

Feux tricolores autonomes délibératifs

Dans la pratique, la régulation de la circulation routière par l'intermédiaire d'un feu tricolore consiste à faire appel à un dispositif central dit contrôleur de carrefour. Ce dernier agit sur les états du vert ainsi que les durées d'activation de chaque état. La plupart des contrôleurs répartissent les temps d'activation de chaque état soit d'une manière statique : cyclique et définitive, soit d'une manière dynamique : en adoptant un plan de feux préconfiguré en fonction du jour et de l'heure. Ces méthodes ne sont pas adaptatives et ne tiennent pas compte de l'état réel de la circulation. Par conséquent, la régulation de la circulation n'est pas au point et nécessite souvent l'intervention d'agents policiers dans les situations d'embouteillage.

Afin de rendre l'asservissement des feux tricolores adaptatif en fonction de l'état réel de la circulation, nous devons faire appel à un dispositif de mesure qui permet d'évaluer la présence de véhicules sur chaque direction. Le contrôleur de carrefour implémentera alors un algorithme ayant comme entrée lesdites mesures et agira en conséquence sur la répartition des temps d'activation de chaque état. Dans ce cas la gestion est dite adaptative.

On connaît plusieurs dispositifs de mesure permettant d'évaluer la présence de véhicules sur chaque direction d'un carrefour. Parmi ces dispositifs de mesure nous citons :

- les boucles inductives noyées dans la chaussée sensibles à la présence de la masse métallique d'un véhicule au-dessus,
- les tuyaux pneumatiques se fixant sur la chaussée perpendiculairement à l'axe de la circulation et permettant de détecter le passage d'un véhicule par la détection de la pression créée au moment de l'écrasement dudit tuyau,
- les capteurs piézo-électrique permettant de détecter la présence d'un véhicule grâce au signal électrique généré par le matériau piézo-électrique au moment de passage du véhicule,
- les radars et capteurs ultrasoniques permettant de détecter le passage d'un véhicule grâce à la réflexion du signal émis par ces capteurs sur la surface du véhicule,
- les capteurs magnétiques permettant de détecter la présence d'un véhicule grâce à la variation du champ magnétique de la terre induite par le passage du véhicule,
- des capteurs vidéos qui analysent la variation de l'éclairage causé par le passage d'un véhicule (US 5444442),
- etc.

Ces dispositifs de mesure souffrent d'un certain nombre d'inconvénients à savoir :

- le coût de mise en œuvre
- le coût des travaux de voirie et de génie civil,
- la probabilité élevée de recours à la coupure du trafic de plusieurs heures,
- l'intervention d'entreprises spécialisées,
- les contraintes très strictes sur l'emplacement de l'installation,
- la complexité d'un déploiement à grande échelle,
- la mesure étant aveugle,
- la non possibilité d'évaluer l'occupation au sol des véhicules,
- et la non possibilité d'évaluer la longueur de la file d'attente.

On connaît des dispositifs de mesures permettant de détecter les signaux Bluetooth et/ou wifi émanant des véhicules, ce qui permet de compter le nombre de véhicules traversant une borne et ainsi évaluer l'occupation au sol des véhicules. Cette technique n'est pas très fiable car elle présuppose que tous les véhicules sont équipés d'un système Bluetooth et/ou wifi et que ce dernier est activé en mode visible.

On connaît des dispositifs de mesures se basant sur des caméras comme source d'information combinée à une unité de traitement centralisée (EP 0454166, EP 0479698). Cette dernière permet d'analyser et d'extraire l'information utile contenue dans le flux vidéo, et l'utiliser ainsi afin d'asservir efficacement le feu tricolore. Lors de ce procédé, les techniques utilisées pour le traitement d'image relèvent soit des techniques de l'apprentissage automatique (Machine Learning) (WO 8806326, DE 4105809), soit des techniques de l'apprentissage en profondeur (Deep Learning) (CN 110556000A).

