2 Temps perdu

Le temps perdu  $\tau^{LT}$  est une mesure du temps non utilisé sur une phase, lorsqu'aucun feu n'est vert. Généralement, il est la somme de trois valeurs, estimées par [Gor+05 ; US 08 ; Min09]. 1) Le feu orange, marquant l'arrêt d'une phase, dure en moyenne 3 secondes en zone urbaine. 2) Le feu rouge de sécurité, qui correspond à un temps de dégagement séparant deux phases, varie selon la taille de l'intersection. 3) Le temps de démarrage au début d'une phase (c.-à-d., la somme du temps de réaction et du temps d'accélération). Ce dernier provoque en moyenne 4 secondes de délai, réparties généralement sur les quatre premiers véhicules de chaque file. Le graphique 2.9 représente le comportement du temps de démarrage, se stabilisant au fur et à mesure vers le temps inter-véhiculaire,  $\tau^h$ .

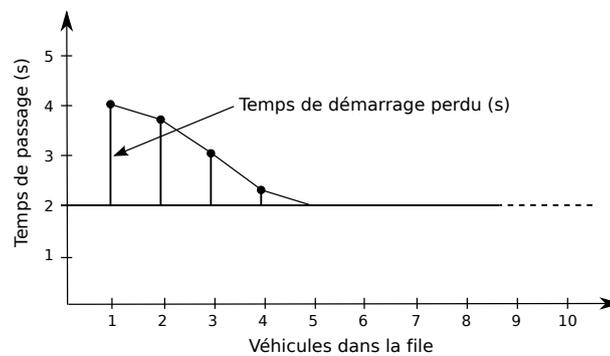


FIGURE 2.9 – Évolution du temps inter-véhiculaire à la sélection d'une file.

### 2. 2. 3. 3 Temps de cycle

La détermination d'un temps de cycle, noté par la suite  $\tau^c$ , a fait l'objet de nombreuses théories [Gor+05 ; US 08 ; CM00]. Il peut suivre divers objectifs, tels que la minimisation du temps d'attente ou la maximisation du débit. Les intersections possèdent généralement toutes un temps de cycle égal, qui sert de base à leur coordination car il représente une relation temporelle fixe. Un temps de cycle suffisamment large permet aux feux verts de chaque phase qu'il englobe d'être variables. La méthode classique de Webster [Web58] permet d'obtenir un temps de cycle optimal en

minimisant le retard subi par les véhicules, sur les  $p$  phases constituant un cycle :

$$\tau^c = \frac{(1,5 \cdot \tau^{LT} \cdot p + 5)}{1 - \sum_i y_i} \quad (2.1)$$

Notons  $V_i$ , le volume de la voie critique, comme étant le plus grand nombre de véhicules reçus par une voie lors de la phase  $i$ . Notons  $s = 3600/\tau^h$ , le débit de saturation, comme étant le nombre théorique de véhicules capables de traverser un feu qui reste au vert durant une heure. La charge de la phase  $i$ , noté  $y_i$  et utilisé dans la méthode de Webster, s'obtient en divisant  $V_i$  par  $s$ .

Le temps de cycle est typiquement fixé au minimum à 45 secondes et ne dure pas plus de 90 secondes pour éviter un temps d'attente trop long [Uni]. D'autres méthodes que celle de Webster existent et permettent d'obtenir des temps de feux minimisant, par exemple, le degré de saturation moyen [Yin08]. Certaines méthodes s'axent sur de lourds calculs prédéterminés afin d'obtenir un temps de cycle correspondant à un réseau d'intersections. D'autres fixent manuellement un nombre, comme par exemple à Los Angeles, où tous les feux de circulation sont à 60 secondes [US 08]. Enfin, de plus en plus de méthodes modernes partent du principe que la notion de cycle n'est pas nécessaire, et qu'un enchaînement dynamique des phases suffit à maintenir un système [US 08].

### 2. 2. 3. 4 Temps de feu vert

Un cycle se décompose en plusieurs phases, qui ont chacune une durée de feu vert qu'il est primordial de bien régler. En effet, une phase trop courte peut ne pas laisser suffisamment de temps à une file de se décharger. À l'inverse, une phase trop longue augmente le temps d'attente des automobilistes présents sur les autres phases, sans être utile.

Le temps de feu vert  $\tau_i^g$  pour une phase  $i$  est généralement calculé proportionnellement au temps de cycle, en fonction de différentes contraintes (p. ex., statistiques connues de débit ou d'attente).

Dans certains systèmes, ce temps est calculé dynamiquement et est borné entre un temps minimal  $\tau_i^{g^{min}}$  et un temps maximal  $\tau_i^{g^{max}}$  [Gor+05 ; US 08 ; AM97]. Une fois le temps de feu vert minimal écoulé, un temps additionnel  $\tau_i^{g^{add}}$  peut rallonger la phase, jusqu'à éventuellement atteindre  $\tau_i^{g^{max}}$ . À chaque nouveau véhicule qui arrive assez proche du précédent,  $\tau_i^g$  est incrémenté de quelques secondes (paramètre généralement proche de  $\tau^h$  secondes), laissant ainsi le temps au nouveau véhicule de passer. Ceci est illustré au travers de la figure 2.10.

La somme des durées de chaque phase, en tenant compte des temps intermédiaires, doit être égal au temps de cycle. Ceci est vérifié par la relation suivante :

$$\tau^c = \sum_i (\tau_i^{g^{min}} + \tau_i^{g^{add}} + \tau^{LT}) \quad (2.2)$$

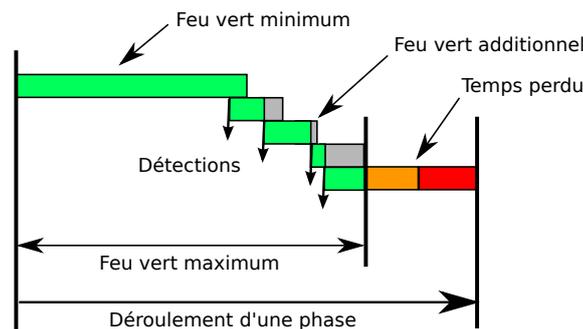


FIGURE 2.10 – Illustration des différents temps de feu vert pour une phase.

