



HAL
open science

DATA PLUS : étude prospective dans le domaine du recueil de données de trafic

Yves David, Laurent Bréheret

► **To cite this version:**

Yves David, Laurent Bréheret. DATA PLUS : étude prospective dans le domaine du recueil de données de trafic. [Rapport de recherche] Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU). 1999, 70 p. + 230 p. d'annexes, figures, tableaux, illustrations, 434 références bibliographiques en annexe. hal-02163891

HAL Id: hal-02163891

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02163891>

Submitted on 24 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PREDIT

Programme national de recherche et
d'innovation dans les transports terrestres

DATA PLUS

*Étude prospective
dans le domaine
du recueil de données
de trafic*

Remerciements

Les auteurs de l'étude DATA Plus, étude prospective dans le domaine du recueil de données de trafic, tiennent à remercier les personnes qui ont bien voulu participer à l'enquête et répondre au questionnaire élaboré dans le cadre du projet.

Les informations ainsi recueillies sur les pratiques actuelles, les besoins et attentes exprimés par différents acteurs du domaine, ont constitué un apport précieux pour l'intérêt de cette étude.

Sont particulièrement remerciés :

S. COHEN - INRETS

J.C. SANTUCCI – DREIF/SIER

B. BRIET - Ville de Paris

G. LEMAITRE - CETE Méditerranée

Y. GUENIOT - DSCR

S. SELLAM - CITILOG

M. MAIQUES – CRICR de Marseille

M. BATES - SIAT

M. HEDDEBAUT – INRETS/LEOST

J.B. LESORT – INRETS/LICIT

E. VIOLETTE - CETE Normandie Centre

C. FRANCOISE - DDE 31

JL MELIQUE - ASF District de Toulouse

P. LAFFONT, S. MATHIEU, A. BLAQUIERE - Service Circulation Ville de Toulouse

M. JACQUEMIN - Communauté Urbaine du Grand Nancy

B. JACOB - LCPC

M. MAEDER - ECM

D. STANCZYK et A. METZELER - CETE de l'Est

Ch. TARPIN – Médiamobile

M. ESTIVAL – STERELA

J.M. BOISSEAU – COFIROUTE

M. DARME - SEMVAT

Sommaire

1	<i>Objectifs de l'étude</i>	1
2	<i>Analyse bibliographique</i>	3
2.1	Généralités	3
2.2	Les variables de trafic	4
2.2.1	Caractéristiques fondamentales du trafic	4
2.2.2	Classification des véhicules	4
2.2.3	Mouvements tournants et changements de voie	5
2.2.4	Reconstitution de matrices O/D	5
2.2.5	Détection automatique d'incidents (DAI)	6
2.2.6	Longueurs de queues et bouchons	7
2.2.7	Estimation des temps de trajet	7
2.2.8	Détection de piétons	8
2.2.9	Détection des conditions météorologiques	8
2.3	Technologie des Capteurs	9
2.3.1	Boucles inductives	9
2.3.2	Magnétomètres	9
2.3.3	Capteurs acoustiques	10
2.3.4	Capteurs optiques	10
2.3.5	Capteurs micro-ondes	10
2.3.6	Capteurs de pression	11
2.3.7	Capteurs vidéo	11
2.3.8	Lecture de plaques minéralogiques	14
2.3.9	Fusion de données	14
2.3.10	Véhicules « traceurs »	17
2.3.11	La « chaîne » du recueil de données	17
2.4	Analyse des Fonctions impliquant du recueil de données	21
2.4.1	Régulation	21
2.4.2	Gestion de tunnels	21
2.4.3	Lutte contre les infractions	21
2.4.4	Gestion de Péages	22
2.4.5	Gestion de parkings	22
2.4.6	Protection des passages à niveaux	22
2.4.7	Autoroute automatique	23
2.4.8	Etudes et recherches	23
2.5	Synthèse de la bibliographie	23
3	<i>Analyse des variables intervenant dans l'exploitation du trafic</i>	25
3.1	Les classes de mesures intéressant le trafic	25
3.2	Fiche « MESURE »	25

3.3	Besoins ressortant des fiches « mesure »	26
4	<i>Grandes classes et principes physiques des capteurs</i>	28
4.1	Capteurs inductifs - Boucles électromagnétiques	29
4.2	Capteurs magnétiques ou magnétomètres	31
4.3	Capteurs micro-ondes	32
4.3.1	Les capteurs à effet Doppler	32
4.3.2	Les radars proprement dits	33
4.3.3	Capteurs micro-ondes passifs	34
4.4	Capteurs optiques- capteurs infrarouge (IR)	34
4.4.1	Capteurs IR passifs	34
4.4.2	Lasers à impulsions	34
4.4.3	Barrières optiques	35
4.5	Capteurs vidéo - Traitement d'image	35
4.5.1	Capteurs vidéo pour l'analyse du trafic	35
4.5.2	Lecture de plaques minéralogiques	36
4.6	Capteurs acoustiques- capteurs à ultrasons (US)	37
4.6.1	Les capteurs passifs	37
4.6.2	Les capteurs actifs	37
4.7	Capteurs de pression	37
4.7.1	Capteurs pneumatiques	38
4.7.2	Capteurs piézo-électriques	38
4.7.3	Capteurs résistifs	39
4.7.4	Capteurs capacitifs	40
4.7.5	Capteurs à jauges de contrainte	40
4.7.6	Fibres optiques	40
4.8	Capteurs météorologiques	41
4.9	Capteurs de nuisances	41
4.10	Mesures impliquant des véhicules « actifs »	41
4.10.1	Contrôleurs embarqués	41
4.10.2	Véhicules traceurs (ou « probes »)	42
4.10.3	Envoi d'informations par les conducteurs	42
4.11	Perception aérienne globale du trafic	42
4.11.1	L'environnement	43
4.11.2	Les capteurs	44
4.11.3	Les vecteurs	45
4.11.4	Conclusion	46
4.12	Synthèse	46
4.12.1	Les grandes classes de capteurs	46
4.12.2	Perspectives d'évolution	47
5	<i>Fonctions et services impliquant du recueil de données</i>	49
5.1	Besoins ressortant des fiches « fonctions »	50
5.2	Intégration des fonctions	52

6	<i>Enquêtes auprès des professionnels</i> _____	54
6.1	Fonctions intéressant les exploitants _____	54
6.2	Mesures intéressant les exploitants _____	54
6.3	Performances exigées _____	54
6.4	Position des personnes interrogées par rapport aux capteurs _____	55
6.5	Disponibilité des capteurs _____	55
6.6	Tendances et perspectives d'évolution _____	55
6.7	Problèmes soulevés concernant le recueil de données _____	55
6.8	Matériel mobile de mesure _____	56
6.9	Besoins en matière de R&D _____	56
7	<i>Aspects économiques</i> _____	57
8	<i>Synthèse des résultats</i> _____	59
8.1	Conclusions _____	59
8.2	Recommandations _____	60
8.2.1	Meilleure connaissance des capteurs existants _____	60
8.2.2	Apport de la vidéo aux différentes fonctions de l'exploitation _____	60
8.2.3	Utilisation des systèmes de lecture automatique de plaques minéralogiques _____	60
8.2.4	Evaluation des temps de trajet en milieu urbain _____	61
8.2.5	Détection des infractions dans les péages multivoies _____	61
8.2.6	Fusion de données, estimation, prédiction _____	61
8.2.7	Prise en compte de véhicules « traceurs » dans le recueil de données _____	62
8.2.8	Surveillance de réseaux de grande étendue _____	63
8.2.9	Sécurité des moyens de détection des véhicules _____	63
8.2.10	Meilleure connaissance des moyens de transmission utilisables dans la chaîne du recueil de données _____	64
8.2.11	Recensement des équipements existants _____	64
8.2.12	Pesage dynamique _____	64
8.2.13	Détection de piétons et 2 roues _____	64
8.2.14	Détection des conditions météorologiques _____	64
8.2.15	Evolution des technologies micro-ondes _____	64
8.2.16	Collecte d'événements _____	65
9	<i>Annexes</i> _____	66

1 Objectifs de l'étude

L'étude porte principalement sur l'évolution des technologies et des pratiques en matière de recueil de données, avec pour objectif de dégager les besoins de recherche dans ce domaine.

1. Une analyse bibliographique destinée à inventorier :
 - Les grandeurs intéressant les exploitants du trafic ;
 - L'évolution des méthodes de recueil
 - Leurs principales applications et les performances obtenues.
On s'intéressera non seulement aux capteurs proprement dits, mais aussi à toute la chaîne de mesure et de traitement.
2. Une analyse systématique, fondée sur la bibliographie et l'expérience des partenaires chargés de l'étude, des variables pouvant intervenir dans l'exploitation du trafic
3. Un rappel des principaux phénomènes physiques et des techniques de capteurs utilisés dans les recueils de données. On s'appuiera notamment pour ce rappel sur l'étude du SETRA (2)♣.
4. Une analyse systématique des fonctions et services déjà opérationnels ou susceptibles de se développer à moyen terme, et impliquant des besoins en matière de recueil de données. Cette analyse s'appuiera, outre sur l'expérience des partenaires de l'étude, sur les listes de fonctions et services établies à l'occasion des grands programmes de recherche internationaux ou nationaux qui ont tous procédé à de tels inventaires: PROMETHEUS, DRIVE, IVHS/ITS America, les programmes japonais (ASV, VERTIS ..etc.), PREDIT, PROMOTE, etc. L'objet de cette analyse est de vérifier les besoins de mesures qui auraient pu être négligés par les démarches précédentes.
5. Des contacts avec différents professionnels intéressés par le recueil de données:
 - exploitants (urbains, routiers, autoroutiers)
 - fabricants
 - services d'étude et d'essais
L'objectif est de déterminer les besoins et les problèmes rencontrés en matière de recueil de données.
6. Un examen des aspects économiques et des enjeux, comprenant
 - une évaluation sommaire du marché intéressant les capteurs
 - un inventaire des principaux fabricants français et étrangers, en essayant de situer leur place sur ce marché.
7. En conclusion on fera la synthèse des résultats de toutes ces démarches, et on essaiera de dégager :
 - les grandes évolutions observables dans le domaine du recueil de données, et les conséquences qui en découlent tant sur le plan opérationnel que sur celui de la recherche
 - les grands domaines dans lesquels se développeront les applications des capteurs dans les prochaines années
 - les besoins insuffisamment satisfaits ou non satisfaits pour lesquels un effort de recherche serait nécessaire.

Chacune de ces démarches fait l'objet d'un chapitre du présent rapport. Ces chapitres ont relativement peu de liens entre eux, la philosophie de la méthode choisie consistant à aborder le domaine du recueil de données sous ses différents aspects par des approches très indépendantes les unes des autres, afin d'obtenir une analyse aussi large et exhaustive que possible du domaine.

Les réflexions ont été alimentées essentiellement par l'analyse bibliographique, et à un moindre degré par les entretiens avec les professionnels, ces 2 démarches étant traitées dans les chapitres 2 et 6. Les

♣ Les chiffres entre parenthèses font références aux numéros des documents analysés dans la bibliographie. Cf. le document « Annexe au Rapport d'Etude », chapitre « Bibliographie »

chapitres 3, 4, et 5 sont également autonomes, mais les liaisons qu'ils présentent entre eux sont présentées dans les tableaux croisés figurant à la fin des chapitres 3 et 5.

La synthèse de toutes ces démarches se fait bien entendu dans le chapitre 8, de conclusion, qui dégage les faits les plus saillants qui ressortent de toutes ces analyses, et qui formule des recommandations sur les actions à mener dans ce domaine du recueil de données.

Il n'est pas inutile de rappeler ici que le recueil de données constitue une chaîne d'informations comportant les maillons suivants:

- *capteur* : procédé physique qui permet d'appréhender le phénomène à mesurer
- *détecteur* : dispositif électronique servant à mettre en forme le signal issu du capteur
- *transmissions* : qui intéressent les liaisons capteur/détecteur, détecteur/unité locale, unité locale/unité centrale
- *traitement* : destiné à fournir des données élaborées à partir des signaux des détecteurs, ce traitement peut être centralisé ou s'effectuer, au moins partiellement dans des unités locales (stations de mesure).

Le présent rapport va plutôt se concentrer sur les premiers maillons - capteurs, détecteurs- de cette chaîne, mais évoquera cependant les autres maillons et notamment les transmissions.

Il est utile également de rappeler brièvement ici la signification des critères de performances des capteurs, que l'on va évoquer tout au long du rapport.

Nous distinguerons à cet effet les capteurs de mesure, qui fournissent des informations chiffrées, par exemple sur le débit ou la vitesse des véhicules, et les capteurs d'événements, tels que les incidents, ou les infractions.

Les critères de performance des capteurs de mesure le plus fréquemment utilisés, ou plutôt de l'ensemble capteur/détecteur, sont :

- la précision, ou l'exactitude, représentée par le rapport entre une valeur mesurée par le capteur considéré, et une valeur de référence mesurée par exemple manuellement ou par un autre capteur soigneusement étalonné.
- l'erreur E est la différence : $E = (\text{valeur de référence} - \text{valeur mesurée})$
- le taux d'erreur, représenté par le rapport: $E/(\text{valeur de référence})$. Lorsqu'on dispose de plusieurs séries de mesures, conduisant à des erreurs E_1, E_2, \dots, E_n , on peut utiliser également l'écart type des erreurs : $\sqrt{(\sum E_i^2/n)}$.

Dans le cas des capteurs d'événements (DAI p.ex.) on utilise généralement les critères suivants :

- taux de détection, représenté par le rapport entre le nombre d'événements intéressants détectés et le nombre réel de ces événements, déterminé par exemple par observations visuelles.
- le taux de fausses alarmes, représenté par le rapport entre le nombre de détections erronées, ne correspondant pas à un événement intéressant, et le nombre des événements intéressants.
- le temps de détection, c'est-à-dire le temps s'écoulant entre l'occurrence de l'événement et le déclenchement de l'alerte

2 Analyse bibliographique

2.1 Généralités

On trouvera dans l'annexe à ce rapport la liste de toutes les références trouvées sur le sujet du recueil de données, datant pour la plus grande partie des années 90. On s'est limité à cette période, d'une part parce que l'étude demandée a un caractère davantage prospectif que rétrospectif, et qu'une période d'une dizaine d'années paraissait suffisante pour établir un état de l'art et dégager des tendances, d'autre part parce que le temps imparti à cette étude ne permettait pas d'allonger excessivement l'analyse bibliographique.

Cette liste a été établie à partir

- de la documentation disponible à la SODIT et au CETE de l'Est
- des grands Congrès internationaux récents sur l'exploitation de la route et notamment des Congrès IVHS/ITS
- d'une base de données INRETS sur les capteurs.

Au total près de 600 références ont été rassemblées. Il n'a malheureusement pas été possible d'avoir accès à la totalité des documents correspondants, mais une part significative, de plus de 70%, a pu être recueillie et dépouillée, ce qui semble suffisant compte tenu des redondances que l'on trouve généralement dans les publications techniques et scientifiques.

On trouvera en annexe le résultat de l'analyse de cette bibliographie, qui a été réalisée selon les deux aspects sous lesquels on peut considérer le recueil de données:

- les variables à mesurer
- la technologie des capteurs
- l'aspect fonctionnel.

On arrive ainsi à la grille d'analyse suivante:

2.2	Les variables de trafic	2.3	Les techniques du recueil de données et les capteurs	2.4	Les fonctions intéressées par le recueil de données
2.2.1	Caractéristiques fondamentales du trafic	2.3.1	Capteurs à boucles	2.4.1	La régulation de trafic
2.2.2	Classification des véhicules	2.3.2	Magnétomètres	2.4.2	Gestion de tunnels
2.2.3	Mouvements tournants et changements de voie	2.3.3	Capteurs acoustiques ultrasons	2.4.3	La lutte contre les infractions
2.2.4	Reconstitution de matrices O/D	2.3.4	Capteurs optiques	2.4.4	Gestion de Péages
2.2.5	Détection automatique d'incidents (DAI)	2.3.5	Capteurs micro-ondes et radars	2.4.5	Gestion de parkings
2.2.6	Longueurs de queues et bouchons	2.3.6	Capteurs de pression	2.4.6	La surveillance des passages à niveaux
2.2.7	Estimation des temps de trajet	2.3.7	Capteurs vidéo	2.4.7	Autoroute automatique
2.2.8	Détection de piétons	2.3.8	Lecture de plaques minéralogiques	2.4.8	Etudes et recherches
2.2.9	Détection des conditions météorologiques	2.3.9	Fusion de données		
		2.3.10	Véhicules « traceurs »		
		2.3.11	La « chaîne » du recueil de données		

Bien entendu il existe des recouvrements importants entre les publications. Les auteurs en ont tenu compte par renvois d'une rubrique à une autre. Nous présentons dans les paragraphes qui suivent une synthèse de ce que l'on trouve dans la littérature sur chacun des thèmes figurant dans cette grille, après avoir dégagé ci-dessous les points les plus saillants de cette revue bibliographique.

2.2 Les variables de trafic

2.2.1 Caractéristiques fondamentales du trafic

Les grandeurs que l'on range généralement sous cette rubrique, Q, V, T.O, concentration K, sont évoquées dans la plupart des documents traitant des capteurs que nous venons de passer en revue.

Ces grandeurs servent pour de nombreuses applications:

- régulation du trafic
- information & guidage: les informations sur la vitesse peuvent être à la base d'estimations de temps de trajet, et le T.O. ou la concentration permettent d'évaluer l'état de congestion du trafic
- DAI
- péages
- maintenance des chaussées
- études statistiques

La plupart des capteurs permettent la mesure de ces variables, mais chaque capteur a une certaine spécificité.

Les boucles, les capteurs à ultrasons et les capteurs IR se prêtent particulièrement bien à la mesure des débits, avec des taux d'erreur <3% ((70), (181), (168)). L'utilisation de combinaisons de 2 boucles/voie, comme dans le système IDRIS ((239), (251)), permet d'obtenir des taux d'erreur de 0,05%, voire 0,004% dans certaines circonstances. De même le capteur IR Autosense peut atteindre des précisions de 99,9% ((72), (229)).

Les radars Doppler se prêtent bien à la mesure des vitesses. Cependant les combinaisons de boucles, de capteurs US ou IR permettent également cette mesure avec des taux d'erreur <3%.

La mesure du taux d'occupation se fait bien avec tous les détecteurs de type « ponctuel »: boucles, capteurs US ou IR, magnétomètres.

Seules les caméras TV permettent une mesure correcte de la concentration.

2.2.2 Classification des véhicules

Cette notion de classification est ambiguë car les classes dans lesquelles on cherche à ranger les véhicules varient avec l'application intéressée; elles peuvent également dépendre des capteurs dont on dispose pour réaliser la classification.

Les principales fonctions intéressées sont:

- le péage
- la répression des infractions
- la maintenance des chaussées
- les études statistiques.
- même la régulation peut être intéressée, comme le montre (179) qui évoque une commande adaptative de carrefour tenant compte de la classe des véhicules approchant du feu.

Les péages utilisent de multiples classifications selon le pays ou la Société d'autoroute concernée (127). Certaines font intervenir les dimensions géométriques du véhicule, mais beaucoup d'entre elles se fondent également sur la configuration et le poids des essieux. Cette dernière grandeur est également importante pour la maintenance des chaussées.

Pour les besoins de certaines études statistiques des classifications simplifiées faisant intervenir 3 ou 4 classes : PL, camionnettes, VL, 2 roues peuvent suffire.

Les capteurs utilisables pour les besoins de la classification sont nombreux:

- combinaison boucles/capteurs piézo: permettant la mesure de la vitesse et du poids de chaque essieu, cette combinaison fournit une image détaillée de la partie inférieure du véhicule et permet une classification fine des PL
- capteurs de type laser IR pulsé (67), (72) (228): ces capteurs permettent de reconstituer le profil en hauteur des véhicules, voire une image complète de la forme du véhicule dans le cas d'un laser à balayage transversal. La référence (228) mentionne une classification en 8 classes de véhicules avec un taux d'exactitude de 95,5%.
- radars, permettant la distinction de 3 classes (169)
- combinaison de 2 capteurs « ponctuels » (boucles, IR, US ..etc..) permettant d'évaluer la vitesse, le temps de présence, et par conséquent la longueur des véhicules.

2.2.3 Mouvements tournants et changements de voie

Ces sujets sont peu évoqués dans la bibliographie.

La société Traficon a développé un algorithme spécifique (137) d'analyse d'images vidéo pour la détection de mouvements tournants à un carrefour, à partir d'une caméra implantée pour pouvoir observer jusqu'à 4 artères au voisinage du carrefour. Dans (173) est évoquée une méthode d'évaluation de ces mouvements à partir de mesures faites par des capteurs à boucles.

La détection des changements de voies sur une autoroute par analyse d'images vidéo a été utilisée (190) dans la mise au point d'un algorithme de DAI fondé sur un réseau neuronal dans lequel les variables d'entrée sont V, T.O et la fréquence des changements de voies: les taux de détection atteints varient de 90 à 100%.

2.2.4 Reconstitution de matrices O/D

La détermination des matrices O/D fait l'objet d'une littérature abondante que nous n'avons pas complètement recherchée et analysée du fait qu'elle est davantage consacrée au traitement de données qu'au recueil proprement dit.

Les matrices O/D intéressent plus particulièrement les applications suivantes:

- régulation du trafic urbain- affectation du trafic en vue de la préparation de plans de feux- régulation en temps réel
- régulation du trafic autoroutier- contrôle d'accès
- prévision du trafic pour les besoins de l'information/guidage
- études et recherches

Le problème consiste généralement à s'appuyer sur une matrice O/D ancienne, ou, faute de mieux, sur une matrice arbitraire, et à la réactualiser à partir de mesures récentes:

- mesure directe d'O/D sur un échantillonnage de véhicules que l'on identifie à l'aide de badges, ou par lecture de plaques minéralogiques. Sur autoroute à péage il est possible d'utiliser les tickets de péage. Dans la plupart des cas on ne dispose pas d'un échantillon complet.
- mesures de débit sur différents tronçons du réseau intéressé. On ne dispose généralement pas non plus de suffisamment de données pour résoudre le problème à MxN inconnues que soulève un réseau à M entrées et N sorties. On voit en particulier dans (194) que, pour que les erreurs soient bornées, il est nécessaire que le trafic entre chaque O/D soit observé sur au moins un chaînon de l'itinéraire concerné.

Différentes méthodes sont utilisables: moindres carrés, filtrage de Kalman, approche statistique Bayésienne, etc. On en trouve par exemple une bonne comparaison dans (186), qui contient également une liste importante de références.

On trouve peu de données chiffrées sur les performances de ces méthodes. Citons (194) qui évoque, pour un petit réseau un écart type de 9,5% à 12,5% entre valeurs estimées et valeurs réelles.

2.2.5 Détection automatique d'incidents (DAI)

La DAI est une mesure très importante pour les exploitants du trafic qui souhaitent être avertis le plus rapidement possible d'un incident ou accident afin d'une part de prendre les dispositions nécessaires pour réduire les perturbations et dangers pour la circulation qui peuvent s'ensuivre, et d'autre part d'informer les automobilistes se dirigeant vers le lieu de l'événement de ce risque de perturbations.

Les principales fonctions intéressées sont:

- la régulation du trafic
- l'information/guidage
- la gestion des services d'intervention

Les premières applications de la DAI ont été mises en œuvre sur autoroute aux Etats-Unis au début des années 70, sous le nom de « Algorithme Californien ». Depuis cette époque de nombreuses méthodes ont vu le jour à travers le monde, et l'algorithme californien a lui-même connu 8 versions.

A l'origine on ne disposait que de capteurs à boucles sur les chaussées, et on ne pouvait saisir que les 3 variables fondamentales du trafic: Q, V, T.O. Un incident ne pouvait être détecté que s'il avait une influence sur ces variables, ce qui rendait d'ailleurs difficile la DAI en conditions de trafic très fluide.

Avec l'apparition de nouveaux capteurs tels que les caméras TV avec traitement d'image, ou les radars, la notion d'incident s'est élargie, et l'on s'intéresse maintenant également aux véhicules anormalement lents ou aux véhicules arrêtés, même sur BAU, qui peuvent être la source de perturbations. Ces nouveaux capteurs saisissent généralement l'événement au moment où il survient, ou avec une faible constante de temps, et réagissent plus vite que les algorithmes traditionnels qui doivent attendre que les conséquences de l'événement soient sensibles au niveau des stations de mesure. Par ailleurs on commence aussi à s'intéresser à la DAI en milieu urbain (24), (134), (191).

On peut s'intéresser également à la prévision de conditions favorables à l'apparition d'incidents ou accidents (121).

Les méthodes classiques fondées sur les capteurs ponctuels (boucles, US ..etc..) sont nombreuses et font intervenir des stations de mesure régulièrement espacées à intervalles de l'ordre de 500 à 1000m, voire 200 à 300 m en tunnel. On en trouve des descriptions par exemple dans (130), (132). Elles prennent en compte

- soit des variations temporelles des variables de trafic mesurées sur une station
- soit des variations spatiales de ces variables, mesurées sur 2 ou 3 stations successives.