Toutefois, nous constatons les inconvénients suivants :

Le système repose sur une architecture centralisée où tous les flux sont acheminés vers une unité de traitement. Prévoir des interfaces permettant d'assurer le débit nécessaire au transfert des flux au format brut (cas des caméras industrielles) risque de rendre le système très coûteux. Par ailleurs, l'utilisation de caméras standards intégrant un mécanisme de compression d'images décroît la qualité des images et y intègre des informations de compression qui altèrent la qualité des prédictions. En conséquence, plusieurs applications ne sont plus possibles, à savoir l'identification des numéros d'immatriculation des véhicules ainsi que la reconnaissance de certaines classes de véhicules.

En plus, l'installation des caméras et le passage des câbles d'alimentation et de transmission des données nécessitent l'intervention d'entreprises spécialisées, ce qui risque de perturber le trafic de plusieurs heures, voire de plusieurs jours.

Ces solutions nécessitent l'installation d'une armoire centralisée qui hébergera l'unité de calcul destinée à analyser les flux vidéos, dans le cas d'une architecture localisée, et ensuite asservir les feux tricolores par l'intermédiaire d'un automate. Dans le cas d'une architecture délocalisée (cloud), les flux vidéos sont acheminés vers des serveurs distants pour être analysés, les résultats sont exploités pour asservir les feux tricolores de la même manière. Que ce soit localisées ou délocalisées, ces solutions nécessitent l'installation d'une armoire au niveau de chaque carrefour, ce qui engendrera des coûts et travaux supplémentaires. De plus, dans le cas de l'architecture délocalisée, un support de communication haut débit reliant le carrefour et les serveurs de traitement s'avère inévitable afin de tenir compte des contraintes temps réel, ce qui risque d'augmenter considérablement le coût de la solution.

En référence à la Figure 1, le but du dispositif et procédé de l'invention est l'automatisation de la gestion des feux tricolores d'une manière complètement autonome et intelligente à travers un système de régulation de trafic routier caractérisé principalement en ce qu'il est complètement distribué et autonome n'ayant besoin d'aucune gestion ni installation centralisée, notamment un contrôleur de carrefour, et en ce qu'il est opère en mode sans fil.

Le dispositif et procédé de l'invention peut être implémenté dans un dispositif intelligent de régulation de trafic routier installable sur les potences des feux tricolores.

Il peut être implémenté dans une tête de feu intelligente pour la régulation de trafic routier.

Il peut être implémenté également dans un module de feu (optique) intelligent (3), pour la régulation de trafic routier, enfichable dans les têtes de feux existantes (1) en remplacement des modules de feu conventionnels.

Dans la suite de la description, le dispositif et procédé de l'invention sera implémenté dans un module de feu désigné par *module de feu intelligent*.

N'ayant besoin que d'une source d'alimentation, ces modules de feu intelligents permettent de prendre le contrôle du carrefour en adoptant des plans de régulation dynamiques et adaptatifs en fonction de la réalité de la circulation.

Un module de feu intelligent installé dans une tête de feu permet d'analyser le trafic routier qui entre au carrefour par son biais. Il permet également de prendre le contrôle de l'ensemble des modules de feu (tricolores, spéciaux ou piétons) installés dans la même voie, et éventuellement ceux installés dans les voies adjacentes suivant la même direction de circulation. Donc, un carrefour à quatre branches, par exemple, nécessitera, au moins, quatre modules de feu intelligents, à installer en préférence dans le feu principal de chaque branche.

Le calcul des plans de régulation se base principalement sur l'analyse des informations spatio-temporelles (occupation au sol des véhicules dans le temps) récoltées en temps réel par les modules de feu intelligents.

Les différents modules de feu intelligents communiquent et échangent les rapports de circulation en sans-fil, ce qui rend l'installation de ces modules moins contraignante en éliminant les travaux de génie civil liés au passage des câbles de communication dans le cas d'une solution filaire.

Grâce au programme distribué partagé par l'ensemble des modules de feu intelligents, ces derniers collaborent et se synchronisent d'une manière complètement autonome en adoptant le plan relatif à la meilleure stratégie de régulation par rapport à la réalité de la circulation.

Ce dispositif et procédé de l'invention servira également d'outil de contrôle et de surveillance. En effet, les modules de feu intelligents (2) peuvent détecter automatiquement le franchissement de feu rouge en lisant les plaques d'immatriculation des véhicules concernés. Ils peuvent à ce titre disposer des informations nécessaires pour la verbalisation du contrevenant. Cette capacité de lire les plaques d'immatriculation pourra servir également à des fins de surveillance.