Notons que le temps de feu vert maximal a fait l'objet de nombreuses études. Kell et Fullerton [KF98] observent qu'il doit se situer entre 30 et 60 secondes. Orcutt [L.93] suggère que ce temps maximal doit être assez long pour laisser passer 1,3 fois la longueur moyenne de la file concernée. Courage [GZE89] indique qu'un temps de feu vert maximal élevé n'a que peu d'impact sur un système adaptatif (sec. 2. 3. 2) si le trafic est peu important.

### 2. 2. 3. 5 Coordination des feux entre intersections

*Coordonner* ou *synchroniser* les feux de plusieurs intersections consécutives revient à créer une *bande de progression*, *vague verte* ou *onde verte*, sur laquelle un flux de véhicule évolue sans être stoppé. Si le système ne possède pas de coordination, la progression n'est pas constante et les arrêts, les délais et la consommation d'essence ont tendance à augmenter [HHRC01 ; Nts]. De plus, à chaque fois que des voitures s'arrêtent, du temps de feu vert est perdu et le délai est augmenté.

Dans les systèmes traditionnels, la mise en place d'une coordination se fait dans la plupart des cas en fixant un temps de cycle identique pour chaque intersection d'une artère principale, voire en fixant des temps de phase identiques, mais décalés [US 08 ; AM97]. En clair, un système de signalisation est généralement synchronisé sur un seul axe. Pour chaque intersection, une coordination est appliquée à une seule phase par cycle, incluant les mouvements venant et menant à l'artère principale. Cette phase est généralement mise en dernière dans le cycle afin de pouvoir lui allouer éventuellement plus de temps que prévu, dans le cas où les phases non coordonnées viendraient à se terminer plus tôt (demande inférieure au temps prévu). Toutefois, des travaux récents, tels que ceux présentés dans cette thèse, considèrent que les intersections peuvent collaborer de proche en proche, et qu'une coordination de feux peut s'effectuer aussi bien sur les axes principaux que sur les autres routes (chapitre 4).

Les feux de circulation possèdent un *décalage* (*offset*) [US 08]. Le décalage est le temps – généralement fixe – séparant les phases coordonnées de deux intersections successives. Considérons deux intersections,  $I^1$  et  $I^2$ , liées par une route commune  $a$ , mesurant  $|a|$  mètres et dont les véhicules peuvent aller à une vitesse maximale de  $v$  km/h. Le décalage optimal est approximativement zéro lorsque  $|a|$  est trop petit [AM97] ou lorsque la file d'attente présente sur ce lien dépasse approximativement 22% de la capacité de stockage en longueur de ses voies (preuve ci-dessous). De plus,

dans un système congestionné, il est souvent considéré par la littérature que ce décalage peut être réglé à zéro [LRKS86 ; Rat88 ; AM97]. Sinon, il est égal au temps de traversée théorique entre les deux intersections :

$$\tau_a^{cross} = \frac{|a|}{v/3.6} \quad (2.3)$$

Si nous considérons le temps de démarrage de 4 secondes (sec. 2.2.3.2), un véhicule en tête de la file d'attente ayant le feu vert en  $I^1$  met au minimum  $\tau_a^{cross} + 4$  secondes pour aller rejoindre l'intersection voisine. A noter que  $\tau_a^{cross}$  peut être ajusté sur des bases réelles en installant des détecteurs au début et à la fin de la route.

**Preuve 1** Le temps théorique nécessaire à vider les  $n$  véhicules présents sur la route  $a$  est approximativement de  $n \cdot \tau^h$  secondes (en ne tenant pas compte du temps de démarrage). Le nombre de véhicules  $n$  peut être exprimé par rapport à la longueur de la route  $a$ , en posant  $n = |a|/(p \cdot L_{veh})$ .  $n$  représente alors le nombre de véhicules dont la longueur cumulée est  $p$  fois inférieure à la longueur de  $a$ . Nous cherchons la valeur de  $p$  pour laquelle le temps de traversée des  $n$  véhicules est égal au temps de traversée sans ralentissements sur la route  $a$  :

$$n \cdot \tau^h = \frac{|a|}{v} \Leftrightarrow \frac{|a|}{p \cdot L_{veh}} \cdot \tau^h = \frac{|a|}{v} \Leftrightarrow p = \frac{v \cdot \tau^h}{L_{veh}} \quad (2.4)$$

En prenant  $\tau^h = 2$  secondes,  $v = 13,9$  mètres/seconde et  $L_{veh} = 6$  mètres [US 08], nous obtenons  $p = 4,6$ . Cela signifie que si une file sur  $I^2$  fait plus de  $100/4,6 = 22\%$  de la taille de sa route, alors elle mettra davantage de temps à s'évacuer que les nouveaux véhicules de  $I^1$  mettront à arriver.

Au niveau d'une intersection, des mouvements combinés en phases forment des cycles qui se répètent en sélectionnant chaque mouvement au moins une fois. La composition des phases, leur ordonnancement et leur durée sont définis en fonction des objectifs d'écoulement du trafic et peuvent être dynamiques. Dans la section suivante, nous étudions les systèmes de transport intelligents actuellement mis en place en zone urbaine et qui permettent d'introduire ce caractère dynamique.

## 2.3 Contrôle du trafic routier urbain

Depuis les années 1960 et plus particulièrement au début des années 1970 [ACCJ06], les systèmes de régulation du trafic se sont rapidement développés afin d'améliorer les conditions de mobilité, en réduisant notamment les facteurs pouvant provoquer de l'attente et des embouteillages. L'apparition progressive de systèmes de gestion centralisés, en charge des carrefours d'une zone géographique donnée, s'est révélée déterminante. De plus, la recherche couverte par la presse montre un intérêt certain pour la gestion du trafic, ceci dans le but de supprimer l'instabilité dans les flux de trafic [Hor13b] et pour réduire le niveau d'embouteillage. Les systèmes de régulation

des accès (*ramp metering*), qui sont largement déployés, montrent qu’une gestion active des feux de circulation peut réduire drastiquement les embouteillages, même si des exemples en place, tels qu’à Minneapolis, sont contestés par les conducteurs qui ont le *sentiment* d’attendre plus longtemps.