Leurs performances se mesurent à l'aide des critères suivants:

- taux de détection **TD**
- taux de fausses alarmes **TFA**, exprimé généralement en F.A/station/jour
- délai de détection

La littérature récente fait surtout état des performances des capteurs nouveaux, vidéo ou radars. Pour la vidéo, les valeurs des critères publiées se situent dans des fourchettes assez larges (111), (117), (133), (238). TD va de 80% à près de 100% selon les conditions de trafic, avec des TFA variant de 0,05 à 1 FA/km/j, et des délais de détection situés entre 10 et 40 secondes. Les performances en matière de détection de véhicules lents sont du même ordre de grandeur.

Un radar comme BEATRICES a des performances plus modestes, avec un TD de 78% et beaucoup de fausses alarmes (111).

On trouve 2 estimations sur les performances des algorithmes fondés sur des boucles:

- (187) fait état d'un TD de 70% avec l'algorithme DELOS amélioré
- (212) indique que l'algorithme IDRIS appliqué en tunnel a un TD de 100% avec 1FA/jour.

2.2.6 Longueurs de queues et bouchons

La détection de bouchons sur autoroute est évoquée dans un exposé japonais (159) qui présente un système implanté sur la Metropolitan Expressway. L'objectif est de prévenir les conducteurs approchant d'une courbe à visibilité réduite de la présence d'un bouchon en aval. La détection est assurée à partir de mesures de vitesse sur des détecteurs ultrasons espacés de 300m. La queue d'un bouchon peut ainsi être localisée à 100 m près. Des PMV en amont annoncent aux conducteurs la position de ce bouchon. 10 systèmes de ce type étaient installés en mi-98.

En milieu urbain les chercheurs s'intéressent à la mesure des longueurs de queues en amont des feux, qui servent dans des algorithmes de régulation. Un exposé de l'INRETS (193) indique que l'analyse d'images vidéo permet de mesurer ces longueurs avec un taux d'erreur de l'ordre de 10%.

Le système SIRIUS-Est (374) met également en oeuvre un système DAB de détection automatique de bouchons, qui fonctionne comme un système de DAI avec des stations de détection à boucles espacées de 500 m à 1000 m.

2.2.7 Estimation des temps de trajet

Avec les développements de l'information routière, les exploitants du trafic s'intéressent beaucoup aux temps de trajet des véhicules, et ce thème fait l'objet d'une littérature abondante. Les principales applications concernées sont :

- l'information/guidage
- les études et évaluations.

Il existe différentes méthodes pour évaluer des temps de trajet sur un itinéraire donné:

- on peut découper l'itinéraire en différents tronçons et l'on mesure la vitesse moyenne, et par voie de conséquence le temps de parcours des véhicules sur chaque tronçon. Le temps de trajet total est considéré comme étant la somme des temps de trajet partiels ainsi calculés
- on peut utiliser des méthodes d'identification automatique des véhicules aux points origine et destination de l'itinéraire, ce qui permet de mesurer exactement le temps de parcours des véhicules identifiés. Diverses méthodes d'identification sont envisageables:
 - ◆ badges transpondeurs embarqués: diverses expériences menées à Berlin, au Danemark, à Houston, avec cette méthode sont citées dans (105), (112), (113), (125), (225).
 - ◆ lecture automatique de plaques minéralogiques: cette méthode est largement utilisée au Japon (13)
 - ◆ reconnaissance de formes (« pattern matching ») de véhicules isolés ou de groupes de véhicules: on peut reconnaître un véhicule isolé avec 1 paire de capteurs US (106) permettant de déterminer son profil longitudinal; on peut employer un ensemble de boucles de type IDRIS (251), ou même une boucle simple dont on échantillonne finement le signal pour obtenir la « signature » du véhicule (252). La référence (17) montre comment on peut repérer des groupes de véhicules en se servant de mesures de longueur, avec des taux d'erreur très acceptables, de l'ordre de 4 à 9%.
- évaluation sur modèle à partir d'une mesure des variables fondamentales du trafic Q, V, T.O.

Pour des applications à l'information des conducteurs à un instant T0, cette évaluation n'est pas totalement satisfaisante :

- la première méthode, fondée sur un découpage de l'itinéraire en tronçons, fournit un temps de trajet fictif ou « instantané », calculé pour un départ à T0 sur chaque tronçon, qui ne correspond en fait à aucun parcours réel de véhicule

- la méthode fondée sur l'identification de véhicules mesure un temps de parcours réel, mais passé, la dernière information dont on dispose étant le temps de trajet TT de véhicules partis à T0-TT.

On se trouve par suite confronté à un problème de prédiction, pour lequel différentes solutions peuvent être envisagées :

- utilisation d'une base de données historiques, en se servant de mesures passées. On essaie soit de se référer à un jour et une heure comparables, soit de repérer, par des méthodes de reconnaissance des formes (pattern matching) dans le passé des périodes présentant des conditions de trafic similaires (151).
- combinaison de données historiques avec des données mesurées en temps réel par les méthodes décrites ci-dessus. Cette combinaison peut se faire à l'aide d'algorithmes divers: règle de trois (13), filtrage de Kalman (19), méthodes régressives, ARIMA, approches neuronales ou floues, etc.
- approche par modélisation du trafic en partant d'un recueil de données portant sur les variables classiques Q, V, T.O. (15), (18), (150), (199).

La deuxième difficulté rencontrée, qui est évoquée dans les références (28), (116), (200), est liée à la très grande dispersion des valeurs des vitesses et des temps de trajet, notamment en périodes de congestion. Le temps de trajet sur un itinéraire se présente comme une distribution, avec une moyenne et un écart type relativement élevé, et un auteur japonais se demande s'il ne conviendrait pas d'afficher cet écart type en même temps que la valeur moyenne (ce qui soulèverait quelques problèmes ergonomiques).

Les performances en matière d'estimation ou de prédiction de temps de trajet sont évoquées dans différents exposés. Les précisions obtenues se situent dans une fourchette de 5 à 20% environ.

2.2.8 Détection de piétons

2 modes de détection sont évoqués :

- par radar: un exposé américain (260) décrit le concept PUFFIN (Pedestrian user friendly intelligent crossing) de protection des piétons à un carrefour dans lequel les piétons sont détectés par un radar AGD 200 de la société AGD Systems
- par vidéo: un exposé sur le système TRISTAR de l'INRETS (23) indique que le taux de détection des piétons est de 90% de jour.

2.2.9 Détection des conditions météorologiques

Ce sujet est traité sous plusieurs aspects :

- l'utilisation de fibres optiques pour la détection des conditions d'apparition du verglas: des études japonaises ((13), (34)) indiquent qu'il est possible de mesurer de façon continue la température de la chaussée à $\pm 1^\circ$ près sur une longueur de 30 km à l'aide d'une fibre placée à 1 cm sous la surface de la route.
- l'utilisation de véhicules de patrouille équipés en remplacement ou en complément d'équipements au sol. En Belgique, dans le système Meteoroute en Wallonie, de tels véhicules sont équipés de thermomètres IR (110) en vue de dresser une « carte thermique » de la chaussée. Sur les autoroutes japonaises ((183), (185)), l'équipement embarqué comporte un laser à impulsions qui observe la réflectivité de la chaussée, d'un récipient de collecte des éclaboussures au voisinage des pneus, et d'un thermomètre IR. Par ailleurs Omron étudie (128) un dispositif optique dans lequel un filtre élabore à partir de l'image de la route un spectre de fréquences spatiales qui permet de déterminer la glissance de la chaussée.

- différents modèles, de prédiction (180), de remplacement de capteurs ou de données manquantes (70), ainsi que d'aide à la décision pour la planification des opérations de salage (180), (109), (219).

2.3 Technologie des Capteurs

2.3.1 Boucles inductives

Les boucles inductives ont fait l'objet de quelques articles ou ouvrages de fond dans la littérature ancienne, datant des années 70.

Ces dernières années la technologie des boucles a peu suscité d'articles, sans doute parce qu'elle est considérée comme bien connue, et les principales références que l'on peut trouver sur le sujet portent plutôt sur les applications opérationnelles de ces capteurs.

Quelques travaux sont cependant publiés sur le traitement du signal des boucles en vue d'obtenir des informations plus riches de ces capteurs:

- détection de l'apparition de phénomènes de congestion par boucles simples, en se servant des mesures de T.O et d'intervalles entre véhicules (76)
- classification des véhicules par traitement du signal par réseau neuronal (88)
- estimation de longueurs de queues et de mouvements tournants à un carrefour en se servant des signaux de boucles et des données sur les feux (173)
- développement de l'algorithme IDRIS de WS Atkins qui permet d'obtenir une grande précision sur les mesures de débits sur des chaussées à 2 voies/sens équipées de 2 boucles/voie. Les résultats obtenus sont évoqués dans 2 publications : dans (251) il est indiqué que le taux d'erreur sur les mesures de débit est de 0,004% en trafic fluide et de 0,013% en trafic congestionné; dans (239), on trouve une valeur de +/-0,05% pour ce taux d'erreur.
- reconnaissance de véhicules par échantillonnage et analyse du signal d'une boucle (252)

La littérature fournit également des chiffres intéressants sur le taux de disponibilité des boucles dans des situations réelles. Ces chiffres dépendent évidemment des sites et des opérations en cause, puisqu'ils sont très tributaires des politiques de maintenance adoptées, mais on arrive à des ordres de grandeur très comparables d'une référence à l'autre.

On peut citer ainsi les références suivantes:

- (3) : 15% des boucles utilisées sur les réseaux urbains japonais sont en permanence en panne
- (204) : taux de défaillance moyen des boucles sur le réseau français: 10% en urbain, 17% sur autoroute
- (294) : cet article cite un chiffre de 15% au moins pour le taux d'indisponibilité des boucles en France
- (207) : sur le réseau routier de Stuttgart 20% des mesures sont fausses.
- (282) : à l'échelle des Etats-Unis 30% des boucles seraient hors service en permanence

2.3.2 Magnétomètres

Ces capteurs qui ont la plupart des avantages des boucles tout en étant plus faciles à installer sont curieusement peu cités dans la littérature.

L'article (267) décrit les produits de la Société américaine Nu-Metrics, qui ont la particularité de disposer d'une liaison sans fil, d'une portée de 200 m, avec les équipements de terrain.

La référence (2) émet l'idée que le faible impact de ces capteurs tient à leur coût peu élevé, de l'ordre de 75\$ à l'unité, qui n'incite pas les constructeurs à faire de gros efforts pour les développer et les commercialiser.

2.3.3 Capteurs acoustiques

Dans ce domaine la littérature se concentre sur les détecteurs à ultrasons, qui sont particulièrement répandus au Japon. C'est ainsi que la référence (181) fait état de 2085 sites équipés sur le réseau autoroutier de Tokyo. On voit également dans (3) que les systèmes centralisés de régulation du trafic urbain au Japon, qui couvrent 52 508 carrefours, sont équipés de 81 558 capteurs dont 72 500 (79%) capteurs à ultrasons.

La raison officielle avancée pour ce choix est la difficulté d'installer et de réparer des boucles sur un réseau très chargé. Une autre raison est liée au fait que l'exploitation de la route est confiée à la Police japonaise, qui n'a aucun pouvoir sur l'Administration chargée de la construction et de l'entretien des routes, et par suite évite d'avoir à intervenir sur les chaussées.

Les principaux constructeurs sont : Omron, Matsushita-Panasonic, Kyosan Electric, Sumitomo, Nippondenso.

Les performances de ces capteurs sont évoquées dans plusieurs références (70), (177), (181), (168). On peut en retenir que l'on obtient couramment des précisions de l'ordre de 3% sur les débits et sur les vitesses (mesurées par 2 capteurs successifs). Dans les meilleures conditions on peut arriver à un taux d'erreur de 1 % sur les débits (70).

2.3.4 Capteurs optiques

Ces capteurs fonctionnent en général dans l'infrarouge, et se rangent dans 2 catégories:

- IR passif, sans dispositif émetteur
- IR actif, mettant en œuvre des émetteurs laser pulsés.

Un produit IR passif de la société suisse ASIM est évoqué dans (233), pour la détection de véhicules aux approches d'un carrefour à feux.

Plusieurs références traitent des capteurs IR actif:

- un capteur à 4 têtes laser pulsées de Nippon Signal formant un carré de 1,2 m de côté, et servant à des mesures de Q, V, et à la classification des véhicules fondée sur des mesures de longueur et hauteur. Les performances annoncées sont : de l'ordre de celles des capteurs US pour Q, +/- 10% pour V, et 95% pour la classification.
- un capteur NEC à 2 têtes laser, dont les taux d'erreur annoncés sont : 7,5% sur V et 2,1% sur les mesures de longueur
- les séries Autosense I, II et III de la société américaine Schwartz Electro Optic (SEO) à 2 têtes laser. Les séries II et III utilisent des systèmes de balayage transversal permettant d'obtenir une véritable imagerie des véhicules passant dans leur champ.

Les performances en précision annoncées (228) sont de 99,9% sur Q, un taux d'erreur de +/- 1,5% sur V, et 95,5% sur la classification des véhicules en 8 catégories.

300 à 400 de ces capteurs seraient implantés dans l'Ontario et 350 sur la Highway 407 à Toronto. Dans cette application les performances annoncées (262) sont de 99,99% sur Q et de 99% pour le taux de classifications correctes (13 classes).

2.3.5 Capteurs micro-ondes

On trouve 2 types de radars dans les applications concernant le trafic :

- les radars Doppler, capables de détecter la présence d'un véhicule et de mesurer sa vitesse. Ces radars sont utilisés depuis longtemps, et il en existe de nombreux fournisseurs: SFIM en France, Faronwise, Microsense Systems en Grande Bretagne, Feig Electronic en Allemagne, Microwave Sensors, Peek Traffic aux Etats Unis. L'un de ces produits, de Microwave Sensors, appliqué à la détection des véhicules l'approche d'un carrefour, est évoqué dans (234).
- des radars comportant un traitement de signal plus complexe, et plus coûteux, permettant de mesurer à la fois la distance et la vitesse des véhicules détectés, et de discriminer des véhicules sur de grandes distances. Deux de ces radars sont évoqués dans la bibliographie: le radar

BEATRICES de Thomson, conçu pour la détection d'incidents et de véhicules lents ou arrêtés sur une portée de 1km; ses performances sont assez modestes avec un taux de détection d'incidents de 87% (231). Le radar RTMS de la société canadienne EIS explore 8 tranches sur une longueur de 60 m de chaussée, et permet la mesure des grandeurs fondamentales Q, V, T.O, ainsi que la détection de queues et d'incidents; on trouve dans (232) une indication sur ses performances en matière de comptage, jugées proches de celles des boucles: sur une route à 4 voies le taux d'erreur serait de 0 à 7% selon les voies.

2.3.6 Capteurs de pression

Ces capteurs sont de différents types (217)

- capteurs à céramiques piézo- Tout récemment on a vu apparaître également des capteurs à quartz
- tôles déformables à jauges de contraintes
- cellules de charge (load cells)
- enfin capteurs à fibres optiques encore au stade du développement.

On trouve de nombreux fournisseurs sur le marché: ECM en France, PAT en Allemagne, IRD au Canada, AMP, Traffic 2000 Ltd aux Etats-Unis, ARRB en Australie.

Les articles sur ce sujet rappellent tous les difficultés rencontrées par la mesure en marche du poids des essieux, en raison des erreurs introduites par les oscillations des camions: c'est ainsi que des erreurs allant de 12,6% à -51,68 % sont signalées dans (198). Ces oscillations sont d'autant plus sensibles que la route est en plus mauvais état.

Une solution possible pour neutraliser ces perturbations consiste à disposer plusieurs capteurs à la suite afin de recueillir des données sur une période d'oscillations. Dans (174) il est indiqué qu'un dispositif de 5 plaques sensibles réparties sur une distance de 8m permettait d'obtenir une précision de +/- 0,3 t sur 67 % des cas observés. La référence (259), qui ne s'adresse sans doute pas aux mêmes types de PL, évoque des mesures sur une distance de 30 m.

2.3.7 Capteurs vidéo

Les capteurs vidéo sont ceux qui font l'objet des efforts les plus importants de R&D actuellement. Les premières recherches ont débuté dans les années 70 aux Etats-Unis, sur le concept d'un système WADS « Wide area detection system ». Elles se sont intensifiées à travers le monde dans le courant des années 80, et elles ont abouti à des résultats opérationnels vers le milieu des années 90. On doit probablement compter actuellement plus de 5000 dispositifs en service dans le monde.

L'intérêt des capteurs vidéo est :

- d'être non intrusifs
- de permettre la surveillance de grandes zones, par opposition aux capteurs classiques de type « boucle » qui ne permettent que des mesures ponctuelles
- de pouvoir mesurer des paramètres très variés (voir ci-dessous)
- de se prêter à des applications multiples, allant de la surveillance du trafic à celle de l'état des chaussées (163) ou de l'environnement (conditions météo, incendie en tunnel).

De nombreuses firmes proposent actuellement des systèmes de traitement d'image:

Europe

- Traficon (B), le fournisseur le plus important, avec plus de 2500 produits sur le terrain. Il est représenté en France par SIAT
- Citilog (F) qui industrialise et commercialise des produits conçus à l'INRETS
- Eliop Trafico (E) et son système EVA
- OCT- On Campus technologies (E)

- Microsense Systems (UK)

Etats Unis:

- Odetics: système Vantage, commercialisé par Automatic Signal/Eagle Signal
- ISS- Autoscope, produit conçu à l'Université du Minnesota, et commercialisé par Econolite
- Rockwell: système Trafficam
- Peek: système Videotrack
- Kaman Science Corporation, Nestor, Intelligent Vision Systems ...etc..

Australie:

- Telstra et son dispositif Safe T Cam

Japon:

- Omron
- NEC
- Sumutomo: système IDET 100
- Matsushita Panasonic
- Oki
- Nippondenso
- Hitachi

La littérature ((195),(250) p.ex.) range ces systèmes en 2 grandes catégories suivant le mode de traitement adopté :

- systèmes traitant une ou plusieurs petites portions de l'image, constituées de lignes, ou de rectangles simulant une boucle posée sur la chaussée (systèmes dits « tripwire » ou « tripline »): le traitement porte sur un nombre limité de pixels et demande moins de temps que si l'on traitait la totalité de l'image. Ces systèmes, qui ont été les premiers à apparaître sur le marché, sont moins coûteux que les autres, mais ne fournissent pas beaucoup plus de renseignements que si l'on disposait des boucles réelles sur la chaussée. Leur avantage est qu'avec une caméra il est possible d'émuler plusieurs boucles et de couvrir une chaussée à plusieurs voies. Un inconvénient par rapport aux boucles est que les effets d'ombre ou de masquage peuvent entraîner des erreurs sur la détection des véhicules. Le plus connu et le plus répandu de ces systèmes est le CCATS de Traficon. Le Trafficam de Rockwell et le Vantage d'Odetics entrent également dans cette catégorie.
- systèmes traitant la totalité de l'image, ou du moins toute la surface de la chaussée (« tracking systems »): ces systèmes sont capables de détecter l'ensemble des véhicules se trouvant sur une image et de les suivre d'une image à l'autre, ce qui permet d'obtenir beaucoup plus d'informations qu'avec les capteurs ponctuels classiques. Ils peuvent fournir ainsi les paramètres fondamentaux du trafic, Q, V, T.O., mais également la concentration (ou densité) K que ne fournissent pas les capteurs de type « boucles »; ils peuvent également permettre de suivre la trajectoire des véhicules, de détecter des véhicules lents ou arrêtés, de faire de la DAI, d'observer les mouvements tournants aux carrefours, de classer les véhicules selon leur taille, de surveiller le remplissage de parkings. Ils peuvent servir enfin à la détection des piétons. Les algorithmes utilisés le plus souvent consistent à reconstituer l'image de l'arrière-plan (« background ») et à procéder par différence entre cette image et l'image courante, et/ou par différence d'images successives. Les formes des véhicules sont reconstituées à partir des zones d'intérêt ainsi extraites par un travail sur les contours, par morphologie mathématique, ou par des recherches de primitives.

Les systèmes les plus récents entrent dans cette catégorie: CCIDS de Traficon, Citilog, Autoscope par exemple.

On doit noter que si ces produits permettent des mesures très variées, il n'est généralement pas possible de les obtenir simultanément avec la même caméra: ainsi les mesures des paramètres Q, V imposent que l'on vise plutôt à courte distance, entre 30 et 60 m de la caméra, tandis que la DAI impose que l'on vise jusqu'à 200 ou 300 m avec un angle relativement rasant.

Une variante de ces systèmes consiste à marquer la chaussée avec des dessins comportant des zébrures ou des damiers. Le traitement de l'image s'en trouve simplifié, et l'on peut nettement en améliorer les performances (voir p.ex. (108)). Un tel procédé est cependant difficilement utilisable sur route ou autoroute, mais peut s'envisager sur des zones spécifiques, telles que les péages ou les parkings. Enfin notons que quelques recherches ((84), (138), (146)) sont menées sur l'emploi de caméras en stéréovision. Ce procédé permettrait notamment de s'affranchir plus facilement des ombres. L'auteur de la référence (195) estime que les systèmes du premier type (« tripline ») sont encore actuellement plus robustes et plus fiables que ceux du second type (« tracking »), mais que ceux-ci doivent devenir prépondérants dans le futur.

Les performances indiquées dans la littérature pour ces systèmes sont variables. Elles dépendent bien entendu du mode de traitement adopté, ainsi que de la génération de systèmes concernée, les progrès étant encore rapides dans ce domaine. Elles sont influencées par les conditions d'installation, une implantation trop basse de la caméra comme on en trouve en tunnel, favorisant les perturbations dues au masquage ou aux ombres.

Elles sont également influencées par les conditions météorologiques (pluie, neige, vent), par l'éclairage ou par la présence d'ombres portées, et sont différentes de jour et de nuit: ainsi les phares des voitures se distinguent bien la nuit et permettent une mesure convenable des débits, mais la mesure des vitesses est moins précise que de jour du fait d'une certaine imprécision sur la position de la source lumineuse.

Elles dépendent du site sur lequel la caméra est implantée: autoroute, approche de carrefour urbain, tunnel, etc.

Enfin on doit prendre garde au fait que les chiffres avancés par les constructeurs correspondent souvent à des tests sur des voies d'essai, dans des conditions très maîtrisées, et peuvent être optimistes par rapport aux résultats trouvés dans les situations courantes d'exploitation.

Les critères principaux sur lesquels sont jugés les systèmes sont, suivant le type d'applications pour lesquelles ils sont conçus :

- taux de détection et précision de comptage
- précision sur les mesures de Vitesse
- portée, étendue de la zone surveillée
- critères DAI : taux de détection d'incidents, taux de fausses alarmes, délai de détection
- précision sur les mesures de longueurs de queues
- exactitude de la classification de véhicules

Les valeurs citées pour ces critères se situent dans de larges fourchettes :

précision de comptage: la plupart des chiffres se situent entre 90 et 100%. Celui de 95%, mentionné par l'INRETS (93) et par Traficon (203), (78), représente une moyenne plausible. Notons que des expériences sérieuses, telles celles menées au Minnesota (250) font apparaître des valeurs nettement plus élevées: 98,9 à 99,7%. A l'opposé les expériences menées à Stockholm (269) sur les mêmes produits, si elles ont confirmé les bonnes performances de Traficon (taux d'erreur 2,85%), ont fait apparaître des taux d'erreur plutôt catastrophiques pour d'autres systèmes: -40,6% pour Autoscope, +36,9% pour Videotrack... Ces performances sont un peu moins bonnes en milieu urbain. Elles peuvent être dégradées par des conditions météorologiques défavorables.

précision sur les mesures de vitesse: les taux d'erreur annoncés se situent dans la fourchette 3%-10%.

taux d'occupation : ce n'est pas la mesure pour laquelle le traitement d'image est le mieux adapté, et elle est rarement évoquée. On trouve cependant une valeur de 10% pour le taux d'erreur dans (93)

longueurs de queues: mesurés à des carrefours ou à des péages selon les cas, les taux d'erreur sont de l'ordre de 10% ((10), (19), (93))

DAI: les équipes qui se sont plus particulièrement intéressées à la DAI, Traficon et l'INRETS, ont publié quelques chiffres sur les performances dans ce domaine ((93),(203)):

- taux de détection de véhicules arrêtés: 98% à 100% en tunnel et en situation congestionnée, 90% en trafic fluide- dégradations sensibles en cas de pluie ou de vent fort. Toutefois une étude japonaise (143) conclut à des résultats un peu moins bons, de 83,7%.
- taux de détection d'incident: 95%
- taux de fausses alarmes: 0,025 à 0,25/caméra/jour
- délai de détection: 5 à 10s

Classification des véhicules: cette classification ne porte que sur les caractéristiques géométriques visibles – longueur et largeur – des véhicules, et correspond généralement à 3 ou 4 classes: PL, camionnettes, VL, 2 roues. Un taux d'exactitude de 96 à 97% est évoqué dans (197).

Portées, ou distances couvertes: les portées varient selon le type de mesure recherché. Pour les mesures des caractéristiques du trafic on vise à relativement faible portée, inférieure à 100 m. Pour la DAI ou la détection de véhicules arrêtés on peut couvrir de plus longues distances allant jusqu'à 250 à 350 m. (8), (93). En tunnel la portée est limitée par la hauteur de la caméra à environ 150 m (74).