Les modules de feu intelligents peuvent être dotés d'autres supports de communication afin de permettre le suivi et contrôle à distance si besoin est.

Les modules de feu intelligents peuvent être installés sur la base d'une installation existante (1, 2) sans que l'on soit contraint de remplacer les feux tricolores et le contrôleur de carrefour existants. Les modules de feu intelligents sont compatibles avec la majorité des têtes de feu tricolores existantes. Le contrôleur de carrefour peut être désactivé et servir de solution de redondance le cas échéant. Ce comportement peut être automatisé par l'intermédiaire du watchdog matériel (13) du module de feu intelligent en l'interfaçant avec le contrôleur de carrefour.

En effet, les modules de feu intelligents sont capables de s'interfacer avec d'autres systèmes externes ou des capteurs de mesure en fonction du besoin à l'aide d'interfaces de communication

filaires ou non filaires. Le système pourra intégrer ces informations en tant que mesures décisionnelles.

En plus de ces avantages, la présente invention a pour but de remédier aux inconvénients cités au début en relation avec les dispositifs actuels.

Un module de feu intelligent (3) est composé principalement de :

- un module d'alimentation (7),
- un système d'illumination à LEDs (8) (vert, jaune, ou rouge),
- un module de capture d'images et de vidéos orientable (5) permettant de capturer les images du trafic routier,
- un système embarqué équipé d'une accélération matérielle (9) afin d'assurer le traitement des flux vidéos au moyen des mécanismes de l'intelligence artificielle,
- un système de refroidissement (10,11),
- un système de communication sans fil (4) permettant de communiquer avec le reste des modules de feu intelligents,
- un système de commande (12) permettant de contrôler les autres modules de feu,
- et un watchdog matériel (13).

Le module d'alimentation (7) permet d'adapter l'alimentation secteur à l'alimentation des différents composants électroniques et électriques du module de feu intelligent.

Le système d'illumination à LEDs (8) constitue la lampe du module de feu. Un module de feu intelligent peut avoir une lampe rouge, jaune ou verte. D'autres couleurs ou formes illuminées peuvent être implémentées si besoin est.

Le module de capture d'images (5) assure une vision grand-angle avec vision nocturne capable d'atteindre un taux d'au moins 30 FPS. Ce module est connecté au module embarqué moyennant une liaison haut débit (14), à savoir la CSI. Cette liaison permet le transfert des images au format brut afin de permettre une meilleure reconnaissance à travers les mécanismes de l'intelligence artificielle.

Ce module de capture d'images est situé en bas de la lentille bombée (6) du module de feu intelligent, ce qui lui offre un degré d'inclinaison vers le bas lui permettant d'être orienté naturellement vers la route.

Sachant que le mécanisme d'orientation n'est pas indispensable, le module de capture d'images peut être orienté électriquement par le biais d'une application de configuration afin de couvrir la zone d'intérêt d'une manière plus précise et flexible. Il peut être réorienté dynamiquement au cours de son exploitation par le programme de l'intelligence artificielle afin de mieux évaluer la circulation en couvrant les zones mortes.

Le système embarqué (9) est composé d'un ordinateur à carte unique, muni d'une accélération matérielle telle que le GPU ou le TPU. Grâce à cette dernière, le système pourra exécuter des modèles de détection d'objets, de classification et de reconnaissance en temps réel en faisant appel aux techniques d'apprentissage en profondeur (deep learning).

Il est refroidi et maintenu en température normale de fonctionnement grâce à deux mécanismes distincts :

- Système de refroidissement ventilé installé à bord du système embarqué (10)
- Couche métallique galvanisée (11) couvrant l'intérieur du module de feu intelligent servant d'échangeur thermique au système embarqué.

Le système embarqué exécute un programme d'intelligence artificielle distribué permettant de calculer le plan correspondant à la meilleure stratégie de régulation.

En effet, grâce au modèle de reconnaissance pré-entraîné et déployé dans le système embarqué, ce dernier est capable de classifier les véhicules suivant différents critères, notamment le type, la catégorie, la gamme, etc. et d'intégrer ces informations en tant que mesures décisionnelles.