### 2. 3. 1 Métriques et paramètres traditionnels

La mise en place d’un système de transport intelligent nécessite, *a priori*, de connaître à la fois les paramètres sur lesquels il peut jouer et les métriques à optimiser. D’une part, les paramètres sont des valeurs qui régissent le fonctionnement du système. Ils sont décrits en bleu sur la figure 2.11 et décrivent des valeurs ou comportements variables subis par le système, dans un cas général. Le style de conduite dépend par exemple en partie de l’utilisateur, mais a une influence majeure sur la manière dont peut réagir le système (p. ex., passer un feu rouge, provoquer un accident, accélération soudaine). D’autre part, les métriques sont des valeurs qu’il est possible de mesurer sur le terrain, découlant du comportement du réseau routier, de ses utilisateurs et de ses paramètres. Elles sont décrites en rouge sur la figure 2.11. Nous pouvons par exemple citer le temps moyen d’attente (*average waiting time – AWT*), qui est généralement représentatif des performances d’un système de gestion des feux de circulation.

Sur la figure 2.11, notons que les paramètres et métriques sont décomposés en deux échelles, l’une globale (ville, zone urbaine, système) et l’autre locale (voie, route, intersection). Cette distinction est importante dans la suite de cette thèse, les systèmes centralisés ayant un niveau de contrôle plutôt global, tandis que les systèmes distribués ont une vision locale. Nous remarquons qu’utiliser une vision locale plutôt que globale n’affecte que la manière dont un opérateur peut avoir accès aux informations. Il serait donc possible de s’y fier et d’imaginer des algorithmes utilisant ces paramètres et métriques. Chaque échelle peut également se décomposer en deux sous-ensembles : ce qui est en rapport avec l’utilisateur (p. ex., son comportement, le type de véhicule) et avec l’infrastructure (p. ex., feux de circulation). Cette distinction est également importante car dans le cas des paramètres, un STI subit généralement ceux en rapport avec l’utilisateur, tandis qu’il nous est possible de fixer ceux en rapport avec l’infrastructure.

### 2. 3. 2 Types de contrôles

Au fil des années, les systèmes de régulation se sont diversifiés, et ont connu globalement trois générations de contrôle. Aujourd’hui, ces générations peuvent être utilisées chacune en fonction des moyens mis en place sur l’infrastructure, et de la connaissance de cette dernière :

- *Première génération - contrôle à temps fixe* : en fonction de l’heure et parfois du jour, le système utilise un plan de feux prédéfini. Exemple : une configuration est appliquée le midi, tandis qu’une plus souple et équitable pour l’ensemble des voies d’un carrefour est appliquée la nuit. Classiquement, trois configurations

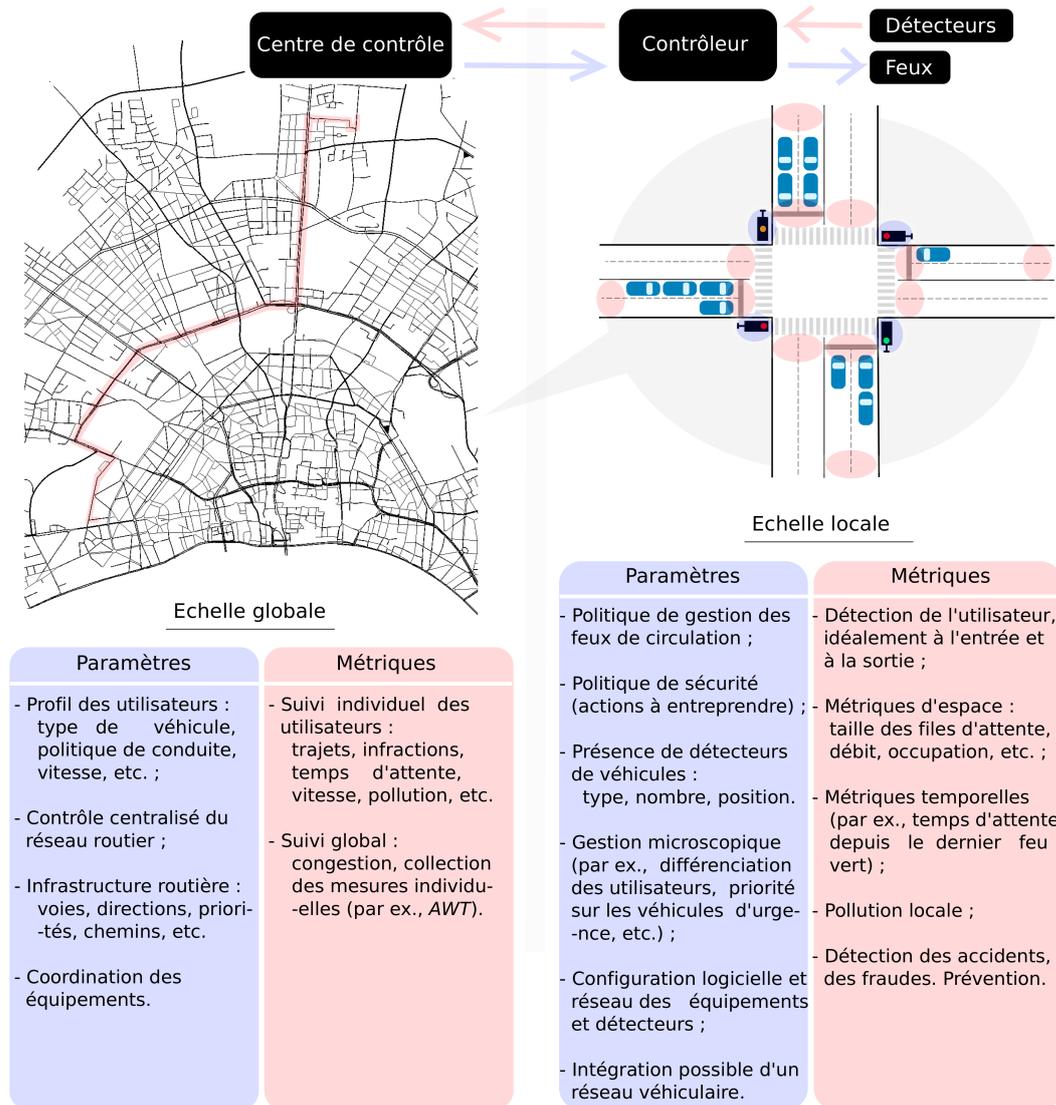


FIGURE 2.11 – Paramètres et métriques généraux des STI.

existent : pointes du matin, de l'après-midi, et le reste (hors pointes) [Webb]. Nous pouvons imaginer une formulation plus complète prenant en compte des plans spécifiques aux heures de pointe.