2.3.8 Lecture de plaques minéralogiques

La lecture automatique de plaques minéralogiques est une technique qui semble se développer et qui a déjà des applications opérationnelles.

Les principales fonctions ou applications intéressées sont:

- les péages automatiques
- la gestion des parkings
- la répression des infractions
- la mesure des temps de trajet, intéressante pour l'information et le guidage routier, et pour les recherches et les évaluations.
- la reconstitution de matrices O/D.

De nombreux constructeurs s'y intéressent, et la référence (284) en recense 24.

Les techniques mises en œuvre relèvent de celles de la reconnaissance optique des caractères (OCR : Optical Characters Recognition) mises en œuvre dans beaucoup d'autres domaines.

Elles se heurtent cependant à des difficultés spécifiques:

- nécessité de localiser la plaque sur un arrière-plan qui peut comporter d'autres inscriptions, notamment sur les véhicules commerciaux
 - grande diversité des plaques
 - conditions météorologiques défavorables et salissures
 - variations de l'éclairage
 - masquage par d'autres véhicules.

Les performances obtenues sont par suite relativement modestes et les taux de reconnaissance correcte de véhicules cités dans la bibliographie se situent dans une fourchette de 70% à 95%. Les résultats les meilleurs sont obtenus dans les voies de péages où la caméra peut être disposée pour viser au mieux les plaques minéralogiques: c'est ainsi que GEVIS cite des taux de reconnaissance de 85 à 95% pour ses systèmes VIS 1000 implantés sur des péages autoroutiers en Autriche ((240), (254)).

2.3.9 Fusion de données

Deux applications principales sont abordées dans la littérature sous cette rubrique:

- reconstitution de données de capteurs manquants ou de capteurs dégradés. L'article coréen (165) présente ainsi divers algorithmes utilisés pour reconstituer des données dans des parties d'un réseau non couvertes par des détecteurs: « evidential reasoning », logique floue, hiérarchie Bayésienne; il présente un peu plus en détail une démarche fondée sur la première de ces méthodes, sans fournir toutefois de résultats. Un article de l'INRETS (204) aborde la question des détecteurs dégradés, et examine des cas où 1,3 ou 9 stations seraient hors service sur une autoroute, et de 0 à 6 stations seraient hors service en urbain. Il montre qu'en utilisant un filtrage de Kalman sur autoroute, et un filtrage statistique en urbain il est possible de reconstituer avec une précision satisfaisante, de l'ordre de 5 à 10% les données manquantes.
- la détermination des temps de trajet par fusion de données « hétérogènes » à la fois de capteurs au sol et de véhicules « traceurs », ou d'autres sources: lecteurs de plaques minéralogiques, bases de données historiques, observations qualitatives sur les niveaux de trafic, informations sur les travaux et obstructions...(205), (207), (294), (18), (104), (115), (356). On trouvera les résumés de ces documents dans les rubriques « documentation générale » et « temps de trajet ».

Les systèmes automatiques de commande du trafic doivent être, malgré tout, supervisés. En effet, un opérateur peut corriger les réglages des différents algorithmes en fonction d'informations événementielles (accidents, manifestations, priorités, etc.). Pour que l'opérateur soit pleinement efficace, il faut en particulier qu'il soit informé au mieux par un système de surveillance qui a aussi vocation d'être utilisé par les systèmes d'information des usagers de la route.

Les centres d'exploitation du trafic en milieu urbain ou périurbain sont équipés, dû moins pour les grandes agglomérations, de systèmes automatiques de surveillance en temps réel de la circulation. Ces systèmes peuvent être plus ou moins sophistiqués. Des récents projets ont donné le jour à des systèmes opérationnels de régulation et de surveillance. A titre d'exemple, on peut citer :

- le système CLAIRE (T. Dallery, 1996), développé par l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS), qui est un système expert pouvant se greffer sur certains systèmes de régulation. Il détecte la saturation, en détermine les causes, les mémorise et propose aux opérateurs des actions anti-saturations (favoriser ou retenir un mouvement donné). A ce jour, CLAIRE est installé à Paris, Rennes, Toulouse et à Londres constitue un niveau supérieur du système de régulation SCOOT.
- le système CONCERT qui est le fruit de recherches et de développements de SIEMENS, propose des outils permettant de réguler, de détecter ainsi que traiter la saturation. Il intègre également des fonctions plus évoluées comme l'estimation des flux de circulation entre les origines et destinations, la recherche des meilleurs itinéraires, de la prédiction des états du trafic à long terme (d'un jour à l'autre, etc.). Toutes ces fonctions peuvent servir aussi bien à la surveillance du trafic qu'à la diffusion d'information.
- le système 5T (Integrated Road transport Environment) développé à Turin en Italie, dans le cadre de projets européens (projet Quartet Plus par exemple) s'appuie sur l'intégration physique et fonctionnelle de 10 systèmes de commande et de surveillance des transport et du trafic. Ces systèmes sont représentés sur la figure ci-après :

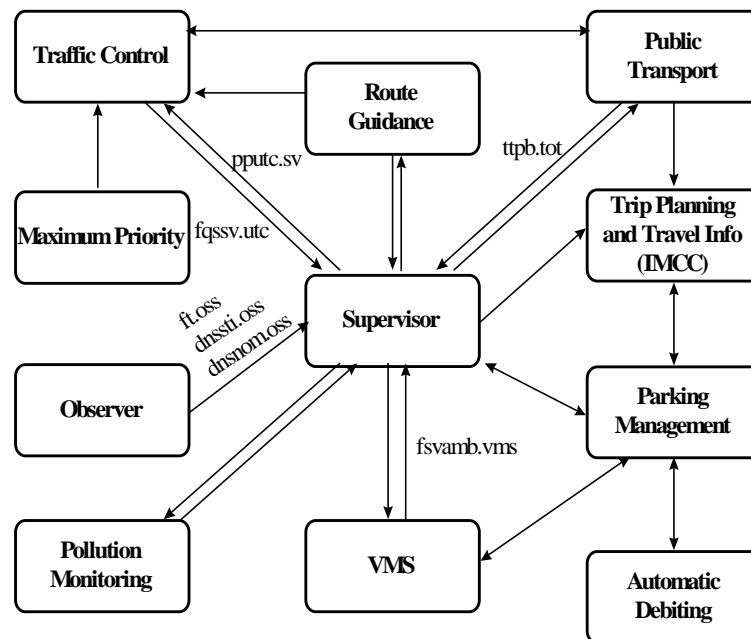


Figure 2.1 : Système 5T

Les systèmes actuels se heurtent à de nombreuses difficultés comme par exemple :

- le peu d'informations dynamiques disponibles (nombre de postes de mesures faible par rapport à taille du réseau routier),
- le fonctionnement des systèmes en mode dégradé (panne du système de recueil de données),
- l'utilisation optimale de données hétérogènes (mesures du trafic, conditions météorologiques, événements, etc.)
- et la contrainte forte imposée par le temps réel.

Face à ces difficultés, certains compromis ont été adoptés pour améliorer artificiellement les résultats des estimations, par exemple en agrégeant temporellement (utilisation de tranche de calcul plus longue), ou en simplifiant le réseau (agrégation ou réduction). De plus, la mise en place des systèmes de surveillance s'appuyant sur les nouvelles techniques de l'informatique, a permis le développement d'un certain nombre de fonctionnalités de base permettant de pallier à des problèmes rencontrés in-situ. C'est le cas de la fonction de fusion de données qui s'articule autour des applications :

- **de filtrage des données** qui reconstitue les données de capteurs manquants ou de capteurs dégradés afin d'assurer un fonctionnement optimal ou quasi-optimal des organes de commandes.

L'article coréen (165) présente ainsi divers algorithmes utilisés pour reconstituer des données dans des parties d'un réseau non couvertes par des détecteurs: « evidential reasoning », logique floue, hiérarchie Bayésienne; il présente un peu plus en détail une démarche fondée sur la première de ces méthodes, sans fournir toutefois de résultats. Un article de l'INRETS (204) aborde la question des détecteurs dégradés, et examine des cas où 1,3 ou 9 stations seraient hors service sur une autoroute, et de 0 à 6 stations seraient hors service en urbain. Il montre qu'en utilisant un filtrage de Kalman sur autoroute, et un filtrage statistique en urbain il est possible de reconstituer avec une précision satisfaisante, de l'ordre de 5 à 10% les données manquantes.

Des algorithmes résultants d'un travail de recherche (356), basés sur des méthodes statistiques des nuées dynamiques et de recherche de modèles macroscopiques liant les valeurs de débits de véhicules, de vitesse, de taux d'occupation, permettent de corriger un nombre important de bruit de mesures des capteurs installés en milieu urbain. Des études ont été menées sur deux réseaux urbains pour des données échantillonnées à 3 et 6 minutes et fournissent des résultats probants.

- et d'**estimation des différents états du trafic** (temps de parcours, niveau de circulation).

Les méthodes de détermination des temps de trajet par fusion de données « hétérogènes » à la fois de capteurs au sol et de véhicules « traceurs », ou d'autres sources (lecteurs de plaques minéralogiques, bases de données historiques, observations qualitatives sur les niveaux de trafic, informations sur les travaux et obstructions) ont été explorées dans le cadre de nombreuses recherches. On trouvera les résumés d'un ensemble de documents (205), (207), (294), (18), (104), (115), (356) dans les rubriques « documentation générale » et « temps de trajet ». Ces documents relatent des méthodes et modèles pouvant être appliqués pour déterminer des valeurs de temps de parcours.

2.3.10 Véhicules « traceurs »

Ce sujet est déjà évoqué dans la rubrique précédente car l'apparition de véhicules équipés de moyens d'identification ou de localisation par GPS incite les exploitants à examiner si la prise en compte de ces véhicules peut compléter utilement le recueil de données provenant d'installations fixes, notamment pour l'évaluation de temps de trajet.

Outre la fusion de données deux autres thèmes sont traités dans la littérature:

- la présentation d'expériences en vraie grandeur: à Copenhague (125) des tests avec 2500 véhicules équipés de badges hyperfréquences ont montré que la collecte de données sur les mouvements de ces véhicules pouvait servir de base à un système d'information sur les retards de la circulation, avec des résultats corrects 64% du temps. A Berlin (112), (113), des expériences de mesure de temps de trajet ont été menées avec 650 véhicules - soit 0,05% du parc automobile- équipés du système ALI-SCOUT. Ces expériences ont montré que l'on obtenait ainsi des mesures sur 36% seulement des chaînons du réseau en un jour, et qu'il fallait par conséquent associer ces mesures avec celles d'autres capteurs. En Norvège (275), où 400 000 véhicules - soit 1/3 du parc- sont équipés de badges, des comparaisons ont été faites entre différentes méthodes d'évaluation des temps de trajet, et ont montré qu'on obtenait avec ces véhicules des résultats meilleurs qu'avec la méthode fondée sur des mesures de vitesse par tronçon. A Houston enfin (225) une expérience à relativement grande échelle est prévue et 7000 véhicules devaient être équipés de badges en fin 95.
- la détermination du pourcentage minimal de véhicules à équiper pour obtenir une connaissance suffisante du trafic: une étude hollandaise (182) a montré que cet objectif pouvait être atteint à l'échelle des Pays-Bas avec 100 000 véhicules équipés, soit 2% du parc; en fait ce sont les problèmes à caractère organisationnel et juridique qui sont les plus difficiles à résoudre, et un test avec 60 véhicules équipés (axis, véhicules de location ou de livraison) est prévu à Rotterdam pour étudier ces problèmes. Une étude coréenne (114) présente un modèle mathématique permettant de définir le nombre optimal de véhicules à équiper pour fournir une information sur le trafic en temps réel. Une autre étude (189) a montré qu'il est possible de réaliser un système de DAI fondé sur des véhicules « traceurs », et qu'avec un taux d'équipement de 1 pour 1000 on peut arriver à des taux de détection de 70 à 90%. Ce sujet est également évoqué dans (289) où il est indiqué qu'avec 1/25 à 1/50 -voire 1/100- du parc équipé on pouvait se faire une bonne idée de la situation du trafic. La référence (354) évoque des taux d'équipement de 1 à 5% selon la durée de la période pour laquelle on procède à des estimations.

2.3.11 La « chaîne » du recueil de données

Nous avons moins approfondi les aspects relatifs aux transmissions et au traitement des données que celui relatif au recueil proprement dit pour les raisons suivantes:

- en premier lieu ces questions de transmissions relèvent davantage du secteur des télécommunications que de celui du trafic, et le rôle de l'ingénieur de trafic est plutôt de choisir entre les possibilités qui lui sont offertes que de participer aux développements dans ce domaine
- l'expérience semble montrer que des solutions existent pour couvrir l'essentiel des besoins du recueil de données en matière de transmissions

- probablement pour ces deux raisons ce thème est relativement peu évoqué dans la littérature spécialisée dans le trafic. Nous avons surtout trouvé des références sur ce sujet dans la revue TTI où beaucoup de constructeurs et consultants s'expriment.
- enfin ce thème est très lié aux questions relatives à l'architecture des systèmes, qu'il n'était pas possible de traiter dans le cadre de la présente étude.

Les principales questions qui se posent lors du choix d'une configuration pour les transmissions et le traitement des données sont:

- traitement décentralisé ou centralisé?
- déclenchement du recueil par scrutation à partir du PC (solution maître/esclave) ou formules plus décentralisées?
- mode d'acquisition ou de location du support de transmission
- possibilité de partager la capacité du support avec d'autres services ou opérateurs, publics ou privés
- réseau en étoile ou bus ?
- choix des protocoles de communication
- comment assurer la compatibilité avec les équipements existants?
- traitement des situations dégradées
- choix du support physique: câble, fibre optique, radio.

Différents exemples traités dans la littérature montrent que des réponses très différentes peuvent être données à ces questions selon le site et l'exploitant.

2.3.11.1 Traitement centralisé ou décentralisé

Il existe en fait toujours une certaine centralisation dans tous les systèmes de recueil de données, matérialisée par l'existence d'un PC. Cependant les performances demandées au réseau de transmission peuvent beaucoup varier selon que l'on envoie au PC des données brutes, ou des données déjà traitées et compressées au niveau du terrain.

Un exemple de système très centralisé est SIRIUS-Est dans lequel les signaux élémentaires (« créneaux ») sont transmis jusqu'au PC en suivant un chemin complexe comportant une conversion analogique/numérique, des multiplexages successifs, puis, à l'arrivée des démultiplexages et une conversion numérique/analogique.

L'utilisation de stations SIREDO sur les autoroutes constitue un exemple de décentralisation, au moins partielle, du recueil, ces stations n'envoyant pas au PC des données brutes, mais des moyennes temporelles sur des périodes que l'on peut fixer au choix.

Dans les réseaux urbains on retrouve ces mêmes distinctions : dans les systèmes de régulation avec plans fixes, les plans sont choisis par le PC soit en fonction de l'heure, soit à partir de données de trafic recueillies sur les axes principaux du réseau (en appliquant par exemple la méthode du vecteur). Les données des capteurs peuvent arriver directement au PC ou passer par les armoires de contrôle des carrefours qui peuvent soit servir de simples relais, soit assurer un pré-traitement.

Dans les systèmes adaptatifs les données des capteurs de microrégulation sont utilisées directement par les armoires de carrefour, ce qui n'exclut pas leur envoi au PC.

2.3.11.2 Déclenchement du recueil centralisé ou décentralisé

Dans les systèmes les plus centralisés le recueil se fait par scrutation périodique des capteurs ou des stations intermédiaires qui n'envoient leurs données que lorsqu'elles sont interrogées.

Ce mode de recueil est relativement gourmand en capacité de transmission et peut également être source de retards dans la détection d'un événement au PC lorsque le nombre d'équipements à scruter est grand..

La possibilité de déclencher l'envoi de données sur initiative des équipements de terrain sur détection d'anomalie, mérite d'être considérée.

2.3.11.3 Mode d'acquisition ou de location du support de transmission

Cette question fait l'objet de beaucoup de discussions, surtout à une époque où l'offre de services de transmission va en croissant.

Le premier choix qui peut se poser porte entre la réalisation de l'ensemble de son système de transmission par l'exploitant qui en est entièrement propriétaire, et la location de lignes déjà posées : c'est la question du partage de capacités également évoquée au chapitre suivant.

Le second choix auquel peut être confronté l'exploitant consiste à être client d'un fournisseur de services de transmissions et à payer au prorata des communications. Les arguments en faveur d'une telle solution sont :

- pas d'investissement initial
- pas de soucis de maintenance
- relatives facilités et moindres coûts pour faire évoluer le réseau de transmission en cas d'erreur de dimensionnement initiale, ou en cas d'évolution du système
- possibilité, sous réserve de ne pas s'engager par des contrats trop longs, de bénéficier, sans avoir à investir, des progrès des techniques de transmission et éventuellement des baisses de coût pouvant en résulter.
- cette solution n'exclut pas des approches hybrides combinant la location pour certaines parties du réseau et l'investissement pour d'autres.

Les inconvénients en sont :

- le coût élevé des communications pour des systèmes dans lesquels le volume de données échangées à chaque appel est relativement faible: cependant avec le développement des communications numériques les systèmes de tarification devraient évoluer, et des formules de tarification fonctions du volume de données transmises devraient voir le jour
- la crainte des exploitants vis-à-vis du risque de ne pas maîtriser la chaîne de transmission et des risques de retards, ou de pertes d'informations. En pratique les réseaux de télécommunications actuels sont suffisamment fiables pour ne pas justifier de telles craintes, surtout dans un domaine où les données échangées n'ont pas un véritable caractère de données de sécurité.
- le fait que certaines zones isolées d'un réseau routier ou autoroutier peuvent se trouver loin du réseau de communication: cela entraîne évidemment des coûts supplémentaires, que le raccordement de l'unité locale intéressée soit effectué par l'opérateur du réseau de télécommunications ou par celui du réseau routier. On peut noter que ces coûts existent également dans le cas où ce dernier est propriétaire de son réseau de télécommunications.

L'exemple cité dans la référence montre en tous cas que cette question mérite d'être posée à l'occasion de chaque nouveau projet, et que le coût d'une étude préliminaire peut être largement couvert par les économies réalisées grâce au choix de la solution optimale.

2.3.11.4 Partage de capacité

La multiplication des opérateurs et services dans le domaine des télécommunications est très favorable à des recherches de collaborations en matière d'installations de réseaux, que ce soit dans le domaine urbain ou routier ou autoroutier.

La référence (384) cite le cas où un accord entre un exploitant, l'Etat de New York, et un fournisseur de télécommunications a permis la réalisation gratuite pour l'exploitant du réseau de transmission.

2.3.11.5 Réseau en étoile ou bus

Le choix de la configuration du réseau de transmission dépend de celle du réseau routier et surtout de sa taille. Pour les petits réseaux on utilise souvent une solution en étoile. De même les grands réseaux sont souvent divisés en zones équipées de concentrateurs reliés en étoile aux équipements de terrain.

Le développement des communications numériques fait cependant de plus en plus émerger les configurations en bus, et beaucoup de systèmes sont conçus autour de bus en anneaux dont l'intérêt est de continuer à fonctionner après une panne.

2.3.11.6 Choix du protocole de transmission

On note dans la littérature une tendance à généraliser l'utilisation de protocoles standards largement répandus tels que le protocole Internet TCP/IP.

2.3.11.7 Traitement des situations dégradées

La première défense contre une dégradation du réseau de transmission est de prévoir des redondances: c'est la raison pour laquelle beaucoup d'installations s'organisent autour de bus en anneau permettant le passage des données dans un sens ou dans l'autre, et tolérants à une défaillance du réseau.

La seconde défense consiste à prévoir un traitement de secours au niveau du terrain permettant de faire fonctionner le système dans des conditions acceptables sans l'intervention du PC : c'est la notion de « graceful degradation » qui a été adoptée par exemple dans le système MCSS hollandais.

2.3.11.8 Choix du support physique

Beaucoup d'installations existantes mettent en œuvre des transmissions par câbles de type téléphonique. C'est la solution la moins coûteuse dans les configurations en étoile où chaque information est véhiculée soit directement du terrain, soit en passant par une armoire relais, sur une paire téléphonique jusqu'au PC. Les débits transmis sont généralement faibles et n'exigent pas de support de grande capacité. On peut noter que les méthodes modernes de transmission permettent de faire passer sur des paires téléphoniques des débits de plus en plus élevés et que les techniques xSDL peuvent atteindre des débits de plusieurs Mbits/s.

Ces transmissions sur fil de cuivre étaient souvent complétées par des lignes à plus gros débit sur câbles coaxiaux permettant le multiplexage de plusieurs lignes élémentaires, ou la transmission de données d'équipements exigeant de grandes bandes passantes telles que les caméras vidéo. Ces câbles ont cependant tendance à laisser la place aux fibres optiques.

Ces dernières années les transmissions par fibre optique se sont en effet beaucoup développées. Elles ont l'avantage d'être légères, fiables et d'être insensibles aux perturbations électromagnétiques. Elles se prêtent particulièrement bien:

- à la réalisation de bus concentrant et multiplexant des données arrivant de multiples sources
- à la transmission des images TV.

Les liaisons hertziennes sont peu utilisées, compte tenu de la difficulté d'obtenir des autorisations d'utilisation des P&T pour ce type de service de point fixe à point fixe. On commence cependant à voir quelques réalisations mettant en œuvre ce type de liaison en France et à l'étranger:

- utilisation d'un réseau à ressources partagées 3RP sur A1
- utilisation, déjà ancienne, par le CRICR de Marseille de liaisons radio dans la bande 150 MHz et de faisceaux hertziens dans la bande 400 MHz pour relier certaines de ses stations au poste central.
- utilisation de faisceaux hertziens en hyperfréquences à Las Vegas
- utilisation de liaisons radio en étalement de spectre entre un capteur et une unité locale (cf les capteurs Nu-Metrics), ou entre unités locales et concentrateurs.

2.4 Analyse des Fonctions impliquant du recueil de données

Les paragraphes précédents ont déjà beaucoup traité des fonctions mettant en oeuvre les technologies de capteurs et les variables de trafic évoquées, telles par exemple que la régulation d'autoroute, l'information/guidage ou la répression d'infractions. Nous avons regroupé un peu arbitrairement dans cette dernière partie les articles traitant du recueil de données, mais où l'aspect fonctionnel était un peu plus particulièrement mis en avant.

2.4.1 Régulation

Nous n'avons dépouillé qu'un nombre modeste de références sur la régulation de trafic, et ne nous sommes intéressés qu'aux références faisant explicitement allusion au recueil de données, sachant qu'un examen plus exhaustif de toute la littérature sur la régulation aurait pris un temps considérable.

Les quelques articles que nous avons dépouillés font état de quelques approches innovatrices :

- prise en compte de la classe de véhicules (PL ou VL) dans la commande adaptative d'un carrefour (179)
- utilisation du traitement d'images et de la mesure des longueurs de queues pour la commande de carrefours (193)
- intérêt de procéder à une prédiction à court terme du trafic sur les données recueillies en temps réel pour régler les commandes sur des données aussi actualisées que possible
- utilisation de capteurs IR passifs pour la détection des véhicules et la commande adaptative d'un carrefour (233).

2.4.2 Gestion de tunnels

Ce thème revient dans un certain nombre de références. On en retiendra le souci d'y détecter les conditions de trafic et les incidents à l'aide de réseaux de capteurs à boucles ou vidéo particulièrement denses (192), (216), ainsi que celui de détecter les incendies, par exemple à l'aide d'un capteur à fibre optique (145).

On trouvera d'autres évocations de ce thème dans le chapitre consacré à la DAI.

2.4.3 Lutte contre les infractions

On trouve de nombreuses références sur ce thème. Les principales infractions visées sont:

- le dépassement des vitesses limites, pour lesquels divers moyens peuvent être mis en oeuvre :
 - ♦ En Corée (156) il est prévu 500 stations utilisant des capteurs à boucles et une caméra avec lecture automatique de plaques en 1999. Ce chiffre passerait à 5000 en 2003.
 - ♦ Aux Pays-Bas (157), (158), un système a été expérimenté sur l'autoroute A2, dans lequel la vitesse est mesurée par 3 caméras régulièrement espacées et associées à un dispositif de lecture automatique de plaques centralisé, complété par une lecture visuelle. Les performances imposées sont une précision de 1% sur la mesure de vitesse, et un taux de reconnaissance de 77,8% pour la lecture automatique des plaques. L'expérimentation va jusqu'à la validation du processus de poursuite par la Justice à partir de ce type de données.
 - ♦ Un autre système du même genre (221) mettant en oeuvre 2 caméras noir et blanc avec lecture de plaques formant une base de mesure de vitesse et une caméra couleur pour prendre une vue du contrevenant, a été expérimenté sur une zone de travaux de la M1 en Grande Bretagne.
 - ♦ Marom en Israël (243) propose un système dans lequel la base de mesure de vitesse est constituée de 2 faisceaux laser associés à des réflecteurs sur la chaussée.
- les intervalles inter-véhiculaires trop courts: ce même système Marom peut être utilisé pour ce type d'infraction

- circulation illicite dans des voies réservées aux autobus: des expériences sont menées en Grande Bretagne sur ce thème avec des équipements vidéo développés par Golden River, et un système est en service aux approches d'Heathrow (155), (270). Deux possibilités sont étudiées: caméra à bord des autobus ou caméra au sol. Une particularité de ces systèmes est de pouvoir être « réactifs », c'est-à-dire de pouvoir commander des PMV en bout de voie réservée sur lesquels s'affichent les numéros des véhicules contrevenants.
- franchissement de feux rouges: de nombreux fabricants commercialisent des équipements pour poursuivre ce type d'infraction, ou des infractions de vitesse: Traffipax (All.), Multanova (Suisse), Truvelo (Afrique du Sud), Redflex (Australie).
- lutte contre le vandalisme: certaines autoroutes italiennes s'inquiètent des actes de malveillance, tels que jets de pierres à partir des passerelles surplombant les autoroutes (154), (170). Deux dispositifs de détection de présences ou de mouvements suspects sur ces passerelles ont été étudiés, l'un fondé sur des capteurs IR passifs, l'autre sur l'analyse d'image.