Le système embarqué peut exécuter plusieurs modèles de reconnaissances visuelles pré-entraînés et exploiter ces informations afin d'offrir une meilleure stratégie de régulation.

En fonction du besoin, des modèles de reconnaissance permettant de détecter les accidents de routes, les incendies, certains comportements des conducteurs, ou certaines anomalies de circulation peuvent être déployés au niveau du système embarqué. Ce dernier pourra intégrer ces informations en tant que mesures décisionnelles.

De même, des modèles de reconnaissance permettant de détecter et reconnaître les piétons, les cyclistes ou tout mode de déplacement alternatif (trottinette, segway, gyroroue, etc.) peuvent être déployés dans le système embarqué. Ce dernier pourra ensuite intégrer ces informations en tant que mesures décisionnelles.

Des modèles de reconnaissance et lecture des plaques d'immatriculation des véhicules peuvent être déployés au niveau du système embarqué afin de pouvoir les identifier. Ces informations peuvent être utilisées dans des scénarios de détection de franchissement de feu rouge, ou à des fins de sécurité.

Le système embarqué pourra implémenter une logique de priorisation de passage pour une certaine classe de véhicules, notamment les véhicules d'intérêt général prioritaires (les ambulances, les véhicules de transports en commun, etc.). Par exemple, si une ambulance est reconnue sur une voie au cours d'un cycle rouge du feu, le passage lui sera cédé immédiatement en interrompant le cycle en cours et en passant au cycle vert.

Le système pourra implémenter une logique de priorisation de passage pour des véhicules individuels en se basant sur l'identification des plaques d'immatriculation ou un mécanisme d'identification sans fil. Cette priorisation de passage pourra être accordée par une sélection de modules de feu intelligents, ce qui servirait à délimiter un trajet, et/ou pendant une plage horaire prédéfinie.

Cette logique de priorisation peut donner lieu à un nouveau paradigme de monétisation pour les villes intelligentes en offrant un service de priorité de passage dans les carrefours à feux.

Le système de communication sans fil (4) est le support de communication des modules de feu intelligents. Il permet d'échanger les rapports de circulation et les informations de synchronisation entre les modules de feu intelligents. Il implémente des mécanismes de sécurité et de cryptage de données garantissant le niveau de sécurité requis.

Ce système de communication sans fil rend l'installation de ces modules de feu intelligents moins contraignante en éliminant les travaux de génie civil liés au passage des câbles de communication dans le cas d'une solution filaire.

La régulation du trafic routier peut se faire à l'échelle des carrefours. Auquel cas, les modules de feu intelligents du même carrefour établissent des communications Point à Point afin de mettre en place la stratégie de régulation de la logique programmée (15).

Avec une pénétration assez élevée des modules de feu intelligents dans les carrefours d'un réseau routier, les systèmes de communication sans fil de ces modules pourront implémenter un réseau maillé (Mesh Network) qui les relira tous. Ce réseau maillé peut être exploité afin de mettre en

place une régulation à l'échelle de l'ensemble du réseau routier. Ce qui permettra d'éviter les situations d'encombrement en implémentant des stratégies de régulation globales.

En fonction du besoin, le réseau maillé constitué par les modules de feu intelligents peut être exploité à des fins autres que celles liées à la régulation du trafic routier.

Le système de commande (12) d'un module de feu intelligent permet de contrôler les autres modules de feu (tricolores, spéciaux ou piétons) installés dans sa voie en les asservissant suivant le plan de régulation calculé par la logique programmée.

Le système de commande est doté d'une carte à relais ayant principalement quatre canaux :

- un canal pour actionner (allumer ou d'éteindre) les modules de feu verts,
- un canal pour actionner les modules de feu jaunes,
- un canal pour actionner les modules de feu rouges,
- et un canal pour actionner les modules piétons,

D'autres canaux servant à actionner d'autres modules spéciaux peuvent être intégrés.