- *Deuxième génération - contrôle à temps dynamique - réactif* : des détecteurs sont utilisés afin de recueillir les données du trafic périodiquement (plusieurs minutes ou cycles). Ces données sont ensuite utilisées pour mettre en place un plan de feux en réponse aux informations reçues. Cette méthode est simple à mettre en place, mais nécessite toutefois une très bonne connaissance du système afin d'être efficace. Il s'agit de la première méthode à être apparue aux États-Unis à la fin des années 1980 avec l'apparition des UTCS (*Urban traffic control software*).
- *Troisième génération - contrôle à temps réel - adaptatif* : reprend le même principe que la deuxième génération mais cette fois-ci en temps réel. Ce type de contrôle programme dynamiquement les plans de feux en se servant des paramètres recueillis sur le terrain. Il est possible de calculer des valeurs telles que le temps de cycle, les phases ou encore leur ordonnancement. L'opération est effectuée de manière adaptative, c'est à dire en réaction directe au trafic. L'avantage de cette méthode est qu'elle peut s'adapter à de multiples situations, mais reste la plus compliquée à mettre en place (nécessité de cerner les informations à utiliser, comment les utiliser et se baser sur des théories parfois coûteuses en calculs ou mémoire).

### 2. 3. 3 Modes de fonctionnement d'un contrôleur de feux

Sur le terrain, les contrôleurs de feux peuvent être mis en place avec plusieurs modes de fonctionnement.

Tout d'abord, les *contrôles prédéterminés*, où l'enchaînement des phases s'effectue en marge du trafic routier, c'est à dire toujours dans le même ordre et avec un temps prédéfini en fonction de l'importance connue des voies. Les plans de feux mis en place peuvent être générés à l'avance : il est commun que des méthodes d'optimisation souvent longues soient employées afin d'obtenir le meilleur rendu possible. Il est en effet connu que trouver une séquence optimale pour un réseau de plusieurs intersections est un problème NP-difficile [HMB11].

Ensuite, les *contrôles semi-adaptatifs*, où des détecteurs sont mis sur certaines voies (exemple : les voies jugées peu importantes) afin d'ajuster des paramètres tels que les temps de feux ou encore l'ordonnancement des phases.

Enfin, les *contrôles adaptatifs*, qui découlent de l'émergence des nouvelles technologies et qui se calibrent en temps réel ou quasi temps réel sur le trafic, à l'aide de détecteurs au sol ou caméras, ainsi que de méthodes heuristiques.

Quelques auteurs ont essayé d'orienter les ingénieurs dans le choix d'un mode, par exemple [Cha96] ou encore [SBG98] décrivent leurs avantages et inconvénients, en fonction du matériel disponible et des données connues de l'intersection. Le tableau 2.1 donne l'exemple d'un choix de mode, se basant notamment sur l'état du

trafic, c'est à dire la demande en trafic par rapport à la capacité. Elle est notée par le rapport  $V/C$  (*espace occupé (volume) sur capacité*).

Configuration du réseau	Charge de l'intersection ( $V/C$ )	Phases		
		2	4	8
Croisement	0.80	Prédéterminé	Semi-adaptatif	Semi-adaptatif
	> 0.80	Prédéterminé	Prédéterminé	Prédéterminé
Réseau dense	0.80	Adaptatif	Semi-adaptatif	Adaptatif
	> 0.80	Prédéterminé	Semi-adaptatif	Adaptatif

TABLE 2.1 – Exemple d'orientation pour le choix d'un mode, en fonction de  $V/C$  (*espace occupé sur capacité*, la charge d'une intersection) [SBG98].

Notons au passage l'existence du *contrôle par ordinateur*, où les phases sont ajustées à distance depuis des CIGT ou directement sur le contrôleur de feux (p. ex., influence en cas d'imprévu, police, travaux).

## 2. 3. 4 Les systèmes de régulation du trafic

En Europe, trois grandes approches – complémentaires – de régulation du trafic routier se sont principalement développées et sont représentatives de ce qui se fait à travers le monde.

### 2. 3. 4. 1 L'approche Anglaise

La première approche, d'origine Anglaise, se base sur des principes mathématiques. Le modèle TRANSYT [CL87] est notamment né de cette démarche, puis a rapidement évolué vers TRANSYT 7 avant de devenir le système SCOOT [RB91]. Aujourd'hui, cette approche est l'une des plus populaires et compte de nombreux autres systèmes de régulation. SCOOT et SCATS, notamment, sont les deux principaux systèmes de gestion du trafic routier utilisés dans le monde [ZCZW].

SCOOT [RB91] (*Split Cycle Offset Optimization Technique*) est un système de contrôle développé par le TRL (*Traffic research laboratory*, Angleterre). À l'aide de détecteurs placés sur le terrain, SCOOT se base notamment sur un indice de performance afin de générer des plans de feux en fonction de la demande des utilisateurs. Cet indice est calculé par rapport au délai d'attente moyen, à la longueur des files d'attente et des arrêts sur le réseau. Cet aspect dynamique est réalisé à l'aide d'un aller-retour régulier de mesures et de décisions entre les équipements sur le terrain et un centre de contrôle. Cette centralisation et ce suivi régulier de la circulation impliquent un passage à l'échelle limité, car de gros besoins en calcul sont nécessaires et car tous les détecteurs doivent être interconnectés. Cela limite leur déploiement aux plus grands carrefours.

SCATS [SD80] (*Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*) a été à l'origine développé pour Sydney et d'autres villes Australiennes. Il utilise une notion de hiérarchie (ce qui forme une certaine distribution sur le réseau). En effet, entre le recueil des données sur le terrain et le centre de contrôle, des contrôleurs intermédiaires sont

insérés. Ceci permet d'alléger la charge globale du système et d'avoir un contrôle découpé en plusieurs zones, l'ensemble des acteurs utilisant des communications synchronisées. De manière similaire à SCOOT, ce système ajuste le temps des cycles et autres paramètres en fonction des données recueillies afin de diminuer le délai et les arrêts. Il n'utilise toutefois pas la même stratégie : les valeurs recueillies permettent la sélection de plans de feux parmi une large bibliothèque, sur lesquels le système se base pour proposer des plans ajustés. Notons que les conventions utilisées par SCATS sont éloignées des standards NEMA, ce qui ne facilite pas son intégration sur les réseaux urbains [ACCJ06].

Selon [SS09], l'installation de l'une de ces solutions prendrait en moyenne 365 heures (630h pour SCOOT), coûterait au total en moyenne 55 000 \$ par intersection, et nécessiterait un temps d'entraînement moyen de 41 heures (dont 60h pour SCATS). Des chiffres considérables expliqués en premier lieu par l'équipement utilisé [MK07]. Les auteurs de [DFMN02] estiment que par rapport à un système fixe, SCATS réduit globalement les temps de déplacement de 8%, les retards de 28% et les arrêts de 42%. SCOOT pour sa part réduit globalement les temps de déplacement de 8%, les retards de 22% et les arrêts de 17%.