On trouvera enfin d'autres références sur ces différents thèmes au chapitre consacré à la lecture de plaques minéralogiques.

2.4.4 Gestion de Péages

La gestion des péages met en général en œuvre des dispositifs de détection et de classification des véhicules en vue de lutter contre les fraudes ayant pour origine les conducteurs ou les agents des postes de péage. Les performances exigées par les exploitants sont généralement élevées; par exemple la référence (261) évoque un taux de détection de 99,95% et un taux de classification correcte de 99,9%. Même si les conditions de mesure dans une voie de péage sont plus favorables que sur une section courante d'autoroute, ces exigences de précision imposent des équipements particuliers.

Divers systèmes sont évoqués dans la littérature :

- barrières de photo-détecteurs (253)
- laser à impulsions et à balayage permettant de reconstituer le profil d'un véhicule (224)
- double faisceau de lasers pulsés (261)
- configuration de boucles IDRIS à haute précision (265) . Cette configuration peut aussi être mise en œuvre en pleine voie pour la réalisation de comptages précis permettant d'ajuster les contributions de l'Etat au financement d'autoroutes privées (« shadow tolling ») (239).

Souvent les installations de détection sont complétées par des caméras associées à une lecture automatique de plaques (153), (253), (269).

2.4.5 Gestion de parkings

On trouve quelques références sur ce sujet dans la bibliographie. 2 préoccupations sont évoquées:

- la lutte contre la fraude ou le vol de véhicules: l'article (227) traite par exemple d'un système de lecture de plaques qui permet à un caissier de bien associer un numéro de ticket avec la photo du véhicule concerné
- la détermination de l'état d'occupation de parkings, ou d'aires de repos autoroutières , par traitement d'images (87), (94), (135).

2.4.6 Protection des passages à niveaux

Ce thème est évoqué dans un article américain, qui présente quelques dispositifs, notamment radars, pour la détection d'objets faisant obstacle sur un passage à niveau.

2.4.7 Autoroute automatique

Un article japonais (176) souligne la nécessité de disposer de capteurs au sol pour surveiller les zones à faible visibilité, telles que les courbes ou les sommets de côtes, dans des systèmes d'autoroute automatique. Une analyse des différents procédés utilisables pour assurer cette surveillance montre que le capteur le mieux approprié est la caméra avec traitement d'image, mais il sera sans doute indispensable d'associer plusieurs capteurs pour garantir une bonne détection des obstacles.

2.4.8 Etudes et recherches

Les capteurs ne sont pas utilisés seulement pour l'exploitation, mais ils peuvent l'être pour les besoins des études et recherches. On en trouve quelques exemples dans la littérature:

- calibration d'un modèle de simulation d'autoroute urbaine à partir de mesures de vitesse et de débit par boucles et caméras, ainsi qu'à partir de photos aériennes (161). L'utilisation de ce type de photos est également évoquée dans (82).
- observation à l'aide de caméras du comportement des automobilistes en matière de changements de voies (196).

2.5 Synthèse de la bibliographie

En premier lieu, même si on tient compte du fait que les recherches de références ont été plus sommaires pour les périodes antérieures à 1990 que pour ces 10 dernières années, il apparaît que la littérature sur le recueil de données s'est beaucoup développée sur la période récente.

Ceci tient sans doute à la multiplication des Congrès nationaux et internationaux sur la route intelligente, qui favorise une certaine floraison, voire une redondance, des publications dans ce domaine. De même la revue *Traffic Technology International (TTI)* a ouvert aux constructeurs, exploitants et bureaux d'étude à partir de 1994 une tribune qui n'existait pas auparavant. Mais ceci tient aussi sûrement au fait que les recherches sur ce thème ont reçu de fortes incitations depuis une dizaine d'années grâce aux grands programmes nationaux et internationaux tels qu'ITS America, DRIVE et les différents programmes japonais.

On note d'ailleurs que les publications sont beaucoup plus abondantes du côté américain et asiatique que du côté européen: ceci peut s'expliquer par le fait qu'un programme comme DRIVE, après s'être intéressé à la recherche technique dans sa phase DRIVE I, qui a permis notamment des développements intéressants en traitement d'image, avec INVAID, s'est ensuite intéressé essentiellement à des démonstrations.

Aux Etats-Unis de nombreux projets soutenus par la FHWA comportent des essais systématiques de capteurs destinés à en évaluer les performances.

On constate également que les Universités semblent beaucoup plus impliquées aux Etats-Unis et en Asie qu'en Europe, et particulièrement en France.

Sur le plan des capteurs, la bibliographie fait apparaître un intérêt de plus en plus soutenu pour les dispositifs dits « non intrusifs » ou « aériens » et en particulier pour la vidéo, aux dépens des boucles inductives.

Les raisons invoquées sont :

- les difficultés de pose des boucles, notamment quand on opère sur des routes très fréquentées, et le coût de cette pose
- leur relative fragilité, notamment en cas de travaux sur la chaussée
- les difficultés et coûts de maintenance.

Certains auteurs font valoir que sur 10 ans le coût (« lifecycle cost ») d'un capteur à boucle est plus élevé que celui de la plupart des capteurs aériens : le document (71) affirme par exemple que

L'utilisation de ces derniers capteurs à la place de boucles sur l'ensembles des systèmes de commande de feux en Grande-Bretagne entraînerait une économie de 35M£ sur 10 ans.

C'est ce qui explique que la part de ces derniers capteurs va en augmentant, et qu'elle pourrait représenter selon (2) près du tiers des dépenses consacrées aux capteurs au cours des prochaines années.

Les boucles ont cependant leurs avantages :

- leur installation ne nécessite pas de poteaux ou portiques qui n'existent pas toujours à l'endroit où l'on souhaite effectuer des mesures, et qui peuvent augmenter significativement le coût d'emploi des capteurs aériens
- elles sont moins sensibles aux conditions météorologiques que les capteurs aériens
- enfin la référence (230) souligne qu'aucun capteur aérien ne peut fournir toutes les données fournies par des boucles et avec la même précision. On trouve une constatation semblable dans (2), où il est fait remarquer que le besoin de classer les véhicules se développe, et que les modes de classification usuels font appel au nombre et à la configuration des essieux, que seuls des capteurs au sol, incluant des boucles, permettent d'observer commodément.

Les boucles inductives sont par conséquent loin d'être dépassées; on les trouve largement présentes dans la plupart des grands projets de surveillance et de régulation, tel par exemple le projet Motorciti de Detroit cité dans (266) qui comportera 2 360 boucles pour 169 caméras; elles font par ailleurs encore l'objet de travaux de recherche et développement comme on le voit au chapitre 2.3.1 ci-dessous.

Sur le plan des mesures, les opérateurs sont toujours intéressés par les variables fondamentales Q, V, TO qui permettent de caractériser le niveau de trafic sur une chaussée. Cependant les mesures qui tiennent la place la plus importante dans la littérature sont relatives:

- aux temps de trajet, sans doute sous l'effet du développement des systèmes d'information routière et de guidage
- à la DAI qui couvre les accidents et incidents et également les véhicules lents ou arrêtés.
- la détection des conditions météorologiques

Sur le plan des fonctions, si la régulation de trafic et l'information routière sont souvent évoquées, l'intérêt se porte également sur un certain nombre d'autres applications:

- la gestion des péages: avec le développement des péages automatiques apparaît le besoin de surveiller rigoureusement le trafic au niveau de ces péages, de détecter les classes de véhicules qui y transitent, et de détecter et identifier les contrevenants
- la répression des infractions semble tenir une place de plus en plus importante dans les préoccupations des administrations et des exploitants, et l'offre se développe également considérablement dans ce domaine.

3 Analyse des variables intervenant dans l'exploitation du trafic

3.1 Les classes de mesures intéressant le trafic

On trouvera ci-dessous une liste des différentes mesures intéressant le trafic, établie à partir de l'expérience des intervenants dans l'étude, et complétée avec l'aide de la bibliographie.

- 1- Caractéristiques fondamentales du trafic
débit (Q), vitesse (V), taux d'occupation (TO), concentration (K)
- 2- Grandeurs complémentaires ou dérivées:
présence/passage de véhicules ; longueurs de queues ; niveaux de trafic- congestion ; temps de parcours ; couples origines/destinations (O/D)
- 3- Evénements ayant une incidence sur le trafic
Accidents, incidents, bouchons ; Mouvements tournants ; Changements de voie
- 4- Caractéristiques des véhicules
Poids total, poids à l'essieu ; longueur, hauteur ; classification par type ; identification ; taux d'occupation (nombre de passagers)
- 5- Détection d'objets autres que les véhicules particuliers (VP) ou poids lourds (PL)
2 roues ; piétons ; objets divers
- 6- Surveillance des infractions ou de défauts des véhicules
vitesse ; franchissement de feux ou stops ; stationnement interdit ; ligne jaune ; contre sens ; poids à l'essieu ; intervalles inter véhiculaires ; pneus dégonflés, défaillances d'éclairage
- 7- Détection des conditions météorologiques
brouillard ; verglas ; vent ; pluie ; neige
- 8- Grandeurs liées à l'environnement
pollution ; bruit

3.2 Fiche « MESURE »

Dans le document en annexe figurent des fiches établies sur la plupart de ces mesures, faisant apparaître les rubriques suivantes :

- Objectifs
- Fonctions intéressées
- Performances attendues
- Capteurs ou principes physiques utilisables
- Chaînes de traitement associées
- Performances obtenues
- Avantages et inconvénients de chaque capteur- problèmes rencontrés
- Aspects économiques
- Besoins de développement

Dans les fiches, on tient compte des zones spécifiques à considérer.

3.3 *Besoins ressortant des fiches « mesure »*

Le tableau ci-après présente la correspondance entre les différentes mesures évoquées au chapitre précédent et les types de capteurs susceptibles d'être employés pour ces mesures.

La signification des lettres figurant dans les cases est la suivante:

a : capteur bien adapté à la mesure

b : le capteur peut éventuellement servir à la mesure, mais ses performances ne sont pas optimales

Ce tableau fait apparaître qu'il n'existe pas de lacune importante dans les moyens de mesure et de détection dont on dispose par rapport aux besoins potentiels.

Il fait apparaître également la polyvalence des capteurs vidéo, qui peuvent assurer à la fois une détection de type « zonal » ou « ponctuel », et qui peuvent servir aussi bien à la mesure de grandeurs qu'à la détection d'événements. Cette polyvalence explique le succès croissant que rencontrent ces capteurs depuis leur entrée sur le marché.

Quelques besoins non couverts ou mal couverts apparaissent cependant; c'est le cas des mesures suivantes :

- pesage dynamique: les précisions obtenues sont insuffisantes pour répondre directement aux nécessités de la répression des infractions sur les charges à l'essieu. Les dispositifs de pesage dynamique ne peuvent pour l'instant servir qu'à alerter les services de contrôle, et doivent être complétés par une opération de pesage statique. Il existe cependant des contraintes physiques qui font qu'on ne peut espérer obtenir une bonne précision en dynamique que sur des chaussées très planes et en très bon état.
- détection des 2 roues: ce sujet a été peu étudié jusqu'à présent. L'extension des voies cyclables pourrait conduire à envisager des phases spécifiques aux feux pour les 2 roues, et pourrait susciter le besoin de détecteurs spécifiques. Des solutions existent sans doute, en utilisant des capteurs micro-ondes, à infrarouge, ou à ultrasons, ainsi que la vidéo.
- mesure du taux d'occupation des véhicules: ce sujet difficile préoccupe les Américains, compte tenu du nombre de voies réservées aux véhicules à haut taux d'occupation (« HOV lanes ») existant aux Etats-Unis. Il ne semble pas avoir beaucoup préoccupé les Européens jusqu'à présent.


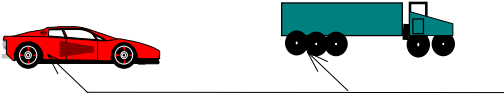


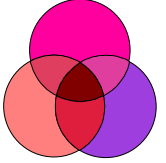
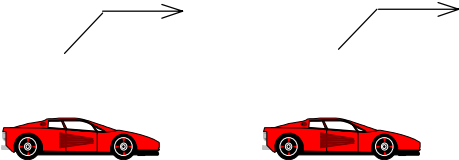
a : capteur bien adapté à la mesure

b : le capteur peut éventuellement servir à la mesure, mais ses performances ne sont pas optimales

	boucles	tube pneum.	magnétom.	acou. passif	US pulsé	IR passif	IR actif	radar Doppl.	radar	video	lecture plaq.	piézo	bascule dyn.	fibres opt.
Q	a	a	a		a		a	b	a	a		a		a
V	a	a	a		a		a	a	a	a		a		a
T.O	a		a		a		a		b	b	a			
intervalle	a	b	a		a		a			a				
densité K									a	a				
prés./pass	a	b	a		a		a	a	a	a				
Lqueues									a	a				
niveau traf.	a				a		a		a	a				
tps trajet	a								a	a	a			
O/D											a			
DAI	b		b		b		b	b	a	a	b			
DAB	b		b		b		b	b	a	a				
mvts tourn.	b				b					a				
chgt voie										a				
poids												a	a	a
gabarit					a		a							
classif.	b				b		a			a		a	a	a
identif.											a			
nb. passag														
dét. 2R								a	a	a				
dét. piéton								a	a	a				
dét. objet									a	a				
infrac. feu	a							a	a	a				
infrac. stop	b									b				
infrac.sens	b							a	a	a				
infrac.ligne	b									b				

4 Grandes classes et principes physiques des capteurs

Qu'il s'agisse de déterminer des caractéristiques individuelles de véhicules ou d'analyser le trafic et son environnement, le recueil de données s'appuie toujours, comme cela a été indiqué au chapitre 1, sur un capteur ou un groupement de capteurs dont le rôle est de détecter la variation d'un paramètre physique liée à la présence ou au passage de véhicules dans son champ d'action. Cette variation est convertie en un signal électrique dans un détecteur associé au capteur.

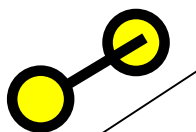
		<p>Caractéristiques des véhicules en un point, Métrologie des trafics : dimension, Poids, type de véhicule</p>
		<p>Evaluation de la situation d'un tronçon ou d'une zone, détection de perturbations Interprétation plus qualitative</p>
		<p>Données fournies par les véhicules eux-mêmes Accès à l'information " temps de parcours " Objectif d'aide au déplacement, Fusion de données</p>

Il existe diverses classifications faisant intervenir ces paramètres physiques dans lesquelles les capteurs sont parfois rangés pour la commodité de leur présentation ou par application :

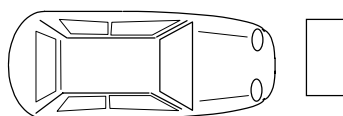
- capteurs intrusifs ou non intrusifs, selon que leur pose nécessite ou non une action ou une intrusion dans la chaussée, les capteurs non intrusifs étant quelquefois qualifiés d'« aériens ».
- capteurs « ponctuels » ou « zonaux », selon l'étendue de la zone de la chaussée qui est observée.

Capteurs au sol

Capteur d'essieu

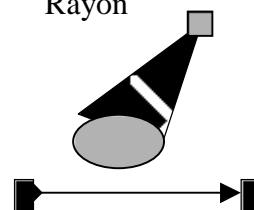


Capteur de véhicule



Capteurs aériens

- ◆ Faisceau
- ◆→ Rayon



Les frontières entre ces classes sont cependant relativement floues, et nous avons choisi de présenter ci-dessous les différents types de capteurs dans un ordre relativement arbitraire, en mettant en avant le principal phénomène physique mis en œuvre. Nous décrivons d'abord ce phénomène, puis nous indiquons dans quelles classes se rangent les capteurs concernés, et le type de variables qu'ils sont susceptibles de mesurer.

Notons qu'une autre classification, fondée sur la distinction entre « véhicules passifs » et « véhicules actifs », commence à apparaître avec le développement des liaisons sol-véhicules. Nous évoquerons rapidement à la fin de ce chapitre cette classe « véhicules actifs » qui se situe à la limite du domaine des capteurs de trafic classiques.

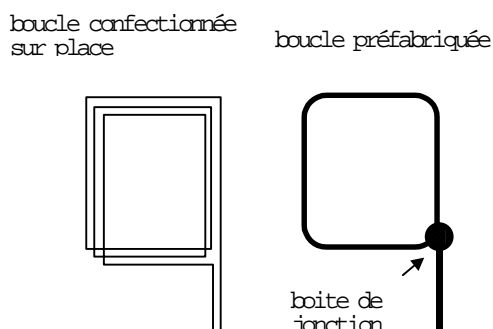
Les phénomènes physiques que nous allons considérer, et sur lesquels s'appuient tous les capteurs dont nous avons pu avoir connaissance, sont les suivants:

- capteurs inductifs- boucles
- magnétomètres
- capteurs micro-ondes
 - radars Doppler
 - radars avec mesure de distance
 - capteurs micro-ondes passifs
- infrarouge passif/actif
- capteurs acoustiques passifs/ actifs (ultrasons)
- capteurs de pression
 - capteurs pneumatiques
 - capteurs piézo-électriques
 - capteurs résistifs
 - capteurs capacitifs
 - capteurs à jauges de contrainte
 - fibres optiques
- vidéo
- sismique
- capteurs météo: vent, visibilité, température, anémomètres, humidité, etc.
- capteurs environnementaux: CO, CO2, NO, bruit
- véhicules actifs

4.1 Capteurs inductifs - Boucles électromagnétiques

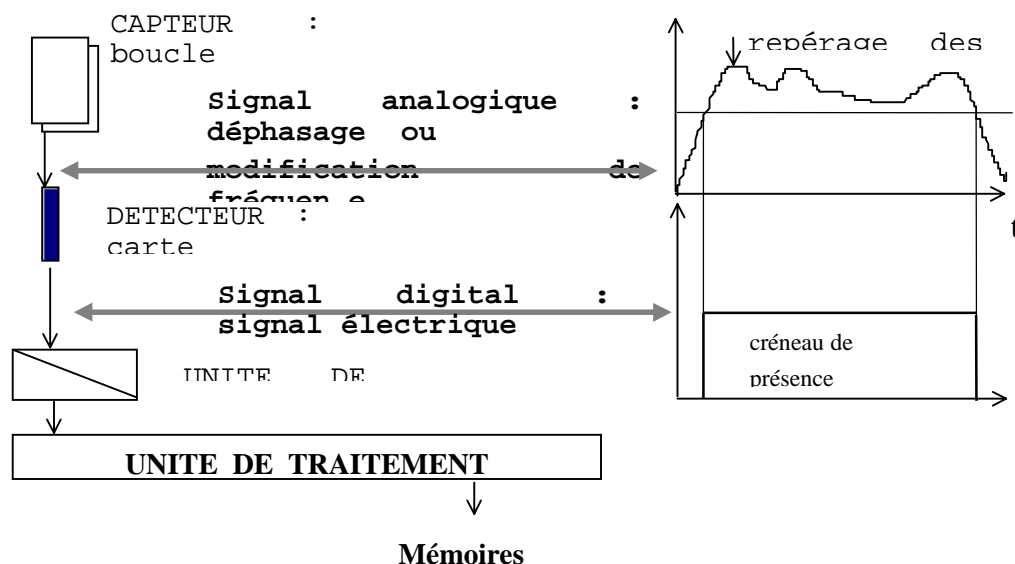
C'est aujourd'hui le dispositif de mesure de paramètres de circulation le plus répandu dans de nombreux pays, tant en ville qu'en rase campagne.

Il met en œuvre une boucle inductive ou self constituée de spires de fils de cuivre isolés de section de section $\geq 1,5 \text{ mm}^2$, noyée dans le revêtement de la chaussée, et alimentée par un courant alternatif à une fréquence comprise généralement entre 10 et 150 kHz.



La boucle peut être préfabriquée ou confectionnée sur place, et le nombre de spires est généralement compris entre 3 et 5.

Quand un véhicule passe au-dessus, le champ électromagnétique créé par la boucle engendre des courants de Foucault dans la masse métallique du véhicule. Ces courants engendrent à leur tour un champ qui s'oppose au champ qui les a suscités (loi de Lenz), et qui se traduit par une diminution de la self de la boucle. Celle-ci, de l'ordre de 5%, peut-être détectée aux bornes d'un circuit électronique dont la self n'est qu'un élément par des variations, de tension, de fréquence ou de phase. Le signal est généralement mis en forme sous forme d'un créneau de tension dont la durée est sensiblement égale au temps de passage du véhicule sur le capteur. (voir schéma)



Ce capteur, de type intrusif et ponctuel, sert essentiellement à détecter la présence ou le passage d'un véhicule dans sa zone d'action. A partir de cette information il est possible de déduire différents paramètres du trafic:

- débit
- taux d'occupation
- vitesse (à l'aide de 2 boucles successives).

Des recherches en laboratoire ont montré qu'en se situant au niveau du signal brut du capteur il était possible de tirer davantage d'informations de la forme et de l'intensité de ce signal, par exemple une information sur la catégorie -PL ou VL- du véhicule. De même en utilisant une longue boucle de plusieurs dizaines de mètres des expériences ont montré qu'il était possible d'évaluer approximativement le nombre de véhicules se trouvant sur la boucle, et par suite de mesurer une longueur de queue. Cependant ces recherches n'ont pas abouti à des produits industrialisés. Par ailleurs, les coûts de génie civil étaient relativement importants.

Un procédé récent, breveté en 1994 sous le nom de LOOKAXLE, et mettant en œuvre une boucle étroite, de 20 cm de largeur, permet la détection d'essieux, leur comptabilisation, et à partir d'une mesure des temps séparant le passage des essieux, une classification des véhicules.

Pour diminuer le caractère « intrusif » des boucles et en faciliter la pose il est possible d'utiliser une variante collée sur la chaussée, dont la durée de vie est variable, de quelques jours à un an environ.

On peut noter enfin que pour augmenter la précision des comptages sur des chaussées à plusieurs voies et diminuer les erreurs dues aux véhicules chevauchant 2 voies, on peut faire appel à des configurations à plusieurs boucles associées à des logiques d'anti-coïncidence, par exemple:

- logique $2n-1$ boucles pour n voies ;
- logique IDRIS à 2 boucles par voie.

Ces configurations sont utilisées pour des débits importants ou lorsque les véhicules circulent mal dans leur voie.

4.2 Capteurs magnétiques ou magnétomètres

Constitué de bobines de fil de petit diamètre, pouvant être réalisées sur circuit imprimé, un magnétomètre est sensible à la variation du champ magnétique terrestre créée par le passage d'un véhicule au-dessus de lui, la présence de la masse métallique du véhicule produisant une concentration des lignes de champ.

Ces variations étant très faibles, le réglage du détecteur associé est délicat, et les magnétomètres, bien que connus et étudiés depuis longtemps, n'ont été industrialisés en vue d'applications au trafic que depuis quelques années seulement, et leur précision demande encore à être améliorée.

Ils sont du type « ponctuel » et « intrusif », mais ils présentent sur les boucles inductives l'avantage d'être plus compacts et par conséquent plus faciles à poser.

Cette caractéristique, alliée à une faible consommation électrique, a conduit les Américains à lancer à la fin des années 70 un programme SPVD (« Self Powered Vehicle Detector ») de détecteur magnétométrique peu intrusif, sans fil, alimenté par piles et relié par radio à un récepteur en bord de chaussée. Ce programme a abouti récemment aux produits développés et commercialisés par la société Nu Metrics. En France 3 sociétés se sont intéressées à ce type de capteurs: STERELA, LACROIX (associé à THORN) et MAGSYS.