Le watchdog matériel (13) permet de surveiller le bon fonctionnement des différents modules et systèmes du module de feu intelligent à savoir le système embarqué, le module de capture d'images, le système de commande, et le système de communication sans fil. Si une anomalie est détectée sur l'un de ces éléments, le watchdog matériel prend le contrôle en adoptant le meilleur comportement de résilience en fonction de l'élément étant tombé en panne.

Les comportements de résilience peuvent aller de l'application d'un plan de régulation statique prédéfini, jusqu'à céder le contrôle au contrôleur du carrefour s'il en est préalablement équipé. D'autres comportements visant à mettre à l'arrêt l'ensemble du système et avertir les utilisateurs en faisant clignoter le jaune, par exemple, est également envisageable.

En parallèle du mécanisme de résilience appliqué, le watchdog matériel tente d'initialiser le système en vue d'un rétablissement potentiel.

Le module de feu intelligent pourra être équipé d'autres interfaces et modules selon le besoin afin d'être exploité au mieux. Un module de communication cellulaire, par exemple, pourra le connecter à une plateforme de contrôle et suivi à distance.

En référence à Figure 7, les modules de feu intelligents commencent par lancer le processus de synchronisation.

Le processus de synchronisation est un processus qui s'exécute en parallèle de la logique programmée tout au long de son cycle de vie. Son objectif est de maintenir les différents modules de feu intelligents en état de connexion et de synchronisation. Si un problème de connexion ou de synchronisation surviennent, le processus notifie le watchdog matériel afin de déclencher le mécanisme de résilience approprié.

Après le lancement du processus de synchronisation, les modules de feu intelligents chargent le plan de régulation initial. Ce dernier comporte les paramètres d'un cycle initial prédéfini par l'utilisateur lors de la configuration.

Pendant le cycle initial, les modules de feu intelligents analysent le trafic routier selon des mesures décisionnelles prédéfinies à savoir le taux d'occupation au sol des véhicules, la longueur de la file d'attente, le nombre des piétons, etc.

Si la priorité de passage est intégrée en tant que mesure décisionnelle, le cycle initial peut être interrompu à tout moment en fonction de la priorité de passage marquant ainsi sa fin.

Avant la fin du cycle initial, les modules intelligents archivent leurs analyses sous format de rapports de circulation et se les partagent.

Après avoir reçu les rapports de circulation des autres modules de feu intelligents, chaque module de feu intelligent calcule un coefficient de correction par rapport aux paramètres du cycle initial afin de l'adapter à la réalité de la circulation.

Les modules de feu intelligents déclenchent le nouveau cycle calculé et continuent l'analyse du trafic routier pour le prochain cycle.

Les modules de feu intelligents peuvent décider de prolonger le cycle en cours si les paramètres de la circulation y sont favorables. Par exemple, dans un carrefour à quatre branches, dans le cas d'une absence de circulation sur une branche et son prolongement qui se trouvent en état d'arrêt (rouge) à la fin du cycle, il convient de prolonger la phase rouge sur ces branches, et la phase verte sur les autres.

REVENDICATIONS

1 - Système de régulation de trafic routier pour feu tricolore caractérisé en ce qu'il est complètement embarqué au niveau d'une tête de feu tricolore, en ce qu'il est distribué et autonome n'ayant besoin d'aucune gestion ni installation centralisée, notamment un contrôleur de carrefour, en ce qu'il opère en sans-fil et en ce qu'il comprend :

- Au moins, un module de capture d'images et de vidéos (5), caractérisé en ce qu'il est intégré à la lentille (6) d'un module de feu. L'intégration du module de capture d'images au niveau de la lentille d'un module de feu permet de l'orienter systématiquement vers la route dans le cas des lentilles bombées. Ce module permet de capturer le trafic routier passant par la route en haute définition.
- Un système de traitement embarqué relié au module de capture d'images, au sein du même dispositif, à l'aide d'une liaison haut débit et comprenant :
 - Un accélérateur matériel permettant d'exécuter des modèles de reconnaissance visuelle sur les images et vidéos capturées. Ces modèles de reconnaissance relèvent de l'intelligence artificielle et permettent de calculer des métriques décisionnelles comme le nombre de véhicules, le taux d'occupation au sol des véhicules, la longueur de la file d'attente, les catégories des véhicules, etc.
 - Un ensemble d'entrées/sorties permettant l'interfaçage du système avec d'autres modules.