Tandis que SCATS et SCOOT sont conçus afin de ne prendre qu'une décision par cycle, d'autres systèmes plus modernes tels que OPAC [GPA01], RHODES [HMS92] ou encore InSync [Cha10] – pour ne citer que eux – analysent le trafic en temps réel et prennent des décisions seconde après seconde afin d'adapter dynamiquement un cycle. Nous pouvons également citer CRONOS [Boi+92 ; BMP06] et Prodyn [HFT83], les deux principaux systèmes agissant sur les carrefours Français [DP07]. Le premier a été mis au point au début des années 1990 par l'INRETS et permet de gérer un carrefour en se basant notamment sur des images en temps réel en provenance de caméras, qui fournissent des informations telles que l'occupation de la chaussée. Le deuxième a été développé par le CERT et a la particularité de se baser sur des mécanismes classiques de cycles et phases. Hélas, le coût et la durée d'installation de ces systèmes constituent un frein à leur développement.

#### 2. 3. 4. 2 L'approche Allemande

La deuxième approche, d'origine Allemande, se base sur des coordinations horaires pointues. Cette approche a su faire ses preuves et a essentiellement été mis en œuvre par Siemens jusqu'aux années 1990, notamment dans certains pays du nord de l'Europe où le style de conduite appelait à un trafic plus régulier. Cette solution a été par la suite abandonnée au profit de systèmes tels que SCOOT, ou de modèles temps réels comme MOTION, installé à Cologne.

#### 2. 3. 4. 3 L'approche Française

La troisième approche, d'origine Française, part d'un principe plus simple : *"aucune machine ne remplacera jamais ce qui est l'essence même de l'homme : l'esprit (...) et la compréhension"* (Louis V. Gerstner). Les modèles mathématiques sont ici mis de côté au profit de l'expérience humaine.

Les ingénieurs des ponts et chaussées mettent ainsi en place des stratégies au cas par cas. Sur Amiens par exemple, ceci se fait par le biais de systèmes centraux développés par THALES.

D'une manière plus générale, ils mettent également en avant des systèmes de supervision des réseaux de transports. Citons par exemple CLAIRE-SITI [SL13]. Ce système, d'initiative Française, est destiné à intégrer et à traiter des données issues de part et d'autres du réseau routier (trafic routier, stationnement, transport en commun, etc.), afin de fournir des indicateurs ayant trait à *la ponctualité (le retard)*, à *la régularité (l'attente)*, à *la fiabilité (la vitesse)*, à *au trafic (la demande, le débit, la concentration)*, à *la correspondance (les temps de transfert)*, à *l'environnement (l'émission de polluants)*<sup>1</sup>.

### 2. 3. 4. 4 Recherche Européenne

Notons également que la recherche Européenne pousse à ce genre d'initiative, allant vers l'analyse du trafic routier. Instant Mobility est, par exemple, un projet de recherche Européen étudiant la manière dont peut être améliorée la mobilité urbaine et la gestion du trafic routier<sup>2</sup>. Ce projet souhaite notamment créer un écosystème entièrement connecté agrégeant les données de trafic en provenance de diverses sources (transports publics, réseaux sociaux, flottes et camions commerciaux, etc.), afin de proposer des informations et services aux automobilistes.

### 2. 3. 5 Les équipements de détection

Les détecteurs de véhicules, répartis généralement autour des intersections en zone urbaine, jouent un rôle évident et fondamental dans le développement des transports intelligents. Ces équipements peuvent être décomposés en deux familles présentées ci-après [MK07].

#### 2. 3. 5. 1 Les systèmes non-intrusifs

Les systèmes non-intrusifs sont souvent volumineux et leur efficacité dépend des conditions environnementales. Ils sont généralement installés sur le côté de la chaussée. Les équipements les plus fréquents entrant dans cette catégorie sont les radars Doppler, lasers, à ondes ultrasoniques, micro-ondes ou encore acoustiques [MK07]. Des solutions tout aussi courantes sont les dispositifs de traitement d'images, filant directement la circulation. De nos jours, ce traitement peut être réalisé très facilement [JMMSAS13]. Sur la figure 2.12, nous utilisons par exemple le logiciel open-source CAUTOVE<sup>3</sup>. Selon [MK07], le prix de départ d'équipements fonctionnant par traitement d'images serait fixé à 5 000 \$, et pourrait s'envoler jusqu'à 26 000 \$ l'unité.

---

1. <http://claire-siti.inrets.fr/>

2. <http://instant-mobility.com>

3. <http://sourceforge.net/projects/cautove/>

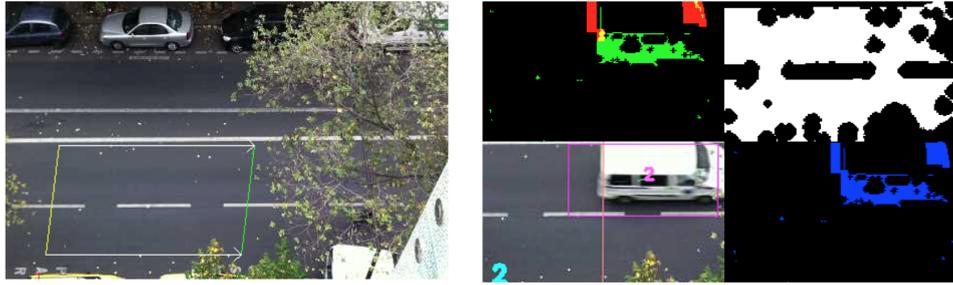


FIGURE 2.12 – Exemple d’utilisation de CAUTOVE. À gauche, nous définissons les voies à prendre en compte. À droite, une détection de véhicule, avec ce que perçoit le logiciel.

### 2. 3. 5. 2 Les systèmes intrusifs

Les systèmes intrusifs offrent généralement une détection ponctuelle, les systèmes précédents en offrant une généralement spatiale. Ils nécessitent une installation plus longue, car ils sont situés directement sur (ou sous) la chaussée. De plus, certains de ces systèmes nécessitent une alimentation indépendante, ce qui complique leur mise en place. En pratique, l'exemple le plus utilisé est la boucle électromagnétique, constituée de plusieurs spires de cuivre enfouies dans la chaussée : elles permettent de mesurer les variations d'inductance lorsqu'un véhicule passe à proximité. La détection de véhicule devient possible, mais également leur classification en fonction de l'importance des variations, ou la mesure de leur vitesse (sous réserve d'avoir deux boucles séparées d'une distance connue). Selon [MK07], l'installation de ces boucles coûterait en moyenne de 500 à 800 \$ l'unité.