Comme les boucles inductives ils permettent des mesures de débit et de taux d'occupation, ainsi que de vitesse quand on les associe par deux. Trois types d'applications au moins sont présentées par ces constructeurs :

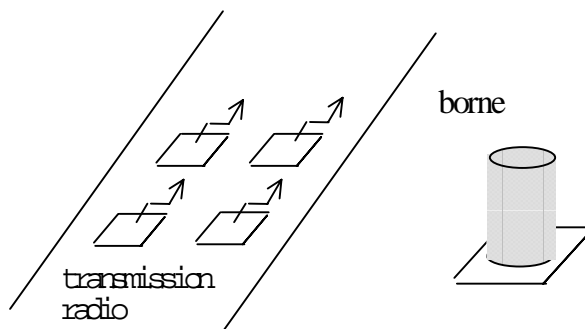


- un ensemble Nu Metrics capteur/compteur/alimentation intégré dans une plaque d'aluminium que se fixe au milieu de la voie de circulation. Cet ensemble convient pour des utilisations temporaires, et présente une précision comparable à celle des compteurs à tubes pneumatiques pour les mesures de débit. Par contre pour les mesures de vitesse, sa précision est inférieure à celle d'un compteur équipé de deux tubes. Dans les sites où le taux de poids lourds est important ce capteur s'avère meilleur que

le tube pour des raisons de tenue mécanique des tubes. Il a l'inconvénient de fonctionner « en aveugle », et de ne pas permettre de vérification simple de son bon fonctionnement; l'ensemble constitue par ailleurs un obstacle sur la chaussée, glissant par temps de pluie.



- stations de mesure de débits et éventuellement de vitesses avec liaisons filaires entre capteurs et stations, proposées par STERELA, MAGSYS, LACROIX TECHNOLOGIE. Les capteurs se présentent sous la forme d'un cube ou d'un cylindre d'une dizaine de centimètres au maximum implantés dans une saignée au milieu de la chaussée, et reliés à la station par 2 à 4 fils également noyés dans la chaussée. Un peu plus faciles à poser que les boucles, ils présentent des performances comparables en matière de comptage, mais nettement moins bonnes en matière de mesure de vitesse.



- capteurs à liaison radio à 224 MHz avec un compteur ou une station de mesure située en bordure de la chaussée, proposés par Nu Metrics et STERELA. Le système STERELA est composé de 2 capteurs posés par voie, reliés avec un compteur par une liaison radio d'une portée de quelques dizaines de mètres. L'ensemble capteur / émetteur / alimentation est inclus dans une plaque étanche de 160x220x20 mm, qui se fixe sur la chaussée par 2 vis. Il s'agit d'un produit encore en cours de mise au point

qui nécessite encore des améliorations sur le plan du traitement du signal, de la pose, et de la qualité de la liaison radio.

4.3 Capteurs micro-ondes

Les capteurs micro-ondes existent en différentes variantes:

- dans leur variante active, ils mettent en œuvre la propriété qu'ont les ondes de fréquence élevée d'une part d'être directives et de pouvoir être concentrées dans un faisceau étroit, et d'autre part de se réfléchir sur la carrosserie des véhicules, et d'une façon générale sur tout obstacle non totalement diélectrique, y compris sur le corps humain.
- dans leur variante passive, ils tirent profit du fait que tout corps à une température supérieure au zéro absolu émet un rayonnement dans la totalité de la gamme des ondes électromagnétiques et qu'un objet ou un véhicule sur la route a un spectre de rayonnement différent de celui du revêtement routier, ce qui peut permettre de le détecter.

On peut distinguer actuellement 3 types de capteurs micro-ondes.

4.3.1 Les capteurs à effet Doppler

Ces capteurs, improprement appelés radars (radio detection and ranging) puisqu'il n'ont pas la propriété de mesurer des distances (ranging), sont les capteurs les mieux adaptés à la mesure des vitesses. Ils permettent également plus simplement de détecter le passage d'un véhicule dans leur zone d'action.

Placés au bord de la chaussée, ou au dessus d'une voie de circulation ils émettent une onde hyperfréquence généralement dans une bande proche de 10 GHz ou de 24 GHz, concentrée dans un faisceau de quelques degrés d'ouverture. Un véhicule traversant ce faisceau réfléchit une partie du signal vers le radar. La différence de fréquence appelée « fréquence Doppler » entre l'onde émise et l'onde réfléchi est proportionnelle à la vitesse du véhicule conformément à la relation suivante:

$$F_d = \frac{2V \times \cos\alpha}{\lambda}$$

$$F_d = 2V \times \cos\alpha / \lambda$$

où F_d : fréquence Doppler (Hz)

V : vitesse du mobile (m/s)

λ : longueur d'onde (m)

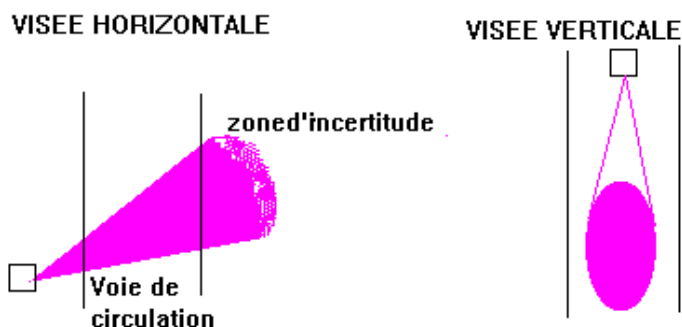
α : angle de visée (d°)

Les principales applications de ces capteurs sont:

- ♦ les mesures de vitesse sur route ou autoroute pour des besoins statistiques ou pour la régulation, et la commande d'affichage de vitesses recommandées (ex.: autoroute Nord de Marseille)
- ♦ la détection des dépassements de vitesse: les radars Doppler sont l'outil privilégié des forces de Police, soit sous forme d'équipement portable que l'on peut installer en bordure

de chaussée (systèmes MESTA et MAGDA de la SFIM), soit sous forme de « pistolets » tenus à la main. Pour ces mesures l'angle de visée doit être correctement déterminé; on doit prendre soin également de ne pas confondre des véhicules roulant sur plusieurs voies de circulation.

- ◆ la détection de véhicules à l'approche des feux : les radars Doppler ont été très utilisés dans les commandes adaptatives de feux de carrefour pour la détection d'arrivées de véhicules sur des voies secondaires. Ils le sont actuellement de moins en moins.
- ◆ le comptage de véhicules: en visant une voie à partir d'un radar implanté sur un portique, il est possible de compter les véhicules avec une assez bonne précision s'ils ne sont pas trop rapprochés, la taille du faisceau émis ne permettant pas de discriminer 2 véhicules trop proches.
- ◆ la détection de piétons: ceux-ci sont de moins bons réflecteurs que les véhicules, mais ils peuvent être détectés à quelques mètres, voire quelques dizaines de mètres.



4.3.2 Les radars proprement dits

Ces capteurs sont plus complexes que les précédents car l'onde émise doit être modulée pour permettre une mesure de distance. Les modulations les plus courantes sont:

- la modulation par impulsions: la distance est évaluée à partir de la mesure du temps aller-retour d'une impulsion hyperfréquence entre le radar et la cible. La vitesse de celle-ci s'obtient soit par dérivation de la distance ainsi mesurée, soit directement par effet Doppler (radars dits « pulse-Doppler »).
- la modulation de fréquence (radars FM/CW: frequency modulation continuous wave): le radar émet une onde hyperfréquence dont la fréquence varie linéairement avec le temps: la mesure de la différence de fréquence entre fréquence émise et fréquence reçue après réflexion sur une cible permet de calculer la distance de celle-ci. Lorsque les cibles sont mobiles on doit tenir compte de leur effet Doppler, ce qui impose par exemple d'utiliser 2 lois de variation de fréquence différentes dans un cycle de mesure: une loi « montante » et une loi « descendante » (modulation en « toit »).

Deux de ces radars ont fait déjà l'objet d'applications ou d'expérimentations:

- ◆ les radar EIS canadien, de type FM/CW, implanté sur quelques sites au Canada et aux Etats-Unis
- ◆ le radar BEATRICES de Thomson, de type pulse - Doppler, en cours de mise au point. Ce radar multivoies a été développé au départ pour faire de la détection automatique d'incident (DAI) de façon continue sur une grande plage d'analyse comprise entre 100m et 800 m. Ce radar peut être utilisé pour 3 fonctions différentes: DAI, DAB (détection automatique de bouchon), mesure de vitesse moyenne (ASM: average speed measurement). Une dernière version permet des mesures de débit et vitesse multivoies, le radar fournissant pour chaque zone de son champ d'observation la vitesse la plus faible, la vitesse la plus élevée, et la vitesse moyenne.

Ces radars permettent une bonne discrimination des véhicules en distance, sur des portées de plusieurs centaines de mètres avec une résolution de l'ordre de 2m, se prêtent au comptage, à la Différents principes peuvent être utilisés: technique « monopulse » mettant en œuvre 2 antennes créant 2 faisceaux légèrement décalés; technique SAR de radar à ouverture synthétique (synthetic aperture radar) mettant en œuvre une série d'antennes unitaires à large faisceau que l'on active successivement. C'est cette dernière technique qui est utilisée dans le radar ARMADA développé par Dassault-Electronique.

4.3.3 Capteurs micro-ondes passifs

Ce type de capteur passif exige que l'on se situe dans une partie du spectre électromagnétique où les émissions d'une cible diffèrent nettement de celles de l'environnement. La partie infrarouge du spectre s'y prête bien du fait que les véhicules sont des sources thermiques assez « visibles » du fait de leur motorisation; la partie haute du spectre des fréquences radio s'y prête également du fait que l'environnement est relativement peu bruité dans cette gamme de fréquences. Il n'existe aucun capteur microondes passif sur le marché, mais l'INRETS en étudie actuellement un dans la bande 180 GHz.

4.4 Capteurs optiques- capteurs infrarouge (IR)

Les capteurs optiques utilisés en trafic travaillant en général dans l'infrarouge, nous ne parlerons ici que de capteurs infrarouge ou IR.

Ces capteurs se classent en 2 grandes familles:

- ◆ capteurs IR passifs: ils sont sensibles à la chaleur émise par les véhicules, et également par les piétons ou conducteurs de 2 roues.
- ◆ capteurs IR actifs fonctionnant sur le principe de l'émission/réception d'un faisceau lumineux très fin. Ils peuvent être utilisés selon différentes configurations: lasers à impulsions permettant la mesure de distance, ou barrières IR.

4.4.1 Capteurs IR passifs

Ces capteurs servent essentiellement à une détection de présence de véhicules ou de piétons pour la commande des feux de carrefour. En fonction de l'optique utilisée et de l'angle de visée il est possible d'obtenir des portées entre quelques mètres et une centaine de mètres.

Ils semblent relativement peu répandus; les fabricants les plus connus sont la société suisse ASIM et SIEMENS.

4.4.2 Lasers à impulsions

Ces capteurs permettent, comme les radars la mesure de la distance d'une cible. Ils peuvent être implantés sur une potence ou un portique au-dessus d'une voie de circulation: un émetteur envoie périodiquement une impulsion qui se réfléchit soit sur le sol, soit sur le toit d'un véhicule: la mesure du temps de parcours entre l'émetteur et le récepteur associé permet de détecter le passage d'un véhicule.

Ces capteurs peuvent servir aux mesures de débit, de taux d'occupation, et, en les associant par deux, aux mesures de vitesse. Ils permettent également une classification des véhicules en fonction de leur hauteur. Les versions les plus sophistiquées permettent la détermination du profil complet en hauteur d'un véhicule, voire, en utilisant un laser à balayage transversal, une imagerie complète du véhicule dans ses 3 dimensions: c'est le cas des produits OMRON et des produits Autosense de la société américaine SEO.

Une autre application de ce type de laser est la détection des infractions sur les vitesses à l'aide de « pistolets lasers » que l'on peut braquer horizontalement vers un véhicule: la mesure de vitesse se fait en différenciant les mesures successives de distance faites sur la cible. Produits de la SFIM et de TSS.

4.4.3 Barrières optiques

Ces barrières, composées généralement de faisceaux horizontaux, mettent en œuvre soit un émetteur et un récepteur placés de part et d'autre de la voie sur lesquelles les mesures sont faites, soit un émetteur et un récepteur groupés dans un même boîtier avec un réflecteur placé en vis-à-vis. Ce type de barrière est surtout utilisé dans les voies des postes de péage, pour compter les véhicules, ou pour les classer à partir de leur profil en hauteur.

Notons que l'INRETS a essayé dans les années 80 un dispositif de comptage de véhicules mettant en œuvre un émetteur/récepteur laser placé à la verticale de la chaussée, dont le faisceau se réfléchissait sur un réflecteur collé sur celle-ci.

Le FRAO du CETE de l'Est utilise également le principe des barrières optiques pour ses mesures. La société israélienne MAROM semble également utiliser ce principe (Cf. (246)).

4.5 Capteurs vidéo - Traitement d'image

Ces capteurs se rencontrent actuellement dans 2 grandes familles d'applications:

- l'analyse du trafic
- la lecture de plaques minéralogiques

4.5.1 Capteurs vidéo pour l'analyse du trafic

Couramment utilisée pour la surveillance du trafic dans les postes de contrôle, l'image vidéo offre des informations d'une grande richesse que seul un opérateur peut appréhender dans leur globalité grâce à une présence permanente face aux moniteurs.

L'observation d'écrans vidéo par des opérateurs représente cependant une contrainte importante, et l'idée de traiter les images automatiquement et en temps réel pour en extraire des renseignements sur le trafic a été lancée dès la fin des années 70, consécutivement aux premières recherches et développements menés sur les applications industrielles du traitement d'images.

Ces développements ont été lents, en raison des difficultés à résoudre, et ce n'est qu'au début des années 90 que les premiers équipements industrialisés sont apparus sur le marché.

La principale difficulté tient au volume d'informations à traiter en temps réel: une image TV numérisée s'analyse en lignes, chaque ligne étant découpée en points ou pixels dont on quantifie la luminosité. Une caméra TV industrielle courante délivre 24 fois par seconde une image de 256 lignes x 256 pixels, la luminosité de chaque pixel étant évaluée sur une échelle à 64 niveaux, codés sur 8 bits: ceci conduit à traiter un flux d'environ 12 Mbits/s, ce qui est resté longtemps hors de portée des ordinateurs à bon marché.

Les premiers systèmes qui se sont développés ont été conçus pour tourner cette difficulté en réduisant le volume d'informations à traiter, soit en travaillant sur un nombre réduit d'images, p.ex une image sur 4, sur 8, voire sur 24, ou en ne travaillant que sur des zones réduites de chaque image, ce qui revient à simuler des capteurs de type « ponctuel » sur l'image de la chaussée.

L'évolution des performances des calculateurs rend cependant maintenant plus facile le traitement de tels flux d'informations.

D'autres difficultés sont liées:

- aux conditions météorologiques qui peuvent altérer la lisibilité des images
- aux effets de masques dus à la végétation, aux véhicules de grand gabarit, ou à la trop grande densité du trafic
- aux effets d'éblouissement dus au soleil sous certaines inclinaisons
- aux vibrations des supports de caméras.

Le traitement d'une image numérisée est relativement complexe et comporte différentes étapes:

- élimination des « bruits » par des opérations portant sur le voisinage de chaque pixel

- extraction des objets intéressant l'exploitant -ici les véhicules: cette extraction peut se pratiquer image par image par des opérations de type « gradient » permettant de déterminer des contours d'objets; elle peut également se pratiquer en faisant des différences entre images successives, pixel par pixel, ce qui permet de faire apparaître les objets mobiles.
- discrimination et mise en forme de ces objets, par exemple par des méthodes de reconnaissance de formes.
- suivi de la trajectoire des objets mobiles et détermination de leur vitesse.

Les principaux produits se trouvant sur le marché font appel à différents procédés:

- traitement de zones limitées de l'image: plusieurs systèmes mettent encore en œuvre ce procédé qui permet, comme on l'a vu plus haut, de réduire le volume d'informations à traiter. C'est le cas notamment des dispositifs Traficon CCATS, qui simulent l'équivalent de boucles inductives sur l'image de la chaussée, ou CCIDS, qui traitent des lignes parallèles à l'axe de la voie dans chaque voie.
- traitement de la totalité de l'image utile: c'est le cas des produits développés par l'INRETS et commercialisés par Citilog.
- un dernier procédé, utilisable dans des zones limitées telles que les péages consiste à marquer la chaussée à l'aide d'un dessin en damiers qui permet de faire apparaître facilement les objets venant masquer ce damier.

L'analyse d'image TV est une technique non intrusive, les capteurs étant placés sur des portiques ou sur des mâts en bordure de chaussée. Elle a l'avantage de se prêter à un grand nombre de mesures, du fait de son caractère à la fois « ponctuel » et « zonal » (du moins pour les procédés traitant la totalité de l'image):

- ◆ mesure de débit, de vitesse, de taux d'occupation, en observant une zone limitée de chaussée
- ◆ mesure de la densité du trafic sur une longueur donnée de chaussée
- ◆ mesure de mouvements tournants, de changements de voies
- ◆ mesure de longueurs de queues à des carrefours, ou dans des péages
- ◆ DAI, et en particulier détection de véhicules arrêtés, y compris sur les bas-côtés.
- ◆ détection de piétons

On trouvera au chapitre 2-2-7 des indications sur les performances couramment obtenues sur ces différentes mesures.

4.5.2 Lecture de plaques minéralogiques

Cette application, très distincte de la précédente, repose sur les techniques de reconnaissance de caractères développées dans d'autres domaines de l'industrie et des services.

Les caméras doivent être disposées au-dessus des voies ou en bordure de celles-ci de façon à viser au mieux les plaques des véhicules. Le traitement comporte 2 étapes:

- ◆ reconnaissance de la plaque, ce qui peut soulever certaines difficultés sur des véhicules commerciaux présentant différents types d'inscriptions.
- ◆ lecture du numéro minéralogique.

Les principales difficultés rencontrées dans cette application sont liées aux phénomènes de masquage lorsque le trafic devient dense, ainsi qu'aux salissures des plaques. Il en résulte que les performances obtenues sont assez médiocres, avec des taux de reconnaissance se situant aux environs de 70%. Elles sont meilleures dans des applications spécifiques, telles que l'identification de véhicules dans des voies de péage, où les véhicules sont bien canalisés.

Les principales applications possibles sont:

- ◆ mesure de temps de trajet
- ◆ établissement de matrices O/D
- ◆ lutte contre les fraudes aux péages.

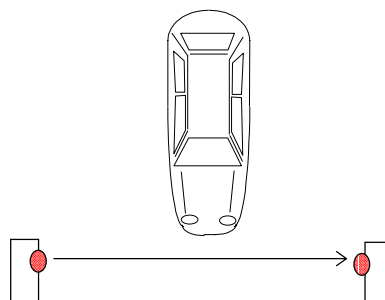
4.6 Capteurs acoustiques- capteurs à ultrasons (US)

Comme pour les types de capteurs précédents, il est possible d'envisager 2 familles de capteurs acoustiques:

4.6.1 Les capteurs passifs

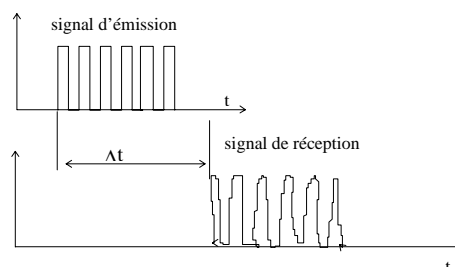
Ces capteurs détectent le bruit émis par les véhicules - bruits de roulement et/ou de moteur. Ces capteurs étant relativement peu directifs ne peuvent cependant servir que pour détecter la présence ou l'absence de véhicules sur une certaine zone de la chaussée. Une mesure plus précise exige l'utilisation d'un faisceau d'antennes situées à intervalles réguliers en bord de route et associées à un dispositif de traitement de signal relativement complexe. Ce principe n'est par conséquent pas utilisé dans l'exploitation courante du trafic.

L'idée de détecter des accidents par analyse du bruit du trafic a également été envisagée, mais pas mise en pratique.



4.6.2 Les capteurs actifs

Ces capteurs, mettant en général en œuvre des émetteurs /récepteurs à ultrasons (US) fonctionnant aux environs de 60 kHz, et placés au-dessus de la chaussée sont par contre beaucoup utilisés, notamment au Japon. L'émetteur envoie périodiquement un signal impulsionnel en direction de la chaussée; après réflexion ce signal est traité dans un récepteur associé qui mesure son temps de parcours entre émission et réception. Ce temps est plus faible lorsqu'un véhicule passe au-dessous du capteur, ce qui permet de détecter la présence ou le passage d'un véhicule.



Ces capteurs, de type « non intrusif » et « ponctuel », se prêtent aux mêmes mesures que les boucles inductives: mesures de débit, de taux d'occupation, et, en associant 2 capteurs, mesure de vitesses. Pour les mesures des vitesses, ils sont cependant peu précis.

Les principaux fabricants sont japonais: Omron, Matsushita-Panasonic.

4.7 Capteurs de pression

Un moyen simple de détecter les véhicules consiste à tirer parti de la pression exercée sur la chaussée par le passage des essieux. Ce principe physique a donné lieu à différents modes de réalisation, le plus connu étant le tube pneumatique. Ces capteurs sont de type « intrusif » et « ponctuel ».

4.7.1 Capteurs pneumatiques

Ces capteurs, mettent en œuvre un tuyau en matériau élastique fixé en travers de la chaussée. La variation de pression résultant de l'écrasement par les roues d'un véhicule se propage jusqu'à l'extrémité où se situe un détecteur de pression dans lequel elle active le contact électrique d'un relais.

Ce sont les plus anciens des capteurs; ils ne sont plus utilisés à titre permanent en raison d'une faible durée de vie, mais servent encore beaucoup pour des campagnes de mesures de durée limitée. Faiblement intrusifs, ils ont l'avantage de se poser facilement sur la chaussée.

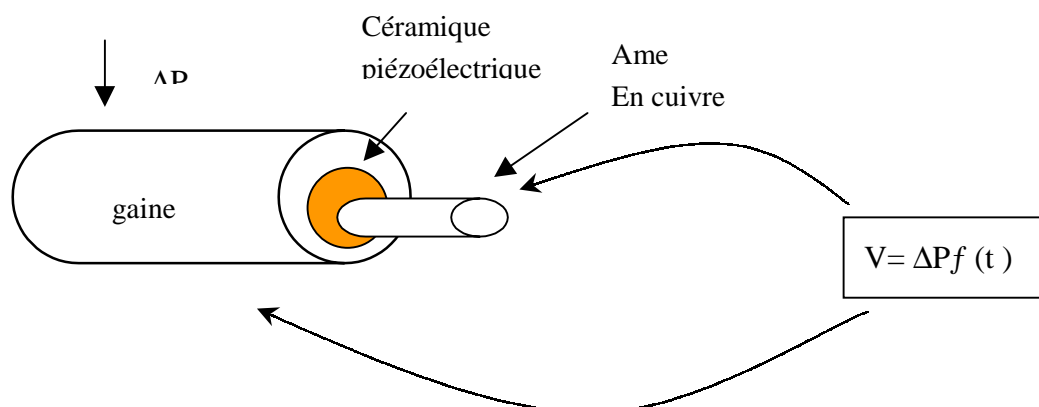
Ils servent à mesurer le passage d'essieux. Du comptage des essieux on peut déduire avec une assez bonne approximation les débits de véhicules.

On utilise par ailleurs souvent une configuration à 2 tubes pneumatiques espacés d'environ 1m, afin de procéder à des mesures de vitesse, et également de reconnaître des poids lourds sur la base de l'interdistance entre les 2 premiers essieux.

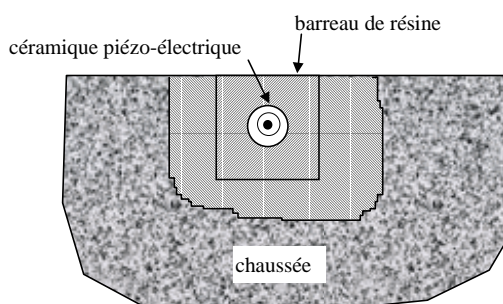
4.7.2 Capteurs piézo-électriques

Ces capteurs mettent en œuvre la propriété qu'ont certains matériaux diélectriques de donner naissance à une tension sous l'effet d'un déplacement de charges électriques lorsqu'ils sont soumis à une pression, cette tension V étant proportionnelle à la pression P appliquée.

Le matériel piézo-électrique employé est généralement une céramique que l'on conditionne sous forme d'un câble coaxial comportant une gaine et une âme conductrices en cuivre. Ce câble est inséré transversalement dans la chaussée; la tension créée dans la céramique lorsque la force d'impact des pneus d'un véhicule lui est appliquée est mesurée entre l'âme et la gaine (cf. figure).



Le câble n'est pas installé directement dans la chaussée car il ne doit pas être déformé, sous peine de perdre sa précision. Il est donc enrobé dans un barreau de résine qui lui assure une bonne résistance mécanique (cf. figure).



Ce type de capteur peut servir pour procéder à des mesures de débits ou de vitesses, comme les tubes pneumatiques décrits au chapitre 4-1. Il sert surtout pour les besoins du pesage dynamique et de la classification des véhicules.

Son utilisation à des fins de pesage nécessite des opérations d'étalonnage, avant enrobage et après pose, celle-ci nécessitant des précautions particulières. Le choix du site a une grande importance, à la fois pour la longévité du capteur et

pour la précision des mesures.

Selon les résultats de l'étalonnage, le capteur est déclaré apte au pesage, ou, à défaut, apte au classement en silhouette.