Le fait que le système embarqué soit relié au module de capture d'images au sein du même dispositif permet un transfert au format brut des images moyennant la liaison haut débit sans avoir besoin d'équipements spéciaux pour le même transfert dans le cas d'une liaison longue distance.

- Un système de refroidissement assurant le fonctionnement du système de traitement embarqué en température normale.
- Un module de communication sans fil relié au système embarqué à travers ses entrées/sorties permettant des communications sécurisées de courte et longue portée. Ce module permet d'échanger les paramètres de régulation comme les métriques décisionnelles, les données de synchronisation, les plans de régulation, etc. Ce module permet d'éliminer les travaux de génie civil liés au passage des câbles de communication dans le cas des solutions filaires.

- Un module de commande de feux relié au système embarqué à travers ses entrées/sorties permettant d'asservir les modules de feu tricolores, piétons ou spéciaux de la même voie suivant la régulation calculée par la logique programmée. Ce module permet de se passer du contrôleur de carrefour.
- Un watchdog matériel relié au système de traitement embarqué permettant d'assurer le bon fonctionnement de l'ensemble des éléments suscités et de prendre le contrôle du module de commande, le cas échéant.

Ce système permet de calculer, à partir de ses métriques décisionnelles et des métriques décisionnelles reçues des autres systèmes, des plans de régulation adaptés à la réalité de la circulation et d'asservir les modules de feux tricolores, piétons ou spéciaux en les respectant.

2 - Système de régulation de trafic routier pour feu tricolore, selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit module de capture d'images et de vidéos dispose d'un mécanisme d'orientation. Ce dernier lui offre un degré de liberté permettant de l'orienter efficacement sur la zone d'intérêt, et de couvrir les zones mortes au cours de son exploitation.

3 - Système de régulation de trafic routier pour feu tricolore, selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce qu'il est complètement embarqué au niveau d'un module de tête de feu tricolore (3). Ce qui permet de l'enficher dans une tête de feu tricolore existante en remplacement de l'un de ses modules conventionnels. Ce système rend la maintenance plus facile en permettant de le remplacer facilement en cas de panne.

4 - Système de régulation de trafic routier pour feu tricolore, selon les revendications 1 à 3, caractérisé en ce qu'il est capable de détecter et lire les plaques d'immatriculation des véhicules. Ce qui permet son utilisation à des fins de contrôle et de surveillance.

5 - Système de régulation de trafic routier pour feu tricolore, selon la revendication 4, caractérisé en ce qu'il est capable de détecter les véhicules franchissant le feu rouge et de les identifier par leurs immatriculations.

6 - Système de régulation de trafic routier pour feu tricolore, selon les revendications 1 à 3, caractérisé en ce qu'il est capable de s'interfacer avec un autre système externe indépendant à travers ses entrées/sorties filaires ou à travers son module de communication sans fil. Cet interfaçage permet de nouvelles utilisations comme la surveillance, l'analyse du trafic routier, la mise en place d'un système d'affichage, etc.

7 - Système de régulation de trafic routier pour feu tricolore, selon les revendications 1 à 3, caractérisé en ce qu'il est capable de classifier les véhicules selon plusieurs critères, notamment le type, la catégorie, etc. et d'intégrer ces informations en tant que mesures décisionnelles.

8 - Système de régulation de trafic routier pour feu tricolore, selon les revendications 1 à 3, caractérisé en ce qu'il est capable de détecter et reconnaître les accidents de routes, les incendies, certains comportements des conducteurs et certaines anomalies de circulation et d'intégrer ces informations en tant que mesures décisionnelles.

9 - Système de régulation de trafic routier pour feu tricolore, selon les revendications 1 à 3, caractérisé en ce qu'il est capable de détecter et reconnaître les piétons, les cyclistes ou tout mode de déplacement alternatif et d'intégrer ces informations en tant que mesures décisionnelles.

10 - Système de régulation de trafic routier pour feu tricolore, selon les revendications 1 à 3, caractérisé en ce qu'il est capable de détecter et reconnaître tout objet ou action dont le modèle de reconnaissance est déployé dans son système embarqué et d'intégrer ces informations en tant que mesures décisionnelles.