Les capteurs magnétiques se comportent de manière similaire aux boucles électromagnétiques [CCV04 ; Che+05 ; MK07]. Les variations produites sur le champ magnétique terrestre lors du passage d'un véhicule sur un capteur sont mesurées et enregistrées par un magnétomètre. De la même manière, ces variations permettent de détecter un véhicule, de connaître son type, de mesurer sa vitesse ou encore sa longueur. [Che+05] montre que les magnétomètres peuvent enregistrer une signature d'une véhicule passant par dessus eux pour 99% des cas, et mesurer leur vitesse moyenne dans 90% des cas. Les matériaux ferreux des véhicules produisent en effet un dipôle magnétique particulier, qui vient perturber un champ magnétique terrestre *a priori* stable. Ces perturbations sont mesurées sur trois axes mais seul l'axe de la hauteur est pris en compte, l'axe des abscisses et des ordonnées pouvant être troublés par la présence d'un second véhicule situé sur une autre voie ou dans la même file. Ces principes sont illustrés sur la figure 2.13.

Ces équipements, qu'ils soient intrusifs ou non, sont généralement connectés à une unité de contrôle permettant leur considération par un système de transport intelligent. Il y a une nécessité de communication évidente, souvent mis de côté par la littérature, qu'il nous faut étudier. Dans la partie suivante, nous décrivons les différents réseaux de communication existant ainsi que leurs limites.

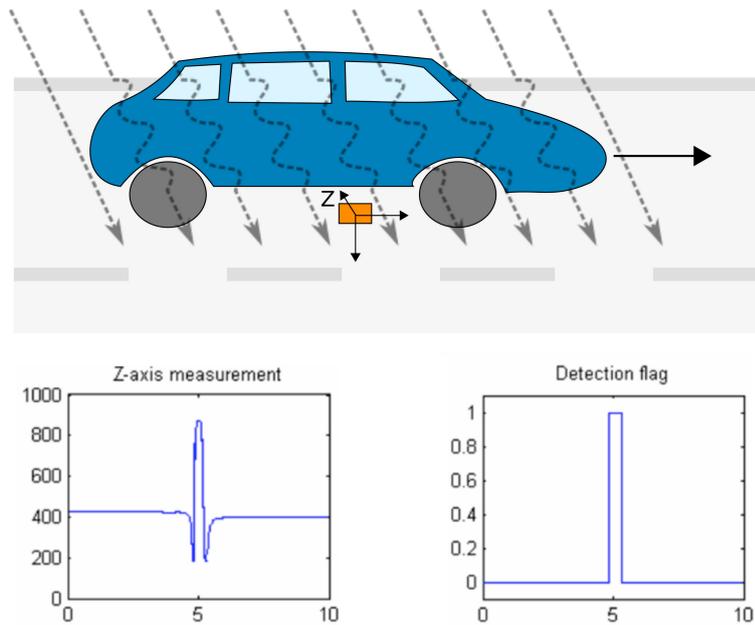


FIGURE 2.13 – Détection d’un véhicule par un capteur. Les mesures sont des exemples issus de [Che+05]. Le premier graphique affiche, en fonction du temps, les variations brutes recueillies par un magnétomètre échantillonné à 128 Hz au passage d’un véhicule. Le deuxième graphique retranscrit, en fonction du temps, l’enregistrement d’un signal de détection : ce dernier apparaît lorsque 10 échantillons successifs sont enregistrés et dépassent un certain seuil.

## 2. 4 Réseaux de communication

### 2. 4. 1 Les réseaux statiques

Les équipements de l’infrastructure routière, tels que les contrôleurs ou les détecteurs de véhicules, doivent échanger de l’information afin de communiquer des mesures ou des directives. Le plus souvent, ils le font par l’intermédiaire d’un réseau filaire (p. ex., fibre optique), généralement relié à un centre de contrôle. Toutefois, l’utilisation de réseaux sans fil est aujourd’hui facilement accessible, que ce soit sur une intersection entre équipements proches (p. ex., réseaux radios) ou entre contrôleurs, en utilisant des réseaux plus longue distance (*WAN*, *réseaux cellulaires*). Nous qualifions ce type de réseau de statiques, car la position de ses éléments n’est pas amenée à évoluer.

Si ces déploiements semblent faciles d’accès de par leur caractère statique, il y a toutefois un nombre important de questions à évaluer. Les réseaux sans fil possèdent des problématiques de couverture, tandis que les réseaux filaires possèdent des problématiques de déploiement (coût, travaux, etc.). Il nous faut également étudier les problématiques de fiabilité ou de performance (latence) : à quel débit le réseau en place est-il capable de délivrer ou de remonter des informations ? Est-ce suffisant ? Que se passe-t-il en cas de faute sur un équipement central ?

## 2. 4. 2 Les réseaux véhiculaires

Un réseau véhiculaire est un réseau où les véhicules sont dotés d'une unité de communication leur permettant de coopérer avec d'autres véhicules dans leur voisinage, de proche en proche (*V2V – vehicle-to-vehicle*).

Ce type de réseau communique généralement sous couvert du standard IEEE 802.11p [802] (WAVE – Wireless Access in Vehicular Environments), exploitant la bande DSRC 5.9 GHz et prévu pour être déployé dans de nombreux véhicules et équipements d'infrastructures. Ce standard, ainsi que d'autres (p. ex., ceux suggérés par l'ETSI – *European Telecommunications Standards Institute*), autorisent notamment les communications de véhicule à véhicule. Les applications utilisant ces communications sont typiquement classées en trois catégories : les applications de sécurité, les applications d'efficacité et de gestion du trafic et les applications de confort et d'infodivertissement [MZ09].