La norme NFP 99-300 définit les classes de précision suivantes:

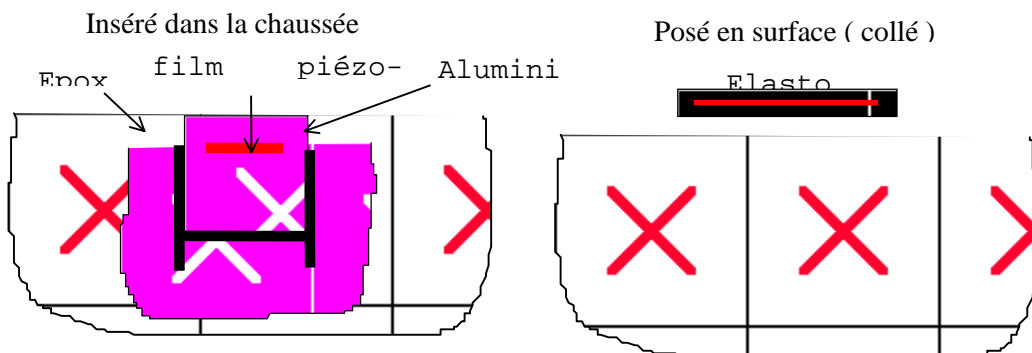
Catégorie D'essieu	Classes d'exactitude				
	A	B	C	D	E
Essieu simple	≤ 8%	≤ 15%	≤ 20%	≤ 30%	>30%
Essieu d'un groupe	≤ 10%	≤ 20%	≤ 25%	≤ 35%	>35%
Groupe d'essieux	≤ 7%	≤ 13%	≤ 18%	≤ 28%	>28%
Poids total roulant	≤ 5%	≤ 10%	≤ 15%	≤ 25%	>25%

Associé à d'autres capteurs, principalement des boucles inductives, le capteur piézo-électrique permet le calcul du poids de chaque essieu, du poids total, le calcul des distances entre essieux, et le classement des véhicules selon leur silhouette.

Le principal fabricant français du capteur de base est la société Thermocoax. La société ECM produit différents types de piezo conditionnés pour des mesures de charge et pour faire de la classification. Les sociétés LACROIX, STERELA, ECM et SIAT produisent des détecteurs de charge associés au piézo ainsi que des stations complètes de mesure.

L'effet piézo-électrique peut s'observer sur des matériaux autres que les céramiques, et notamment sur des polymères électriquement chargés réalisés à partir de films de matière plastique à haute résistivité en y injectant des charges électriques.

Différentes évaluations sont toujours en cours par le LCPC sur des capteurs piézo-polymères insérés dans la chaussée ou posés en surface (cf. figures) pour qualifier ces capteurs.



4.7.3 Capteurs résistifs

Ces capteurs mettent en œuvre le rapprochement et le contact de 2 surfaces conductrices séparées par des éléments élastiques sous l'effet d'une pression.

L'application la plus connue est le tapis détecteur de piétons utilisé dans de nombreux domaines.

Dans celui de l'exploitation du trafic, il trouve son usage en milieu urbain

- ◆ sur des passages piétons implantés en section courante et non équipés de feux
- ◆ sur des carrefours équipés de feux, pour l'adaptation du temps de vert piétons.

4.7.4 Capteurs capacitifs

Ces capteurs mettent en œuvre un ensemble de 2 plaques conductrices séparées par un matériau isolant élastique, formant un condensateur dont la capacité varie sous l'effet d'une pression.

Il est utilisé à l'étranger, notamment en Grande Bretagne et en Afrique du Sud. En France il n'a pas dépassé le stade expérimental, peut-être en raison d'une implication insuffisante du constructeur. Il se présente sous forme de 4 unités de 1,60m équipant chaque voie de circulation: regroupés deux à deux, ces capteurs fournissent des données de poids roue par roue. Les résultats sont insensibles aux variations de température. Bien que ces capteurs soient plus chers que les capteurs piézo-électriques, ils pourraient réapparaître dans les années à venir.

4.7.5 Capteurs à jauges de contrainte

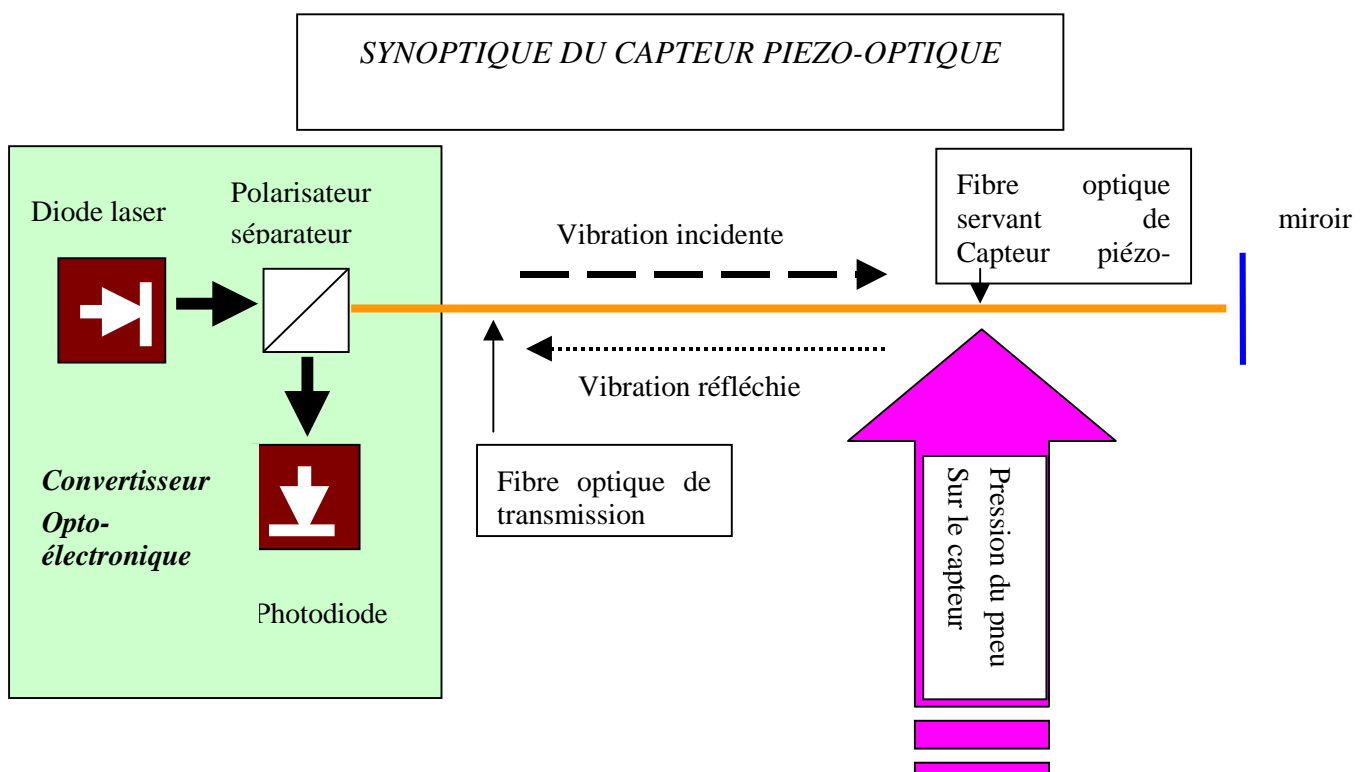
Ces capteurs mettent en œuvre la propriété de certains matériaux conducteurs de voir leur résistivité varier avec la pression qui leur est appliquée.

Cette propriété est utilisée principalement pour réaliser des bascules de pesage de véhicules à l'arrêt ou à basse vitesse, les jauges étant insérées dans des montages métalliques sur lesquels passent les roues des véhicules.

4.7.6 Fibres optiques

Le mode de propagation de la lumière dans une fibre optique peut être modifié lorsque cette fibre se déforme.

Cette propriété peut être mise en œuvre pour la détection du passage d'essieux de véhicules, et même pour le pesage de ces essieux, en insérant une fibre dans la chaussée, longitudinalement ou transversalement, et en connectant une diode émettrice à une extrémité et une diode réceptrice à l'autre. La déformation de la chaussée sous l'effet de la pression va entraîner une déformation de la fibre et une modification du signal reçu.



Aucun capteur de ce type n'est encore industrialisé, mais il donne lieu à des recherches, notamment en France, sous l'égide du LCPC, et au Japon.

4.8 Capteurs météorologiques

Bien qu'il ne s'agisse pas de capteurs de trafic proprement dits, et qu'ils servent également dans d'autres domaines, notamment dans les aéroports, nous évoquons ici sommairement les capteurs de conditions météorologiques

Les principaux phénomènes météorologiques intéressant le trafic et sa sécurité sont:

- le vent, mesuré par des anémomètres ou par des balises
- le brouillard, mesuré par des visibilimètres: ceux-ci sont soit de type « transmissomètres », utilisant la mesure de l'atténuation de l'intensité d'un rayon lumineux sur une distance donnée, soit de type « réflectomètre », utilisant la mesure de la lumière réfractée par les particules de brouillard.
- le verglas, qui n'est pas détecté directement, mais dont on apprécie les risques d'apparition à partir d'un ensemble de paramètres: température et humidité de l'air, température et humidité de la route.

4.9 Capteurs de nuisances

Comme les précédents, ces capteurs ne sont pas propres au trafic, et nous les évoquons pour mémoire:

- mesure du bruit à l'aide de sonomètres
- mesure de polluants (CO, CO₂, NO, NO₂) à l'aide d'appareils de mesure de produits chimiques, tels que les spectromètres.

4.10 Mesures impliquant des véhicules « actifs »

Pendant longtemps les seuls dispositifs embarqués ayant un lien avec l'exploitation du trafic ont été les contrôlographes de PL, qui permettaient la détection par les forces de Police des infractions au temps de conduite et à la vitesse, mais il n'était pas habituel de les ranger parmi les capteurs de trafic.

Plus récemment le développement des systèmes de navigation/guidage et des liaisons sol/véhicules a permis d'envisager de faire des véhicules de véritables capteurs pour l'analyse du trafic. Le conducteur peut aussi être actif, et participer notamment à la détection d'incidents. Nous évoquerons ici brièvement ces différentes possibilités.

4.10.1 Contrôlographes embarqués

Ces appareils évoluent, et l'enregistrement traditionnel sur disques de papier laisse la place à un enregistrement numérique plus précis et susceptible d'applications plus larges. Les évolutions envisageables pourraient être :

- ◆ l'enregistrement d'informations supplémentaires, relatives par exemple à la charge du PL ou à sa charge à l'essieu, ce qui nécessiterait le développement de capteurs appropriés
- ◆ la transmission directe vers le sol des informations enregistrées, à l'aide de systèmes d'interrogeurs/répondeurs, permettant des contrôles plus systématiques sur route
- ◆ l'extension sous forme simplifiée aux VL de ces contrôlographes, avec enregistrement de la vitesse, mais aussi d'autres paramètres tels que les actions sur le frein ou l'accélérateur, qui permettraient une meilleure connaissance des circonstances d'accidents.

Notons que le développement de tous ces types d'appareils dépend plus d'une volonté politique et de l'évolution des mentalités tant au plan national qu'euro péen, que de la résolution de problèmes techniques.

4.10.2 Véhicules traceurs (ou « probes »)

Deux grands types de systèmes de navigation et de guidage ont été développés et expérimentés ces dernières années:

- le système de type ALI-SCOUT expérimenté à Berlin, reposant sur des liaisons à courte portée en infrarouge entre des installations au sol implantées au voisinage des carrefours et les véhicules
- les systèmes de type CARMINAT reposant sur un dispositif de navigation autonome, permettant au véhicule de connaître sa position à tout instant, généralement sur la base de cartes numérisées embarquées, de données GPS, et une liaison sol/véhicules.

Le guidage ne nécessite en principe que des liaisons du sol vers les véhicules. Cependant dans ces 2 types de systèmes il est possible d'y ajouter une liaison du véhicule vers le sol, soit à courte portée vers des balises réceptrices situées en bord de route, soit par GSM.

En transmettant sur une telle liaison son identité et sa position, le véhicule peut jouer le rôle de « traceur ». Si une proportion suffisante de véhicules est équipée, il est possible d'obtenir par un tel procédé des informations sur le trafic:

- ◆ vitesse moyenne, et débit approché des véhicules
- ◆ temps de trajet
- ◆ matrices O/D.

Ce mode de recueil est encore à un stade très expérimental.

Une autre voie devrait voir le jour dans un proche avenir. C'est l'utilisation des appareils de téléphonie mobile qui, en veille à bord des véhicules, peuvent être suivis au travers des cellules GSM, permettant ainsi de calculer des temps de parcours. Dans d'autres cas, les mobiles qui sont équipés de GPS pourront transmettre leur position avec encore plus de précision.

Si l'on admet que le nombre de mobiles (téléphoniques, assistants personnels, "palm-top computers", etc.) avec des fonctions en nombre de plus en plus élevé va croître fortement, on pourra obtenir de l'information sur le trafic en faisant des hypothèses sur l'appartenance mobile/véhicule.

4.10.3 Envoi d'informations par les conducteurs

Cette possibilité est utilisée depuis longtemps aux Etats-Unis, par des clubs automobiles ou des associations d'usagers, pour détecter des incidents ou anomalies de trafic et alimenter des services d'information routière. A l'origine ces systèmes reposaient sur la CB, mais ils doivent faire de plus en plus appel aux téléphones cellulaires.

Le développement des moyens de communication mobiles devrait favoriser la mise en place de tels systèmes, qui demandent un minimum d'organisation, et qui pourraient servir notamment dans les zones peu fréquentées. »

4.11 Perception aérienne globale du trafic

Il est admis que les usagers ainsi que les exploitants d'infrastructures routiers ont besoin d'avoir de plus en plus d'informations sur le trafic. La complexité et le coût des infrastructures de recueil de données sont de plus en plus importants. De plus le recueil de l'information par boucles est très imparfait car localisé qu'en certains points : il faut donc par des algorithmes adéquats calculer les longueurs de queue ou les temps de parcours.

Il serait simple d'avoir une vue directe du trafic. Si l'on pouvait observer d'un coup d'œil les bouchons comme l'on observe un écran avec SYTADIN, on aurait un raccourci saisissant par rapport aux opérations jusque là nécessaires.

On peut se poser la question de recueillir le Taux d'occupation (TO) ou le débit (Q) sur chaque tronçon d'une ville en utilisant un vecteur aérien équipé de capteurs, IR radar ou autres. On peut examiner les différents problèmes ainsi que les différentes contraintes existantes.

Cahier des charges pour un tel système

La période de ré-actualisation des données doit être inférieure à 5 secondes

Le système doit être opérationnel 20 heures sur 24.

La surface à couvrir doit avoir de l'ordre de 10 km de large.

Ce système doit fournir TO et Q sur l'ensemble des tronçons.

Problèmes et contraintes

Dans un premier temps, il faut se préoccuper des conditions d'environnement : conditions atmosphériques, obstacles divers, circulation aérienne. Ensuite, évaluer la capacité des capteurs à mesurer le trafic, système optiques, radar. Enfin, évaluer les capacités de différents vecteurs susceptibles de convenir.

4.11.1 L'environnement

L'environnement concerne l'atmosphère, la ville, la législation aérienne.

4.11.1.1 Conditions atmosphériques

La densité de l'air qui diminue avec l'altitude : (1/70 atmosphère à 30 km) limite le vol des avions ou des drones (cf. terminologie).

La température diminue jusqu'à 12 km (-50 ° C) pour croître jusqu'à 40 km pour rediminuer ensuite. Il faut donc que l'équipement supporte des températures basses.

Circulation atmosphérique : indépendamment de la circulation atmosphérique que l'on connaît, existent en altitude entre 7 et 13 km les jets-streams, vents forts de 200 km/h (environ) qui changent de direction en cours d'année et qui ont des gradients transversaux forts. La puissance des jets permet difficilement d'y placer un vecteur aérien immobile ou qui tourne au dessus d'une ville. De plus les turbulences risquent de perturber les mesures de capteurs.

Nuages : ils absorbent certaines longueurs d'ondes, ce qui va poser un problème pour la mesure en visible. Parmi les nuages connus, le cumulo nimbus empêche tout déplacement et le vecteur doit se placer au dessus de la tropopause (plus de 10 km) pour être à l'abri.

4.11.1.2 La ville et les obstacles virtuels

Gêne pour la vue apportée par les habitations : pour prendre un exemple, une voiture située à 4 m d'un immeuble de 25 m de haut ne peut être vue d'une altitude de 15 km qui si elle est à l'intérieur d'un cercle de 2 km.

Autres obstacles : les ponts et les arbres constituent des obstacles ainsi que les tunnels.

Cartographie de la ville : elle existe : on peut l'obtenir pour toute ville aujourd'hui. Les cartes vont simplifier l'analyse des données.

4.11.1.3 Circulation aérienne

L'espace aérien est divisé en espace inférieur (au dessus de 6000 m) et supérieur (au dessus de 6000 m). Il existe des espaces contrôlés (couloirs, zones terminales d'aéroport), non contrôlés, à caractère particulier. Il n'y a pas actuellement de réglementation adaptée aux avions télépilotés : la tendance est de les considérer comme des avions pilotés. Si l'on veut être au dessus de toutes les voies aériennes, il faut être au dessus de 15 km. En dessous, il y a des contraintes de vol. Le survol des villes est réglementé (exemple altitude minimum de 1500 m sur la France, 2000 m à Paris uniquement pour les avions commerciaux).

4.11.2 Les capteurs

Les capteurs utilisés doivent avoir des performances en résolution (1 mètre par exemple), en temps d'acquisition d'image (1 seconde par exemple), en poids (non critique à priori), en encombrement. A priori, on s'intéressera aux systèmes optroniques largement utilisés en reconnaissance et aux systèmes radars.

4.11.2.1 Systèmes optroniques

Les systèmes optroniques sont les moyens de télédétection utilisant les longueurs d'ondes visibles ou infrarouges, c'est à dire allant de 0,4 à 100 micromètres. Ces systèmes largement utilisés en visualisation satellite et aéroportée ont connu un essor très important ces dernières années avec notamment les projets Spot et Hélios qui donne comme résultat des images d'une excellente qualité et d'une résolution avoisinant le mètre pour le second.

Pour le repérage de véhicules, la longueur d'onde la plus propice est l'infrarouge moyen qui correspond à une bonne fenêtre de visibilité atmosphérique (10 μ).

Transmission atmosphérique : Il y a le phénomène d'absorption dépendant de la longueur d'onde et la diffusion non sélective qui agit quelque soit la longueur d'onde. Elle est provoquée par l'eau et les particules de pollution. La turbulence atmosphérique a des effets négligeables sauf peut-être dans un cumulo-nimbus. Les capteurs actuels sont en constante amélioration car sont suivis par les militaires. On restitue actuellement une précision de 1 m à 100 km.

Les systèmes optroniques ont de grandes qualités. Ils sont peu coûteux, la transmission d'images est facile. Cependant, une forte couverture nuageuse ou des routes gelées vont oblitérer l'usage tout temps d'un dispositif optique. Il faut, si l'on veut pouvoir observer en permanence, se tourner vers les radars qui s'affranchissent des problèmes atmosphériques.

4.11.2.2 Radars

Les considérations sur l'ouverture angulaire, sur la longueur d'onde, la taille de l'antenne (ordre du mètre) le pouvoir séparateur etc. conduisent à utiliser des radars SAR (Radars à Synthèse d'ouverture). Ces radars sont faits au départ pour effectuer une cartographie précise d'objets fixes. Pendant toute la durée du survol d'un point, l'image de ce point est prise en compte. Il y a donc nécessité de calculs associés très importants. De plus, le SAR se prête mal au repérage des véhicules en mouvement. Il faut s'adjoindre dans le cas du trafic, l'usage des cartes pour limiter le traitement et même suivre les véhicules en mouvement.

A titre d'exemple, il serait probablement possible avec un SAR à antenne "focalisée" placée à environ 10 km d'altitude ayant une ouverture de 5°, une antenne de 1 m asservie, une résolution de 0,5 m, une longueur d'onde de l'ordre de 7 cm, l'utilisation de cartes magnétiques de correction et géographiques de localisation de repérer les véhicules et mesurer les paramètres trafic sur certains axes compte tenu des délais de calculs avec un retard de l'ordre de 5 minutes.

On voit que cette solution est possible mais toujours "limite" et donc coûteuse. Cependant le temps joue dans le bon sens puisque les militaires perfectionnent sans cesse ces techniques.

4.11.2.3 Comparaison

La résolution est bonne dans le cas des deux techniques, la technologie optronique est beaucoup plus accessible et couvrirait beaucoup de situations. Le radar lui est plus complexe à mettre en œuvre, à l'avantage de progresser continuellement, et permet de s'affranchir des perturbations atmosphériques. Seule une étude de faisabilité permettrait d'approfondir cette comparaison.

4.11.3 Les vecteurs

Les dirigeables : un dirigeable peut se positionner immobile sur n'importe quel point d'une ville, c'est donc un moyen d'observation idéal. Si l'on désire observer l'ensemble d'une ville au dessus de la tropopause (12 km), il faut être capable de franchir voire de stationner dans les jet-streams. Cela est possible, le projet PEGASE (dirigeable lenticulaire, géostationnaire) étudié par l'ONERA et le CNRS l'a montré et actuellement l'Aérospatiale, les Américains s'intéressent à des plates-formes de ce type, susceptibles de remplacer les satellites coûteux dans les applications Télécom. Mais cela est complexe, et demande un développement technologique qui est maîtrisable mais coûteux.

Bien qu'étant une solution tout à fait viable, et à notre sens à étudier, les à priori sur les engins sont tels que leur utilisation, si elle doit se faire, se fera près l'utilisation d'autres vecteurs.

Les satellites : la période de révolution des satellites orbite basse est supérieure à une heure, ils ne peuvent donc pas observer en temps réel. Quant aux satellitex géostationnaires, leur angle de vue est tel que les immeubles feraient obstacle à l'observation des véhicules.

Les avions télépilotes ou drones (cf. terminologie)¹ : les avions les plus performants dans le domaine de l'observation et de l'endurance sont les gnoptères hales. Ce sont des robots aériens sans pilote capables de rester plusieurs jours en l'air, sur un objectif lointain au dessus de 20 km d'altitude voire 30 km.

Parmi les gnoptères hales qui ont été développés, on peut citer le Condor de Boeing qui pourrait emporter 230 kg pendant 60 heures à 20 km d'altitude ou voler à 14 km pendant 6 jours. Ce gnoptère était entièrement automatique.

Actuellement le gnoptère hale qui est considéré comme le meilleur est le TIER 2+ (photo jointe en annexe) encore appelé Global Hawk. Ses caractéristiques sont :

- Envergure : 30 m
- Plafond : 20 km
- Endurance : 30 heures
- Charge utile : 900 kg
- Portée : 6000 km
- Capteurs : optroniques et SAR
- Communication : équipée pour liaisons haute capacité avec satellites
- Coût (militaire: 10 M \$)

Le HELIOS qui est le successeur des Pathfinders (énergie solaire) a l'ambition de voler à 30 km. C'est une aile très légère longue de 80 mètres qui aura une autonomie infinie.

Il est intéressant de noter que le FHWA a financé l'étude d'un drone de surveillance de trafic au Georgia Institute of Technology.

On peut considérer que le vecteur gnoptère hale est à l'heure actuelle le plus adapté.

Si l'on compare les ballons aux gnoptères on peut dire que :

- Les gnoptères présentent des performances de vol inférieures concernant la masse embarquée, la durée et l'altitude du vol.

¹ Terminologie :

1. Drone (anglais) - drône (français) : robot aérien (insecte bourdon)
2. RPV (Remotely Piloted Vehicle) ALT (Aerodyne Léger Télépilote) appellations "correctes"
3. UAV (Unmanned Aerial Vehicle), Gnoptère (de Gnôsis, gnomê, pteron) terme consacré actuellement intègre 1. et 2.
4. Hale (Haute Altitude et Longue Endurance), gnoptère spécialisé.

- L'allégement notable de la charge utile est possible du fait des moyens existants à bord de l'engin (puissance électrique, source de chaleur, équipement de navigation et télémétrie, etc.) et de l'inutilité du durcissement de l'instrumentation pour une récupération.
- La mise en œuvre (lancement récupération) est plus souple pour les gnoptères et peut être réalisée à partir d'une piste d'aviation.
- Le contrôle précis de la trajectoire des gnoptères dans des vents forts et changeants ainsi que les contraintes introduites par les virages sont des points importants. Les techniques de stabilisation existent. Elles doivent faire leurs preuves pour l'application.

4.11.4 Conclusion

Peut-on avoir une perception aérienne globale du trafic ? Compte tenu des différents points soulevés on peut dire que le gnoptère hale peut assurer les missions en tant que vecteur et satisfait les contraintes

Le problème des capteurs est plus complexe. Si l'on veut observer en permanence, le SAR convient au prix d'un traitement d'images coûteux pour estimer le taux d'occupation et moins bien le débit sur l'instant.

Le transfert d'information entre le vecteur et le sol ne devrait pas poser de problèmes.

L'étude de faisabilité d'un tel projet de perception globale demande des efforts conséquents.