11 - Système de régulation de trafic routier pour feu tricolore, selon les revendications 1 à 3, caractérisé en ce qu'il est capable de s'interfacer avec des capteurs de mesure, et d'intégrer ces informations en tant que mesures décisionnelles.

12 - Système de régulation de trafic routier pour feu tricolore, selon les revendications 1 à 3, caractérisé en ce qu'il est capable de s'interfacer avec d'autres supports de communication.

13 - Système de régulation de trafic routier pour feu tricolore, selon les revendications 1 à 3, caractérisé en ce qu'il implémente une logique de priorisation de passage en se basant sur la détection de la catégorie des véhicules, l'identification des plaques d'immatriculation ou l'identification des véhicules à travers un mécanisme d'identification sans fil.

14 - Procédé de régulation de trafic routier pour carrefour à feux, caractérisé en ce qu'au moins un feu de chaque branche d'un carrefour comprend le système revendiqué selon l'une des revendications 1 à 13.

15 - Procédé de régulation de trafic routier pour carrefour à feux, selon la revendication 14, caractérisé en ce que la priorité de passage donne lieu à un paradigme de monétisation en offrant un service de priorité de passage payant dans les carrefours à feux.

16 - Procédé de régulation de trafic routier pour carrefour à feux, selon la revendication 14, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- a) Les systèmes, selon l'une des revendications 1 à 13, lancent le processus de synchronisation
- b) Les systèmes, selon l'une des revendications 1 à 13, chargent un plan de régulation préconfiguré et déclenchent le plan de régulation initial
- c) Lors du plan de régulation chargé :
 - Chaque système du carrefour, selon l'une des revendications 1 à 13, analyse le trafic routier selon différents paramètres à savoir le taux d'occupation au sol des véhicules, la longueur de la file d'attente, le nombre de véhicules passant ou à l'arrêt, etc.
 - A 90% d'accomplissement du plan de régulation en cours, les systèmes, selon l'une des revendications 1 à 13, échangent les paramètres calculés.
 - Chaque système, selon l'une des revendications 1 à 13, utilise ces paramètres afin de calculer un coefficient de correction de cycle.
 - Chaque système, selon l'une des revendications 1 à 13, calcule le prochain cycle en fonction du cycle en cours et du coefficient de correction calculé.
- d) A la fin du plan de régulation en cours, chaque système, selon l'une des revendications 1 à 13, déclenche le nouveau plan de régulation calculé.
- e) Chaque système selon, l'une des revendications 1 à 13, réitère depuis l'étape (c)

Le processus de synchronisation est un processus qui s'exécute en parallèle de la logique programmée tout au long de son cycle de vie. Son objectif est de maintenir les différents systèmes, selon l'une des revendications 1 à 13, en état de connexion et de synchronisation. Si un problème de connexion ou de synchronisation surviennent, ce processus notifie le watchdog matériel afin de déclencher un mécanisme de résilience approprié.

17 - Procédé de régulation globale de trafic routier pour carrefour à feux caractérisé en ce qu'au moins deux carrefours d'un réseau routier comprennent le procédé selon la revendication 14, et en ce que les métriques décisionnelles de chaque carrefour sont partagées avec au moins un autre carrefour comprenant le procédé selon la revendication 14. De cette manière, les carrefours coordonnent ensembles, à travers le réseau maillé mise au point par les systèmes selon les revendications 1 à 13, afin d'adopter la meilleure stratégie de régulation à l'échelle globale du réseau.

18 - Procédé de régulation globale de trafic routier pour carrefour à feux caractérisé en ce qu'au moins deux carrefours d'un réseau routier comprennent le procédé selon la revendication 14, et en ce que le réseau maillé constitué par les systèmes, selon les revendications 1 à 13, peut être exploité à des fins autres que celles liées à la régulation du trafic routier.

19 - Tête de feu caractérisée en ce qu'elle comprend le système revendiqué selon l'une des revendications 1 à 13.

20 - Module de tête de feu caractérisé en ce qu'il comprend le système revendiqué selon l'une des revendications 1 à 13.