Les réseaux véhiculaires sont plutôt récents, et sont pour le moment essentiellement théoriques, à mesure qu'ils sont limités par leur déploiement. Sur la population de véhicules actuelle, peu de cas possèdent la technologie nécessaire à l'établissement d'un tel réseau. De plus, à supposer que l'ensemble des véhicules possèdent un capteur embarqué, la mobilité aurait pour effet de créer un réseau très volatile et fragmenté, difficilement utilisable en l'état. En effet, [NF13] étudient la topologie d'un réseau véhiculaire sur la ville de Cologne (Allemagne) et montrent que ce type de contrainte est courant et restreint l'utilisation de protocoles véhiculaires. Une solution possible, largement utilisée, considère le réseau de véhicules comme étant un réseau de smartphones, reliés à un oracle commun et échangeant des données sur un service.

Ce type de réseau est en plein développement, mais souffre toutefois d'importants problèmes de déploiement. De plus, même si les constructeurs automobiles commencent aujourd'hui à intégrer des interfaces radio aux véhicules, il est difficile d'imaginer équiper toute une flotte de véhicules, tout du moins pas avant plusieurs années ou de manière sélective (p. ex., taxis, transports en commun). Une solution à ce problème de déploiement serait de faire coopérer un tel réseau avec d'autres réseaux. Nous étudions cette possibilité dans les paragraphes qui suivent.

## 2. 4. 3 Les systèmes coopératifs

Un système coopératif est un réseau hybride où des acteurs mobiles coopèrent avec des acteurs fixes. Ce type de réseau est prometteur, en premier lieu car les équipements de l'infrastructure peuvent profiter des données d'un réseau véhiculaire (*V2I – vehicle-to-infrastructure*), et inversement (*I2V – infrastructure-to-vehicle*). Ainsi, l'intelligence est répartie entre différents éléments du réseau, fixes ou mobiles, ce qui permet de développer des applications qu'il aurait été impossible de mettre en place autrement. Dans certains cas, nous parlons de *systèmes interactifs* lorsque les véhicules peuvent échanger à la fois des données avec l'infrastructure, mais également avec les autres véhicules. L'avantage est considérable, le traitement et la diffusion

des informations pouvant bénéficier de la mobilité des véhicules, ainsi qu'un appui de données. Ceci est représenté par la figure 2.14.

Certaines initiatives, telles que CALM<sup>4</sup> (*Communications Access for Land Mobiles*), ont pour but de standardiser les communications dans ce type de réseaux. Le but de CALM est, notamment, de rendre transparente et continue l'utilisation des protocoles de communication sans fil et des interfaces de communications destinées à une large variété de scénario. Par exemple, utiliser conjointement des réseaux cellulaires et des interfaces 802.11p ou 802.15.4 afin d'obtenir un réseau étendu, réactif et favorisant la coopération entre les acteurs. CALM propose également des orientations technologiques en termes d'architectures (V2V, V2I, etc.) et de protocoles (p. ex., IPv6).

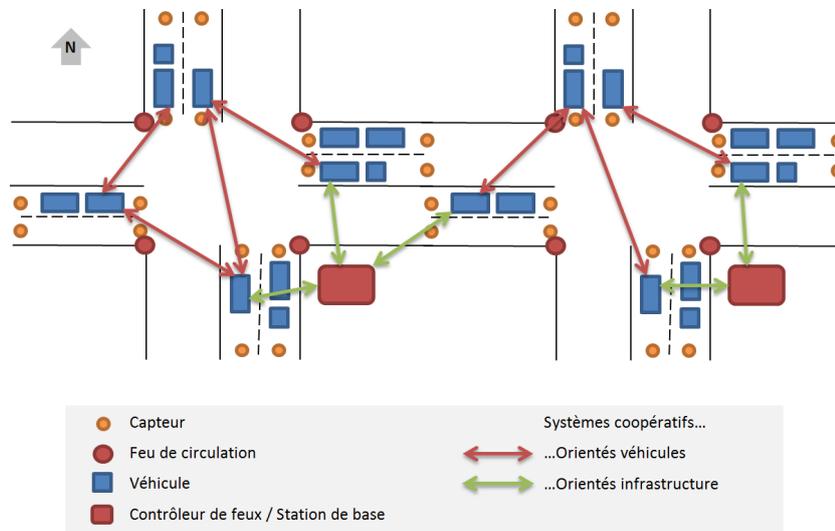


FIGURE 2.14 – Les systèmes interactifs.

Les auteurs de [WLZS05] proposent par exemple un réseau formé de trois types de nœuds : véhicules, magnétomètres, et contrôleurs à une intersection. Les magnétomètres diffusent en permanence des informations contenant notamment leur position. Les véhicules recevant des données de plus de trois capteurs peuvent ainsi calculer leur position par triangulation et envoyer le résultat ainsi que leur vitesse au contrôleur, qui est apte à prendre des décisions quant au changement des feux de circulation sur l'intersection. Dans [Wen+05], les auteurs reprennent un modèle similaire mais le développent sur plusieurs intersections. À partir de ces deux travaux, les auteurs vont même jusqu'à proposer un prototype [CCCT06].

Certains auteurs étudient la possibilité d'un système multi-agents. Wiering [Wie00] propose des méthodes d'apprentissage permettant aux véhicules (agents) de se déplacer en minimisant le temps d'attente aux intersections, et en échangeant des informations avec les feux de circulation. L'auteur introduit également la notion de vote [WVJK04] : chaque véhicule estime ce qu'il a à gagner si le feu auquel il se trouve passe au vert ; un vote est ensuite effectué parmi l'ensemble des agents présents à l'intersection. Houli *et al.* [HZY10] reprennent un modèle similaire à celui de

4. <http://calm.its-standards.info/Public/CALMintroduction.html>

Wiering qu'ils trouvent trop restrictif, et l'étendent à un modèle multi-objectif, afin de mieux gérer l'incertitude temps-réel du trafic : gestion des véhicules prioritaires, longueur des files d'attente, etc.

Un réseau véhiculaire étant nécessaire à l'obtention de ce type de réseau, les conclusions sont les mêmes : nous ne pouvons pas forcer l'ensemble des usagers à utiliser une technologie. Ceci nous impose donc soit de nous baser sur un modèle utopique, soit sur un modèle sélectif, où seuls les usagers bénéficiant de ladite technologie peuvent intégrer le système.