4.12 Synthèse

4.12.1 Les grandes classes de capteurs

Ce panorama des technologies de capteurs montre d'abord que l'on peut imaginer de multiples classifications pour les capteurs de trafic existants (hors capteurs météo et capteurs de nuisances).

4.12.1.1 Classification par les principes physiques

Les capteurs que nous avons décrits reposent essentiellement sur 3 grandes classes de phénomènes physiques:

- ◆ les phénomènes électromagnétiques (ceux-ci incluant l'optique et la vidéo), qui sont d'une grande diversité, et qui fournissent directement des signaux électriques.
- ◆ les phénomènes acoustiques
- ◆ l'exploitation de la pression des pneus sur la chaussée.

4.12.1.2 Capteurs « intrusifs » ou « non intrusifs »

- capteurs intrusifs ou capteurs « au sol »: ce sont essentiellement les boucles, les capteurs de pression et les magnétomètres; les capteurs pneumatiques, les boucles collées, voire les magnétomètres peuvent cependant être considérés plutôt comme « semi-intrusifs », car plus faciles à installer.
- capteurs non intrusifs ou « aériens »: ce sont les capteurs micro-ondes, infrarouges, acoustiques et vidéo.

Notons que cette notion de capteur « non intrusif » n'est pas dépourvue d'ambiguïté, car elle est souvent assimilée à celle de facilité d'installation. Or l'implantation d'une caméra sur un portique ou sur un poteau élevé, ou le montage d'une antenne de radar de type ARMADA sur un portique peuvent être des opérations relativement lourdes, et pouvant parfois impliquer une intervention sur le trafic.

4.12.1.3 Capteurs « ponctuels » ou « zonaux »

- les boucles, les magnétomètres, les capteurs IR, US ou piézo, ainsi que les radars Doppler rentrent normalement dans la catégorie des capteurs « ponctuels ». Toutefois boucles, IR passifs et radars Doppler peuvent également avoir des utilisations de type « zonal ».
- les caméras vidéo et radars sont généralement rangés dans les capteurs « zonaux », mais ils peuvent servir également à des mesures « ponctuelles ».

4.12.1.4 Capteurs actifs ou passifs

Les capteurs actifs nécessitent une émission d'énergie, généralement électromagnétique ou acoustique: c'est le cas des boucles inductives, de la plupart des capteurs micro-ondes, des capteurs US et de certains capteurs IR.

Les capteurs passifs tirent profit de l'énergie rayonnée par le véhicule ou de son énergie mécanique: c'est le cas des capteurs passifs micro-ondes, IR, ou acoustiques et des capteurs de pression. Dans le cas des magnétomètres on tire parti des variations induites par le véhicule sur le champ terrestre.

4.12.1.5 Types de mesures effectuées

On trouve dans le tableau du chapitre 3 la correspondance entre les techniques de capteurs et les mesures qu'ils permettent, soit sous forme isolée, soit par groupes de plusieurs capteurs. Ce tableau fait apparaître que la plupart des capteurs sont très polyvalents et peuvent se prêter à différents types de mesures. Aucun classement net n'est par conséquent possible sur ce thème.

4.12.1.6 Degré d'utilisation

Les capteurs les plus utilisés, du moins en France sont les capteurs pneumatiques, les boucles inductives, les radars Doppler et les capteurs piézo-électriques.

A l'étranger ces capteurs sont également très utilisés, mais on peut rencontrer d'autres technologies:

- ◆ capteurs ultrasons très répandus au Japon
- ◆ capteurs infrarouges utilisés par la société TrafficMaster en Grande Bretagne.

Parmi les technologies encore peu répandues, les plus prometteuses semblent être:

- ◆ le traitement d'image vidéo, qui se développe beaucoup depuis 3 ou 4 ans
- ◆ les magnétomètres qui commencent à être utilisés aux Etats-Unis.

Il est encore difficile de se prononcer sur l'avenir des formes les plus complexes de radars (BEATRICES, ARMADA), qui fournissent des informations très riches, mais sont encore en cours de mise au point.

4.12.2 Perspectives d'évolution

Nous avons vu plus haut que les capteurs de trafic existants font essentiellement appel à 3 phénomènes physiques: l'électromagnétisme, l'acoustique et l'effet de la pression des pneus.

Ces phénomènes sont exploités depuis très longtemps, et il est vraisemblable que les évolutions majeures en matière de capteurs se situeront dans ces 3 classes de technologies.

- dans le domaine électromagnétique, on peut noter par exemple que les parties du spectre utilisées sont très limitées:
 - . la bande 50-150 kHz (boucles)
 - . les bandes autour de 10 et 24 GHz (radars) et 180 GHz (capteur micro-onde passif)
 - . la bande infrarouge (capteurs IR)
 - . la bande optique visible (vidéo)

Bien entendu la plus grande partie du spectre est réservée à d'autres usages par la réglementation, mais on peut penser par exemple que les développements actuels dans le domaine des radars anticollision embarqués travaillant dans la bande 76 GHz, et qui vont conduire à des produits compacts, avec un traitement sophistiqué du signal, et néanmoins bon marché, pourraient avoir des retombées dans le recueil de données. Par ailleurs les capteurs passifs ne sont astreints à aucune réglementation.

Dans la bande infrarouge les capteurs passifs utilisés en trafic sont encore rustiques. On trouve des caméras IR beaucoup plus complexes, et permettant une véritable imagerie, dans le domaine militaire. Ces produits, qui permettraient de s'affranchir des limitations des caméras vidéo en vision nocturne et par fort brouillard, sont encore à des prix trop élevés pour des applications civiles, mais ils pourraient devenir accessibles à plus long terme.

On peut noter enfin qu'avec le développement des radiotéléphones mobiles les véhicules ont tendance à devenir des émetteurs de signaux dans la bande GSM, pour peu que leurs appareils soient actifs ou en veille. Les serveurs de communications mobiles localisent ces mobiles au moins à l'échelle d'une cellule de base, mais seraient en mesure de les localiser à 400/500 m près. Cette propriété n'a pas un grand intérêt dans les zones denses, mais pourrait permettre de déceler des anomalies de trafic sur des réseaux routiers peu denses et peu fréquentés.

Les capteurs de pression connaissent actuellement d'importants développements, avec les travaux sur les possibilités d'utilisation des fibres optiques, et avec l'apparition récente des capteurs à quartz. Dans ce domaine il y a sans doute encore beaucoup de place à des innovations, avec pour objectifs la recherche des meilleures performances, et des plus grandes facilités de pose, au meilleur coût.

La présence de véhicules ne se manifeste cependant pas uniquement au travers de ces 3 classes de phénomènes, et l'on peut penser à d'autres formes de manifestations, dont l'exploitation semble toutefois plus difficile :

- ◆ vibrations induites dans la chaussée par le roulement: un capteur sismique a ainsi été expérimenté par l'IRT dans les années 70, mais sans grand succès, un tel capteur étant insuffisamment discriminant.
- ◆ phénomènes aérodynamiques
- ◆ modifications locales du champ gravitaire par la masse des véhicules: aucune instrumentation n'est probablement assez sensible actuellement pour tirer parti de ce phénomène.
- ◆ émissions de gaz, exploitées uniquement pour l'instant pour la surveillance de l'environnement, et non pour l'analyse du trafic.

Il n'est pas certain que, compte tenu de la diversité et des capacités des capteurs actuels, on ait réellement besoin de chercher à faire appel à des phénomènes encore non exploités pour le recueil de données de trafic. Il est sans doute plus urgent, comme le demandent de nombreux exploitants, de se concentrer sur la qualité et la fiabilité des nombreux modèles de capteurs existants.

5 Fonctions et services impliquant du recueil de données

Afin de dresser une liste la plus exhaustive possible des fonctions de l'exploitation de la route susceptibles d'être intéressées par un recueil de données, on a rassemblé en annexe les listes de fonctions qui ont été établies par les grands programmes nationaux et internationaux de ces dernières années, en détaillant en outre les zones - urbaines, interurbaines, tunnels, parkings, aires de péages, etc.- où elles peuvent s'appliquer.

On notera que dans ces programmes de nombreuses fonctions ne peuvent manifestement faire appel qu'à du matériel embarqué, et elles ont été écartées: c'est le cas par exemple de la fonction « alerte » ou « Mayday » qui par définition a pour objet de suppléer à l'absence de capteurs et de dispositifs de surveillance permettant de repérer un véhicule en difficulté, et fait appel à du matériel embarqué, ou à l'intervention des conducteurs. On a pris garde toutefois de ne pas écarter des fonctions qui semblent reposer normalement sur du matériel embarqué, mais qui n'excluent pas totalement un recueil de données au sol, comme l'autoroute automatique ou l'AICC, et même la surveillance du comportement du conducteur.

L'analyse bibliographique a permis enfin de compléter cette liste, qui figure ci-dessous:

1- Régulation du trafic

- ◆ carrefour isolé
- ◆ réseau urbain
- ◆ exploitation alternée d'un axe (tidal flow)
- ◆ autoroute urbaine- régulation en ligne- contrôle d'accès
- ◆ autoroute rase campagne
- ◆ réseau routier rase campagne

2- Information routière

3- Guidage dynamique

4- Sécurité - protection anticollision

- ◆ avertissement de queues de bouchons
- ◆ protection des zones sans visibilité: virages et sommets de côtes- aides au dépassement
- ◆ avertissement d'interdistances trop faibles
- ◆ avertissement de vitesse excessive
- ◆ anticollision aux carrefours
- ◆ sécurité des piétons - passages protégés
- ◆ sécurité des 2-roues
- ◆ sécurité aux passages à niveau
- ◆ sécurité en tunnel

5- Sécurité par rapport aux conditions météo

- ◆ avertissement verglas et route glissante
- ◆ avertissement brouillard

6- Gestion des accidents/incidents- DAI

7- Planification des déplacements

8- Gestion de la demande - intermodalité

9- Péages

- ◆ autoroutes

- ◆ réseaux urbains
- 10- Gestion du stationnement- parkings et aires de service
- 11- Surveillance de l'environnement: bruit, pollution
- 12- Répression des infractions- surveillance des équipements de sécurité des véhicules
 - ◆ vitesse
 - ◆ feux de croisement et stops
 - ◆ bandes blanches
 - ◆ charge à l'essieu
 - ◆ stationnement illicite
 - ◆ voies prioritaires- voies réservées
 - ◆ pneus dégonflés
 - ◆ feux et signalisation des véhicules
 - ◆ vandalisme
 - ◆ temps de conduite PL
 - ◆ circulation dans voie réservée
- 13- Protection des ouvrages d'art (poids, gabarit)
- 14- Autoroute automatique/AICC
- 15- Maintenance des infrastructures
- 16- Surveillance de l'état du conducteur
- 17- Etudes- recherches- évaluations – statistiques

On trouvera en annexe des fiches établies pour chacune de ces fonctions et indiquant :

- les objectifs
- les principes de réalisation
- le type de recueil de données employé
- les performances demandées
- les besoins non satisfaits en matière de recueil de données.

On a tenu compte du fait que certaines de ces fiches pouvaient faire double emploi avec des fiches « mesures » de l'annexe.

5.1 Besoins ressortant des fiches « fonctions »

Le tableau ci-après fait apparaître les correspondances entre fonctions et besoins de mesure. La signification des lettres figurant dans les cases est la suivante :

a : cette mesure est couramment employée par la fonction

b : cette mesure pourrait éventuellement être employée par la fonction, ou n'a pas été suffisamment étudiée.

Si on rapproche ce tableau du précédent (chapitre 3.3), il apparaît que l'on dispose actuellement de suffisamment de moyens de mesure et de détection pour réaliser la plupart des fonctions énumérées ci-dessus.

	Q	V	T.O	intervalle	densité K	prés/pass.	L queues	niveau traf.	tps trajet	O/D	DAI	DAB	mvts tourn.	chgt voie	poids	gabarit	classif.	identif.	nb. passag.	dét. 2R	dét. piéton	dét. objet	infrac. feu	infrac. stop	infrac. ligne	infrac. sens	pneus	éclairage	brouillard	verglas	vent	précipit.	pollution	bruit			
reg. carref.	a	a	a			a	a						a																								
reg. réseau	a	a	a				a			a			a																								
expl. alt.						a																															
aut. urb.	a	a	a			a	a			a	a	a																									
aut. r.c.																																					
rés.r.c.	a	a	a								b																										
info. rout.	a	a	a						a		a	a						b																			
guid.dyn.	a	a	a						a		a	a						b																			
a/c bouchon							a					a										b															
a/c virages							a					a																									
avert. dist.				a																																	
avert. vitess		a																																			
a/c carref.						a																															
sécu piéton																						b															
sécu 2R																				b																	
sécu PN						a																															
sécu tunnel							a				a	a											b														
verglas																																	a				
brouillard																																a					
gest. incid.											a																										
planif.dépl.	a	a	a		a		a	a	b		b																				a	a	a	a	a		
gest. dem																			b																	a	
intermodalité	b	b							b		b	a																		b	b						
péages aut.	a						a										a	a																			
péages urb.																		b																			
gest. stat.	a																	a																			
environn.																																			a	a	
infractions		a		b		a		a							a	a	a	b					a	b	b	b	b	b									
ouvr. art															a	b																					
AHS/AICC							b				b	b																									
mainten.	a	a													a		a																				
état cond.		b																						b	b	b	b				a	a	a	a	a		
études/rech	a	a	a	a	a		a	a	a	a	a	a	a	a	a		a																				

Il existe cependant quelques besoins non couverts ou mal couverts:

- la fiche « Information routière » fait apparaître que la surveillance des réseaux routiers de rase campagne soulève des difficultés du fait de l'étendue de ces réseaux, et de la faible densité du trafic qui y circule en temps normal, qui ne justifie pas d'importants investissements en matière de recueil de données. Ces réseaux connaissent cependant parfois des difficultés de trafic, et une demande d'informations pourrait apparaître un jour chez les usagers. Il conviendrait de développer des moyens de surveillance de grandes étendues, fondés sans doute sur l'observation aérienne - par ballons, drones, voire satellites - et l'utilisation de capteurs vidéo ou de type radar.
- la fiche « Guidage dynamique routier » fait apparaître que la prédiction des temps de trajet sur sites urbains n'est pas encore bien résolue.
- la fiche « Régulation d'accès sur autoroute » évoque la question de la lourdeur de la détermination et de la mise à jour des matrices O/D. La même question se pose d'ailleurs sur les réseaux urbains. Il serait sans doute intéressant d'examiner comment des procédés nouveaux, tels que la lecture de plaques ou l'utilisation de véhicules « traceurs » pourraient contribuer à faciliter ces mesures.
- la fiche « Péage autoroutier » fait apparaître que la question de la répression des infractions dans les péages multivoies n'est pas encore bien résolue.
- fiche « répression des infractions »: outre la question du pesage dynamique déjà évoquée au chapitre 3, quelques sujets mal couverts sont cités dans cette fiche: détection de stationnement illicite, dégonflage des pneus, par exemple, mais il ne semble pas que ces sujets soient très prioritaires.
- la fiche « AICC et autoroute automatique » soulève la question de la sécurité de la détection de bouchons ou d'obstacles dans des zones mal visibles comme les virages. Cette question est importante, et mérite d'être approfondie.
- la fiche « Sécurité des piétons » fait apparaître qu'il n'existe pas de moyen de détection réellement éprouvé dans ce domaine, bien que quelques réalisations existent sur le terrain.
- la fiche « protection des passages à niveaux » montre que cette protection pourrait être améliorée par une détection d'obstacles ou de véhicules arrêtés sur ces passages. Les moyens techniques existent sans doute, mais leurs performances devraient être validées par des expérimentations.

5.2 Intégration des fonctions

Pendant longtemps les différents systèmes d'exploitation du trafic ont été réalisés de façon indépendante, sans souci des relations pouvant exister entre eux. Cet état de fait était dû à différentes causes, la principale étant sans doute le manque de coordination entre les services chargés de ces systèmes. Une autre cause était l'échelonnement dans le temps des budgets et des réalisations concernant les différentes applications.

La situation est cependant en train de changer sous l'effet des motivations suivantes :

- la recherche d'une meilleure utilisation des équipements qui sont susceptibles de concourir à plusieurs fonctions
- le souci d'assurer un meilleur service aux usagers, notamment en évitant les discontinuités ou les incohérences possibles dans son information
- le souci de développer l'intermodalité dans les transports.

Le concept de gestion intégrée du trafic est devenu un concept très présent dans l'esprit des administrations des transports et du trafic, et qui est en particulier fortement soutenu par les programmes européens.

Ce concept peut recouvrir de nombreux aspects (cf. (127)):

- l'intégration dans une ville du contrôle des feux et de l'information des conducteurs
- l'intégration de la gestion du trafic ville - corridors suburbains

- l'intégration de la gestion du trafic aux niveaux régional, interrégional, voire international
- l'intégration de la gestion du trafic et des transports en commun
- l'intégration de la gestion du trafic et d'autres fonctions, telles le péage, le stationnement ou la répression des infractions.

Parmi les réalisations ou projets illustrant cette intégration, on peut citer:

- le projet COMFORT à Munich qui vise à associer sur l'agglomération la gestion du trafic, la gestion des TC, l'information routière par RDS-TMC, l'aide au stationnement.
- le projet ROMANSE à Southampton associant la gestion du trafic, l'information/guidage des conducteurs, le guidage vers les parkings, et une information multimodale
- le projet 5T à Turin, intégré dans QUARTET +, associant gestion des feux, gestion des TC, information/guidage des conducteurs, guidage vers les parkings.
- les échanges de données réalisés en Région parisienne entre les différents PC (Ville, BP, SIRIUS) en vue notamment de permettre une information des usager à l'échelle de l'agglomération.

Du point de vue du recueil de données deux aspects sont intéressants à considérer:

- l'intégration de fonctions telles que la régulation du trafic ou l'information routière dans 2 zones géographiques voisines. Des données issues de capteurs doivent s'échanger entre les 2 zones, ce qui peut soulever des problèmes de compatibilité lorsque les formats ou les traitements de ces données ne sont pas les mêmes dans les 2 zones. Ce problème risque par exemple de se poser entre les systèmes SIRIUS-Est et SIRIUS-Ouest.
- l'intégration de fonctions distinctes utilisant le même type de mesures, par exemple les fonctions:
 - régulation du trafic
 - information/guidage
 - gestion des incidents
 - péages
 - maintenance des chaussées
 - répression des infractions

Les questions soulevées par une telle intégration sont relatives au bon compromis à trouver pour la localisation des capteurs afin qu'ils répondent aux besoins des différentes fonctions en cause, à la compatibilité entre les formats de données et les performances exigées par les différentes fonctions.

6 Enquêtes auprès des professionnels

Pour compléter le travail bibliographique, un certain nombre d'entretiens ont été menés avec des personnes intéressées par l'exploitation de la route et le recueil de données :

- administration
- exploitants urbains et interurbains
- constructeurs
- bureaux d'étude et organismes de recherche
- opérateurs privés

Afin de permettre l'analyse de ces enquêtes, elles ont été réalisées en suivant une liste de questions, spécifiques à chaque catégorie. Les fiches d'enquêtes et les comptes-rendus d'entretiens sont annexés à ce rapport.

Nous reproduisons ci-dessous une analyse synthétique de l'ensemble ces entretiens.

6.1 Fonctions intéressant les exploitants

Les exploitants que nous avons rencontrés sont surtout intéressés par :

- la régulation de trafic sur réseaux urbains et sur autoroutes (contrôles d'accès notamment)
- l'information routière
- la répression des infractions: si les représentants des exploitants que nous avons consultés se sont généralement déclarés incompetents sur cette question, les représentants de la DSCR considèrent que cette fonction devrait se renforcer dans les prochaines années, surtout en matière de vitesse.

6.2 Mesures intéressant les exploitants

Dans tous les systèmes d'exploitation interviennent systématiquement les mesures de débit et de T.O de vitesse qui servent de base à la régulation de trafic, et à l'évaluation des niveaux de service. Les exploitants se déclarent en outre très intéressés par la DAI et la détection de bouchons, pour les besoins de l'information routière, qui est davantage orientée sur des données événementielles que récurrentes.

Ils s'intéressent également de plus en plus aux données de temps de trajet qui semblent correspondre à une demande forte des usagers. La classification des véhicules intéresse surtout les services de maintenance de la chaussée et les sociétés d'autoroute à péage. Cependant l'idée a été émise que l'information routière pourrait être diversifiée selon la voie concernée, et que la voie de droite pourrait recevoir des informations spécifiques aux PL, ce qui rendrait utile une classification des véhicules en PL/VL.

La détection de piétons pourrait être intéressante pour améliorer les performances de la régulation des carrefours urbains. Les matrices O/D, enfin, apparaissent utiles pour la préparation des stratégies de régulation.

6.3 Performances exigées

Les performances évoquées par les exploitants que nous avons interrogés ne sont pas très sévères, sauf en ce qui concerne la précision de localisation (GPS, odomètre, etc.).

6.4 Position des personnes interrogées par rapport aux capteurs

capteurs à boucles :

Les exploitants sont partagés sur ces capteurs; d'une part ils répondent bien à leurs principaux besoins de mesures; d'autre part ces capteurs sont relativement coûteux à installer et à maintenir. On ne ressent pas cependant l'impression de rejet à laquelle la lecture d'une partie de la bibliographie pourrait faire croire.

analyse d'image vidéo :

Si les exploitants connaissent et utilisent couramment les caméras de TV pour une surveillance visuelle des conditions de trafic, les possibilités de l'analyse d'image ne leur sont pas encore très familières, et l'on ne ressent pas une demande très forte vis-à-vis de ce type de capteur.

autres capteurs non intrusifs :

Ces capteurs sont mal connus des exploitants, qui apprécient mal leurs performances, et expriment quelques réticences concernant les possibilités d'installation qui demandent des supports au-dessus ou au bord de la chaussée.

6.5 Disponibilité des capteurs

D'une façon générale la fiabilité du recueil est une préoccupation majeure des exploitants.

Les personnes interrogées sont d'accord dans l'ensemble sur le taux d'indisponibilité moyen de l'ordre de 15% qui se dégage de l'analyse bibliographique.

Des chiffres plus optimistes nous ont cependant été indiqués par des exploitants: 7% environ pour les capteurs de la Ville de Paris, 2 à 4% pour les capteurs du réseau des CRICR.

La fiabilité des recueils est une préoccupation majeure de la part des exploitants.

6.6 Tendances et perspectives d'évolution

Les principales tendances que l'on peut entrevoir suite à ces enquêtes sont :

- augmentation de la densité du recueil sur la plupart des infrastructures
- intérêt croissant accordé aux mesures de temps de trajet

6.7 Problèmes soulevés concernant le recueil de données

Le coût du recueil

Si les capteurs ne sont pas très chers par eux-mêmes, le recueil de données est considéré comme coûteux, tant sur le plan de l'installation que de la maintenance. Un constructeur nous a rappelé que le capteur « idéal » pour l'exploitant était celui qui se poserait sans travaux et sans support particulier sur les bords de la chaussée, n'exigerait pas de câblage, et serait capable en même temps de fournir toutes les données dont l'exploitant a besoin.

La disponibilité des capteurs à boucles

Ce problème est reconnu, mais ne paraît pas constituer une préoccupation majeure des exploitants. La DSCR a cependant souligné l'intérêt qu'elle portait aux recherches sur le remplacement de données manquantes dans les systèmes de recueil.

Autres problèmes soulevés

- ➔ Les stations SIREDO sont bien acceptées dans l'ensemble et existent à plus de 2000 exemplaires, mais elles ne conviennent pas aux configurations les plus complexes, dans les zones d'échangeurs par exemple. Il n'existe cependant pas de projet de renouvellement de la conception de ces stations.
- ➔ L'observation du trafic par les capteurs conventionnels dans des zones très complexes, comme la Place de l'Etoile par exemple n'est pas bien résolue.
- ➔ La détection de piétons, qui est encore au stade de la recherche, et qui pourrait améliorer l'efficacité des commandes de feux tout en augmentant la sécurité des piétons.
- ➔ La fusion de données
- ➔ L'utilisation de véhicules traceurs
- ➔ La détermination des matrices O/D
- ➔ La mesure des temps de trajet dans les réseaux urbains
- ➔ Besoin de sites d'essais à la disposition des constructeurs l'échelle nationale et européenne.

6.8 Matériel mobile de mesure

Ce type de matériel soulève relativement peu de demande, mais a tout de même été jugé intéressant.

6.9 Besoins en matière de R&D

Des efforts en recherche et développement devraient être fait de manière à résoudre les problèmes identifiés ci-dessus.

7 Aspects économiques

La seule étude spécifique que l'on trouve sur le marché des capteurs est la référence (2) qui prévoit à l'échelle mondiale (Europe de l'Ouest, Amérique du Nord, Asie/Pacifique: Japon, Australie, Hong Kong, Singapour, Nouvelle Zélande) un chiffre d'affaires global sur 1995-2000 de l'ordre de **2,6 B\$**, soit environ 0,5 B\$/an ou 3 MdF/an. Ce chiffre couvre l'infrastructure de recueil (traffic detector infrastructure) et par conséquent pas uniquement les capteurs.