## 2. 5 Distribution du réseau de communication

### 2. 5. 1 Les systèmes distribués

Lorsque la charge de véhicules est élevée, un petit événement peut rapidement engendrer un embouteillage important [Hor13a]. Dans ce cas, communiquer avec un point de décision central peut ne pas être la solution la plus efficace [LH08]. Le temps nécessaire à communiquer avec une entité centrale peut empêcher le développement d'applications sur événements telles que les applications de détection d'incident ou d'embouteillage. Face à de tels systèmes centralisés, l'adoption progressive de systèmes distribués peut être un atout. Profitant des résultats de la branche des systèmes distribués, les dispositifs utilisant cette distribution peuvent facilement communiquer entre eux et rapidement adapter les plans de feux de circulation pour résoudre une situation. De plus, une telle architecture permet de rendre certaines intersections ou zones urbaines totalement autonomes et indépendante d'une quelconque entité centrale. D'une manière générale, nous pouvons dire que les systèmes distribués représentent les avantages suivants :

- **Coût** : plusieurs unités à petits prix au lieu d'une unique unité de calcul, si ce n'est davantage.
- **Performances de calcul** : les moyens centralisés sont généralement moins efficaces qu'une approche décentralisée, ou alors à très fort coût. De plus, le calcul parallèle devient naturel.
- **Sûreté de fonctionnement** : une panne ou faute matérielle ou logicielle sur un système centralisé peut être fatale à ce système. Sur un système distribué, les données manquantes peuvent être interpolées et les équipements peuvent se surveiller les uns les autres [FM11a], selon un principe bien connu : *"tout refus de communiquer est une tentative de communication ; tout geste d'indifférence ou d'hostilité est appel déguisé"* (Albert Camus).
- **Autonomie** : les éléments opérant sur un réseau centralisé sont interconnectés à ce réseau, alors qu'un système distribué peut agir de façon autonome.
- **Réactivité** : communiquer avec un point de décision central peut entraîner un certain temps de latence [LH08].

De nombreux projets et initiatives ont atteint une phase expérimentale en commençant des déploiements à moyenne échelle. CitySense [Mur+08] est un réseau sans fil urbain à l'essai déployé sur la ville de Cambridge (MA, USA), formant un réseau maillé. Il est composé de 100 ordinateurs embarquant un système sous Linux qui peuvent être programmés directement par les utilisateurs finaux. Même si l'objectif principal était de favoriser le développement d'applications pour des réseaux maillés, les nœuds ont été dotés de capteurs environnementaux et de pollution.

## 2. 5. 2 Les réseaux de capteurs sans fil

L'ajout d'un émetteur-récepteur sans fil à des capteurs magnétiques (sec. 2. 3. 5) permet de construire un réseau de capteurs sans fil classique. Les réseaux de capteurs sans fil s'appuient généralement sur des communications de courte portée et de faible coût, vitesse et puissance. Parmi les multiples normes de communication appropriées, IEEE 802.15.4 [IEE11], la technologie Zigbee, offre une couverture d'environ 50-100 mètres à 2,4 GHz pour un débit de données maximal de 250 Kbps et une faible consommation d'énergie [CPSS12]. IEEE 802.11p [802] est également un candidat tout à fait viable, comme il est prévu pour être déployé dans des véhicules et équipements d'infrastructures, il permettrait de la création d'un système coopératif. Les technologies 433 MHz sont également intéressantes, car elles fournissent des interfaces de communication à faible débit et à fort rayon. Toutes ces technologies partagent certaines caractéristiques communes en termes de performance et donnent des modélisations de réseaux similaires : le réseau de communication formé a toutes les caractéristiques d'un réseau local sans fil et peut être utilisé comme un réseau multi-sauts, ou interconnecté par des interfaces WAN. La technologie est donc prête à soutenir une application distribuée.

Les *réseaux de capteurs sans fil* sont un cas particulier des réseaux ad-hoc et se composent d'un large ensemble de capteurs à capacité et énergie généralement limitées, les rendant massivement accessibles et à faible coût. Dans de nombreux cas, les capteurs sont constitués des unités suivantes [Kna00] :

- Une *unité d'acquisition*, qui collecte des données environnementales et est en charge de la conversion analogique vers numérique. Dans notre cas, cette unité est un magnétomètre.
- Une *unité de calcul*, permettant notamment le lancement de procédures et de protocoles.
- Une *unité de communication*, rendant possible la connexion à un réseau sans fil (liens radio, émission et réception). Ce type de communication se fait de proche en proche et permet de s'affranchir des contraintes filaires (temps d'installation et facilité d'accès).
- Une *unité d'énergie*, qui permet la répartition de l'alimentation entre les différents composants. Dans de nombreux cas, les capteurs sont dispersés dans des zones pauvres en énergie, et sont dotés d'une batterie non-rechargeable et non-renouvelable [ASSC02]. Dans le cas du trafic routier, les batteries peuvent

tenir plusieurs années et il est possible de s'abstenir de contraintes énergétiques (p. ex., en raccordant les capteurs au réseau électrique urbain).

Le faible coût, la taille et la facilité d'installation de ces appareils, par rapport à des boucles électromagnétiques, permettent la création d'un réseau dense et plus réactif [CGML08]. Knaian [Kna00] évoque un coût de fabrication inférieur à 30 \$ par unité avec un microcontrôleur de 16 bits et une taille comparable à une pièce. Une fois déployé, ces dispositifs peuvent échanger des informations avec toutes les intersections pertinentes et résoudre rapidement une situation donnée sans intervention d'un serveur central. L'ensemble des intersections pertinentes peut être adapté dynamiquement à la situation et la communication multi-sauts peut soutenir la diffusion des données, même si aucune WAN n'est disponible, ou lorsque l'opérateur ne peut pas se permettre de gérer les données sans fil de tous ses appareils.

Les caméras représentent aussi une solution à faible coût, car leur installation nécessite peu de travaux et car elles peuvent accomplir de bonnes détections avec des techniques de traitement d'images, à moins que leur angle ou vision soient limités. [CPSS12] propose de combiner des capteurs magnétiques à des caméras.

La mise en place d'un système de transport passe par des technologies de communication qui existent déjà, ou qui se développeront dans un futur proche (p. ex., les réseaux coopératifs). De plus, les modèles d'intersections étudiés nous permettent de comprendre le comportement d'un système de régulation de trafic. Il est ainsi possible de contrôler les feux un à un, et d'appliquer un algorithme distribué qui s'adapte, pour chaque cas, aux files d'attente. Toutefois, cette politique de gestion distribuée reste à étudier en détail, car elle dépend *a priori* du réseau sous-jacent. Dans le chapitre suivant, nous caractérisons les graphes issus de tels réseaux, par l'intermédiaire de capteurs sans fil, qui peuvent être déployés de manière dense afin de rendre indépendant tout élément de l'infrastructure routière.