On y voit également que l'Europe de l'Ouest représente actuellement un peu plus de 50% des investissements déjà réalisés, qui se montent à 3,6 B\$.

En partant de ces données, et en admettant que la France représente environ 1/6 de l'Europe de l'Ouest dans ce type d'investissements, on arriverait à un chiffre d'affaires en France de **250 MF/an** environ.

Les résultats de cette étude doivent être utilisés avec précaution. En effet :

- on ne sait pas très bien ce que recouvre la notion de « traffic detectors infrastructure » : capteurs, détecteurs, liaisons, génie civil, stations et interfaces diverses? L'importance de la somme fait supposer qu'elle ne concerne pas uniquement les capteurs et stations de recueil.
- certains éléments apparaissent surévalués: c'est le cas par exemple d'un tableau indiquant le nombre de détecteurs par carrefour signalisé. Selon ce tableau il existerait en Asie/Pacifique 5,22 détecteurs par carrefour à feux équipé de détecteurs (ces carrefours représentant 53,75% des carrefours à feux). Or la référence (3) indique qu'au Japon, sur 52 000 carrefours centralisés on trouve 81 500 capteurs, chiffre nettement inférieur à celui que l'on trouverait en appliquant les ratios de l'ouvrage (2). Les ratios indiqués pour l'Europe conduiraient à un chiffre de plus de 30 000 capteurs pour les carrefours de la Région parisienne, ce qui paraît également un peu surestimé, sachant que la Ville de Paris dispose de 7300 capteurs à boucle et 260 caméras, et que le principal autre grand système de régulation urbaine en service dans la Région, PARCIVAL, représente 2500 capteurs.
- le même rapport prédit enfin que sur 1995-2000 la part des investissements consacrés aux moyens de détection non intrusifs représenterait 40% des investissements réalisés dans le recueil (20% en urbain). Ces chiffres paraissent, au moins en Europe, quelque peu surévalués, malgré le développement incontestable des implantations de caméras TV.

Nous avons par conséquent essayé de recouper le chiffre évoqué pour la France en nous appuyant notamment sur une évaluation du chiffre d'affaires de l'exploitation de la route faite par SODIT dans l'étude (372), et d'informations recueillies verbalement.

Domaine urbain :

Le ratio figurant dans la référence (2) conduit à estimer le nombre de carrefours à feux dans l'hexagone à 44 000, ce qui n'est pas très éloigné du chiffre de 35000 à 40 000 couramment admis par les experts, et le nombre de capteurs à environ 185 000. Ce chiffre doit être un peu surestimé comme nous l'avons vu plus haut, et le chiffre réel doit être plus proche de 120 à 150 000. Les villes sont maintenant bien équipées, et les investissements nouveaux doivent surtout porter sur des opérations de rénovation et de remplacement. En prenant un taux de remplacement annuel de l'ordre de 10 % (le chiffre de 9% figure dans la référence (2)), et en supposant que les opérations nouvelles couvrent quelques milliers de capteurs, on peut estimer le marché annuel en France à 15 000 capteurs environ, soit un chiffre d'affaires de 20 à 25 MF/an pour les capteurs eux-mêmes (sur la base de 1kF pour un détecteur à boucle, et de 6 ou 7kF pour une caméra), et sans doute au moins autant pour les transmissions.

Autoroutes non concédées :

Les investissements dans ce domaine couvrent principalement les corridors autour des grandes agglomérations. Pour se faire une idée du chiffre d'affaires intéressant les capteurs, il est intéressant

d'évoquer la part des investissements qu'ils représentent dans une opération. Peu de chiffres sont publiés sur ce sujet. Dans une étude faite sur SIRIUS-Est (...), on trouve cependant une répartition établie à l'origine du projet, qui faisait apparaître les parts suivantes pour différents équipements :

- capteurs à boucles: 9%
- caméras TV: 4%
- câbles de transmission: 21%
- équipements de transmission: 14%.

Cette répartition montre que les capteurs représentent moins de 15% d'une opération, mais que la part des transmissions, qui servent à la fois pour le recueil de données et pour le retour de signaux de commandes de feux ou de PMV vers le terrain, se monte à 35% : il est difficile d'évaluer la part consacrée au recueil dans ce dernier pourcentage, mais elle en représente certainement beaucoup plus de la moitié compte tenu du rapport entre les nombres d'équipements sur le terrain (650 stations avec capteurs à boucle et 250 caméras, contre 130 PMV et quelques dizaines de contrôles d'accès et de feux d'affectation de voies en tunnel).

Ces opérations sont financées par la DSCR, souvent dans un cadre contractualisé tel celui des plans Etat-Région qui prévoient un partage 50/50 entre l'Etat et la Région. Le budget DSCR étant de l'ordre de 160 MF, on peut en déduire que le budget global annuel se situe entre 250 à 300 MF, dont moins de 15%, soit environ 40 MF dans les capteurs et stations, et probablement de l'ordre de 60 à 70 MF dans les transmissions.

Autoroutes concédées :

L'étude a permis d'estimer à environ 100 MF le budget annuel consacré à l'exploitation de ces autoroutes, partagé entre la signalisation et les péages, soit moins de 15 MF/an pour les capteurs, et un ordre de grandeur de 25 MF pour les transmissions.

A partir de ces évaluations très sommaires, on peut estimer le marché global français à :

- ◆ 70 à 80 MF/an environ pour les capteurs et stations de détection
- ◆ 100 à 120 MF pour les transmissions associées.

On voit qu'on arrive ainsi pour le recueil des données à une estimation plus faible, mais pas d'un ordre de grandeur très différent de celle du rapport (2).

8 Synthèse des résultats

8.1 Conclusions

Si l'abondance des publications peut être considérée comme un indicateur de l'activité de recherche dans un domaine, la R&D en matière de capteurs semble s'être beaucoup développée ces dernières années. La raison principale en est vraisemblablement l'existence des grands programmes internationaux lancés à la fin des années 80. Si DRIVE et le 4^{ème} PCRD n'ont pas beaucoup encouragé la recherche dans ce domaine, il n'en est pas de même d'ITS America et sans doute des programmes japonais qui ont suscité de nombreux travaux sur les capteurs.

Les capteurs sont par ailleurs un élément essentiel des systèmes d'exploitation, et notamment des systèmes d'information/guidage auxquels toute la communauté ITS s'intéresse tout particulièrement depuis quelques années. Leur marché devrait se développer au cours des prochaines années sous l'impulsion des évolutions dans l'exploitation du trafic:

- développement de la régulation en temps réel des réseaux urbains
- densification des systèmes de recueil de données sur routes et autoroutes pour répondre aux besoins créés par le développement de l'information routière et du guidage.

Les enjeux économiques des développements dans ce domaine sont cependant relativement modestes, comme on vient de le voir au paragraphe précédent, et ne justifient pas des investissements de recherche considérables.

Par ailleurs on a pu constater que les capteurs existants, dont il existe une grande variété de modèles, permettent de couvrir les besoins de recueil de la plupart des fonctions susceptibles d'être mises en œuvre dans l'exploitation de la route: s'il n'y a pas lieu de décourager la recherche de nouvelles technologies de capteurs, il est sans doute plus urgent de bien faire connaître aux exploitants les possibilités des capteurs disponibles sur le marché que d'en développer de nouveaux.

Les points les plus saillants qui ressortent de la présente étude sont :

- le développement des applications de la vidéo
- d'une façon plus générale l'intérêt croissant manifesté dans la littérature pour les capteurs « aériens » ou « non intrusifs » - l'intérêt croissant pour les mesures de temps de trajet, lié au développement de l'information routière
- les perspectives de développement des communications mobiles et la possibilité de faire jouer à terme un rôle actif au véhicule dans le recueil de données
- le développement de la microinformatique et la possibilité de concevoir des capteurs « intelligents »
- le développement de méthodes de filtrage et de traitement (réseaux neuronaux p.ex.) permettant des analyses plus fines de données, ou du diagnostic, ainsi que la fusion entre sources indépendantes de données
- les évolutions en matière de communications radio sol - sol : communications courte portée en étalement de spectre, micro-ondes
- l'apparition de réseaux privés de recueil de données, au moins à l'étranger
- la sensibilité croissante des populations aux aspects liés à l'environnement, pouvant conduire à des restrictions sur le trafic qui pourraient demander des contrôles et un recueil de données spécifique
- l'intérêt pour les systèmes de répression des infractions
- l'apparition de fonctions où la sécurité de la détection peut intervenir.

8.2 **Recommandations**

Les principaux thèmes sur lesquels des travaux pourraient être menés dans les prochaines années sont les suivants :

8.2.1 **Meilleure connaissance des capteurs existants**

Il existe actuellement un choix important de capteurs pouvant, sinon se substituer totalement aux boucles inductives, du moins leur apporter un complément utile: par exemple l'installation de capteurs « aériens » pourrait être intéressante lorsqu'un support - mât ou portique - existe à l'endroit où l'on souhaite faire une mesure; de même l'utilisation de capteurs de type magnétométrie pourrait simplifier les travaux de génie civil. Il conviendrait d'améliorer les connaissances des exploitants sur les possibilités et performances de ces différents types de capteurs, y compris des capteurs vidéo.

La marche à suivre pourrait consister:

- à créer, plutôt au sein des services administratifs (SETRA, CERTU, CETE, etc.), un poste – voire une équipe – spécialisé dans les capteurs, dont le rôle serait de recueillir toute l'information publiée dans ce domaine, d'animer des campagnes d'essais, d'entretenir une base de données sur les capteurs, et de diffuser les connaissances auprès des exploitants, et de mieux coordonner la mise au point des normes ;
- à favoriser, comme le font les américains, des expériences en vraie grandeur et de longue durée avec les capteurs existants ou en cours de développement, accompagnées d'observations rigoureuses, afin d'améliorer les connaissances sur les conditions d'installation et d'entretien, et les performances dans des circonstances réelles, de ces capteurs.

8.2.2 **Apport de la vidéo aux différentes fonctions de l'exploitation**

Le traitement d'images vidéo a fait son entrée depuis quelques années sur la scène routière. Ce type de capteur permet d'effectuer la plupart des mesures fournies par les capteurs classiques, et offre en outre, grâce à son grand champ d'observation, la possibilité de mesurer des paramètres pratiquement hors de portée jusqu'à présent: densité de véhicules, longueurs de queues, mouvements tournants aux carrefours, changements de voies, présence de véhicules arrêtés ...etc..

Il conviendrait de réfléchir aux évolutions que l'utilisation de ce capteur va entraîner pour les différentes fonctions de l'exploitation, et notamment pour la régulation du trafic, qui étaient jusqu'à présent conditionnées par les possibilités et performances des capteurs classiques à boucles.

Ces réflexions ont d'ailleurs débuté depuis quelques années avec le lancement du programme « carrefour intelligent » de l'INRETS.

8.2.3 **Utilisation des systèmes de lecture automatique de plaques minéralogiques**

La lecture automatique de plaques minéralogiques commence à être utilisée soit à titre expérimental, soit de façon opérationnelle dans différents pays pour les applications suivantes:

- évaluation de temps de trajet sur autoroutes
- contrôles aux péages
- prévention des infractions sur les vitesses, sur l'utilisation illicite de voies réservées, et sur les temps de conduite des PL.

Il serait intéressant de lancer des expériences en France pour évaluer les possibilités des systèmes existant sur le marché, et de réfléchir aux possibilités d'application de ce moyen de mesure.

8.2.4 Evaluation des temps de trajet en milieu urbain

Les évaluations réalisées sur le Boulevard Périphérique et sur autoroutes urbaines et interurbaines montrent que sur ce type d'infrastructure il est possible de prédire les temps de trajet pour les besoins de l'information routière avec une précision de l'ordre de 10 à 15% qui est jugée satisfaisante par les exploitants.

La prédiction d'un temps de trajet en milieu urbain s'avère plus problématique, compte tenu de l'influence importante des feux sur ce paramètre, et les formules de type BRP ne fournissent que des valeurs très approximatives.

Des recherches restent encore à faire pour développer des modèles tenant compte des feux de carrefours qui permettraient d'obtenir des évaluations plus précises de ces temps de trajet.

8.2.5 Détection des infractions dans les péages multivoies

Il n'existe pas de moyen éprouvé permettant de détecter les fraudes dans les péages multivoies, où il est difficile de repérer un véhicule qui n'aurait pas répondu aux interrogations du système de péage, ou qui afficherait une catégorie erronée.

Bien qu'en France les sociétés d'autoroute s'intéressent essentiellement au péage monovoie, il serait utile d'étudier les moyens de faire fonctionner des péages multivoies dans l'hypothèse où l'idée d'instaurer des péages urbains se concrétise un jour .

8.2.6 Fusion de données, estimation, prédiction

Le terme de fusion de données a remplacé celui d'estimation, bien connu des automaticiens. La fusion de données est une notion aussi vieille que la civilisation, et chacun la pratique couramment, par exemple en confirmant l'heure fournie par sa montre par un coup d'œil sur une pendule publique, ou en vérifiant le poids fourni par une bascule à l'aide d'une autre bascule. Plus sérieusement les marins l'ont pratiquée dès les origines de la navigation, en utilisant des données diverses telles que l'observation des astres, l'utilisation de repères ou « amers » côtiers, et l'estime, pour essayer de trouver leur position. C'est d'ailleurs autour de problèmes de navigation d'avions, de missiles ou de navires, que se sont développées les méthodes dites d'estimation, de filtrage et de prédiction.

Ces exemples font apparaître les 2 classes de données que l'on peut être amené à fusionner:

- ◆ données « homogènes » provenant de dispositifs de mesure de même type
- ◆ données « hétérogènes » provenant de sources diversifiées.

De nombreuses méthodes ont été expérimentées pour pratiquer la fusion de données, depuis la règle de trois et les calculs de moyennes, jusqu'au filtrage de Kalman et aux méthodes statistiques les plus perfectionnées, et plus récemment aux méthodes de la logique floue et des réseaux neuronaux.

Si ce sujet a donné lieu depuis plusieurs dizaines d'années à un nombre abondant de travaux, de publications, et d'applications, il a encore été peu abordé dans le domaine du trafic, et généralement avec peu de succès.

Avec la multiplication des sources d'informations - capteurs à boucles, capteurs non intrusifs, analyse d'images vidéo, véhicules équipés ...etc.- à laquelle on devrait assister sur les routes dans les années qui viennent, l'intérêt de ce sujet devrait fortement croître, et il paraît important d'y consacrer un programme de recherche de longue haleine.

Les applications concernées sont nombreuses, par exemple:

- ◆ diagnostic de bon fonctionnement de capteurs
- ◆ association dans un même système de données provenant de capteurs de différents types, par exemple boucles et vidéo
- ◆ remplacement de données de capteurs manquants ou défectueux
- ◆ mesures de temps de trajet en associant les données de capteurs fixes et de véhicules « traceurs »
- ◆ évaluation de niveaux de service en associant capteurs fixes et véhicules équipés

- ◆ combinaison d'algorithmes de DAI en mettant en œuvre dans chaque situation de trafic l'algorithme le mieux adapté à cette situation.

Ce programme de recherche devrait associer des spécialistes du trafic et des spécialistes de la fusion de données, ainsi que des exploitants. Il devrait débiter par des expérimentations de taille limitée, mais dans des conditions réelles, pour bien faire apparaître les potentialités et limitations des méthodes existantes, et les directions dans lesquelles les recherches devraient se poursuivre.

8.2.7 Prise en compte de véhicules « traceurs » dans le recueil de données

Jusqu'à présent l'utilisation de véhicules équipés ou « traceurs » comme sources de données sur le trafic a surtout eu un caractère expérimental. On peut citer par exemple:

- ◆ les expérimentations menées avec le système ALI-SCOUT à Berlin avec environ 650 véhicules équipés
- ◆ les expérimentations menées dans quelques agglomérations aux Etats-Unis
- ◆ l'utilisation de taxis comme véhicules traceurs par Mediamobile

Deux modes de communication et de localisation peuvent être envisagés dans de tels systèmes:

- ◆ des communications sol-véhicules par liaisons à courte portée comme à Berlin, qui permettent à la fois les échanges de données et la localisation du véhicule, mais qui nécessitent une infrastructure relativement lourde
- ◆ l'association d'une localisation GPS et d'une liaison radio, comme chez Mediamobile. Seuls les flottes professionnelles commencent à être équipées de tels ensembles.

La tendance est au développement de l'équipement des véhicules, soit en liaisons à courte portée pour les besoins du péage, soit en moyens de localisation ou de navigation, susceptibles d'être associés avec des liaisons GSM. On peut par conséquent se demander si dans quelques années il ne sera pas possible de faire appel à des véhicules privés pour jouer le rôle de traceurs. Une telle perspective soulève cependant beaucoup de questions sur lesquels les réflexions sont peu avancées:

- Questions institutionnelles

- ◆ comment inciter les conducteurs à participer à de telles opérations ?
- ◆ confidentialité des données recueillies- compatibilité du système avec la loi « Informatique et liberté ».

- Questions opérationnelles:

- ◆ quels types de mesures ces véhicules traceurs pourront-ils favoriser? Il est évident qu'ils pourront servir au premier chef à la détermination des temps de trajet et des vitesses, et sans doute des O/D. Mais ils pourraient également, sous certaines conditions, contribuer à d'autres mesures: débits, concentration, taux d'occupation, classification, niveaux de service, DAI, etc.
- ◆ quels taux minimaux d'équipement et de participation de ces véhicules seraient nécessaires pour permettre la mesure de ces différentes données de trafic ?
- ◆ possibilité de faire usage dans l'immédiat de données fournies par les flottes professionnelles: taxis, bus, PL.
- ◆ substitution ou complémentarité véhicules traceurs/capteurs fixes ?

- Questions techniques

- ◆ conception des équipements des véhicules « traceurs »: du point de vue du véhicule il s'agit en fait d'une nouvelle fonction qui s'appuiera à la fois sur les dispositifs d'aide à la navigation et de localisation, et sur les liaisons sol - véhicules, mais qui ne semble pas avoir été vraiment prise en compte jusqu'à présent par les constructeurs d'automobiles et les fabricants d'équipements.
- ◆ mode de communication et mode d'interrogation des conducteurs: les liaisons à courte portée en cours de développement pour les péages devraient pouvoir permettre des interrogations & réponses à partir de balises situées en bord de route, à condition que cette fonction soit bien prise en compte dans les spécifications de ces liaisons; par contre le

GSM actuel se prête difficilement à des interrogations systématiques de véhicules, et il faudra sans doute attendre la prochaine génération (GATS) pour disposer de ces facilités. Par ailleurs il faudra encore du temps pour qu'un pourcentage significatif de véhicules privés soient équipés à la fois de GPS, ou d'autres moyens de localisation, et d'une liaison téléphonique associée.

- ◆ fusion des données fournies par les capteurs fixes et par les véhicules traceurs.

Toutes ces questions devraient l'objet d'un programme de recherche à moyen terme.

8.2.8 Surveillance de réseaux de grande étendue

Les réseaux routiers de rase campagne sont beaucoup trop étendus, et connaissent un nombre beaucoup trop faible d'incidents ou de situations de trafic difficiles, pour pouvoir être équipés de façon rentable de moyens de détection et de mesure au sol suffisamment denses pour permettre une bonne évaluation des conditions de trafic. Avec les développements de l'information routière on risque cependant de voir émerger à terme une demande pour que cette information couvre également ces réseaux. Il convient par conséquent de réfléchir aux moyens qui pourraient être utilisés pour recueillir, au moins pendant les périodes les plus chargées, des données sur la circulation et sur les incidents éventuels survenant sur ces réseaux :

- ◆ Capteurs de vitesse bon marché
- ◆ Surveillance par satellites, ballons ou drones
- ◆ Utilisation d'informations fournies par les conducteurs.

La surveillance de réseaux urbains de grande étendue par des moyens aériens devrait être examinée et une étude de faisabilité entreprise. Elle permettrait de connaître les possibilités actuelles des drones (hale ou non) tant pour la collecte d'information 'instantanée' que la 'validation' de situations critiques.

8.2.9 Sécurité des moyens de détection des véhicules

Les réalisations actuelles dans le domaine de l'exploitation de la route soulèvent peu de difficultés en matière de sûreté de fonctionnement, et les seules sécurités existantes dans les équipements routiers sont celles relatives aux « verts en croix » et aux durées de feux pour les piétons dans les commandes de feux de carrefours.

Quelques applications évoquées dans la littérature laissent cependant pressentir qu'il pourrait être nécessaire de garantir le niveau de sécurité de certaines mesures. C'est le cas par exemple:

- ◆ d'un système d'annonce de queues de bouchons dans des virages d'autoroutes japonaises, avec une précision de l'ordre de 100 m. Dès lors que l'on approche de telles précisions, des erreurs de mesure sont susceptibles de créer des situations dangereuses, et pourraient mettre en cause la responsabilité de l'exploitant, qui aurait donc tout intérêt à homologuer rigoureusement son dispositif de mesure
- ◆ de la détection des obstacles et queues de bouchons dans les zones sans visibilité - virages ou sommets de côtes - pour assister les systèmes de type AICC ou autoroute électronique dans ces zones. La responsabilité de l'exploitant pourrait être engagée en cas d'accident survenant par suite d'une détection erronée.

Il serait intéressant de lancer des recherches sur ce thème dans le but:

- ◆ de déterminer les applications et situations pour lesquelles la sécurité du recueil de données peut être en cause
- ◆ de définir les niveaux ou « objectifs » de sécurité à respecter
- ◆ de réfléchir aux moyens à mettre en œuvre pour satisfaire ces objectifs de sécurité.

8.2.10 Meilleure connaissance des moyens de transmission utilisables dans la chaîne du recueil de données

Comme on l'a vu dans ce rapport les moyens et capacités de transmission utilisables dans la chaîne du recueil de données se développent sans cesse et il est difficile pour les exploitants de suivre ces évolutions.

Il serait par conséquent utile, comme cela a été suggéré plus haut pour les capteurs, d'établir, et de tenir à jour un catalogue, ou une base de données sur ces moyens, sur leur coût, sur leurs conditions d'installation et de maintenance, en l'illustrant par des exemples d'installations françaises ou étrangères.

8.2.11 Recensement des équipements existants

L'étude des enjeux économiques du recueil de données nous a amenés à essayer d'en évaluer le marché, et, à cette fin, de recenser les équipements en service. Cette recherche nous a permis de constater qu'il n'existait aucune source en France permettant d'appréhender ces données, alors que par exemple au Japon les services de la Police semblent capables d'indiquer à la centaine près combien il existe de carrefours à feux à commande centralisée dans les villes japonaises, et combien de capteurs de différents types sont employés (voir (3) p.ex.).

Il y a là une lacune qu'il serait utile de combler.

8.2.12 Pesage dynamique

Quelques thèmes de recherche se dégagent sous cette rubrique :

- amélioration de la précision des mesures faites par les capteurs au sol
- véhicules « actifs », équipés de dispositifs de pesage embarqués et de dispositifs de communication sol - véhicules
- étude de la possibilité d'instrumenter les structures de ponts.

8.2.13 Détection de piétons et 2 roues

Il n'existe pas de moyens très éprouvés permettant d'assurer cette détection. Compte tenu de l'intérêt porté à la sécurité des piétons et de l'extension des pistes cyclables, le besoin de détecter piétons et 2-roues dans les carrefours et à leurs approches pourrait se développer et il conviendrait de faire un inventaire des technologies de capteurs utilisables pour cette détection - vidéo, radars, infrarouge, ultrasons, etc.- et de les valider.

8.2.14 Détection des conditions météorologiques

Deux thèmes pourraient être approfondis dans ce domaine :

- mesure des températures de chaussée par fibre optique
- recherche du meilleur compromis entre l'utilisation de stations fixes et de moyens mobiles.

8.2.15 Evolution des technologies micro-ondes

Les résultats obtenus en matière de DAI par les radars en cours de développement BEATRICES et ARMADA, et tout particulièrement par ARMADA, sont intéressants. Les prix annoncés pour ces capteurs sont cependant élevés, et il conviendrait:

- d'une part d'obtenir des constructeurs des prévisions objectives sur les perspectives d'évolution de ces coûts

- d'autre part de procéder à une évaluation comparative approfondie de ces capteurs et des caméras vidéo avec traitement d'image, tant sur le plan des performances que de la facilité d'installation, de la fiabilité, et du coût.

Par ailleurs il convient de suivre attentivement les développements en cours sur les radars anti-collision embarqués, qui doivent conduire à des produits à la fois sophistiqués et bon marché, et d'examiner si ces développements ne pourraient pas avoir des retombées dans le domaine des capteurs de trafic.

8.2.16 Collecte d'événements

Les événements de trafic prennent une grande place dans le trafic, surtout en situation de crise. Il est donc essentiel de noter, qualifier, transmettre les événements (incidents, travaux, bouchons, etc.), concernant l'ensemble de la voirie.

La saisie des événements se fait actuellement de manière manuelle (main courante, etc.), mais leur collecte automatique semble difficile. Cependant une recherche méthodologique dans ce sens (systèmes experts, solutions militaires, etc.) serait utile dans différents domaines, tels que la commande du trafic, les systèmes d'information pour les usagers, etc..

9 Annexes