

Rapport d'étude

Détection Automatique d'Incident

Principes, technologies, éléments d'évaluation économique

Page laissée blanche intentionnellement

Sommaire

CHAPITRE 1 : PRINCIPES ET PRINCIPALES TECHNOLOGIES UTILISÉES.....	5
1.1 -Enjeu et outils de surveillance.....	6
1.2 -Objectifs de la DAI.....	6
1.3 -Principes de détection	7
1.4 -Types de DAI.....	8
1.5 -Quelques éléments pour l'analyse de pertinence.....	11
CHAPITRE 2 : ÉLÉMENTS D'ÉVALUATION SOCIO-ÉCONOMIQUE.....	13
2.1 -Introduction.....	14
2.2 -Principe général.....	14
2.3 -Hypothèses de calcul.....	18
2.4 -Résultats préliminaires.....	23
2.5 -Tests de sensibilité.....	24
2.6 -Éléments de synthèse.....	29
2.7 -Tentative de rapprochement avec des données d'incidentalité.....	30
2.8 -Limites et approfondissements.....	32
BIBLIOGRAPHIE.....	35
GLOSSAIRE.....	36

Introduction

Dans les années 60, les premiers systèmes de Détection Automatique d'Incidents (DAI) sont apparus et reposaient sur le traitement des données de débit, taux d'occupation, vitesses fournies par des stations de détection à boucles. Aux prémisses de la DAI, la notion d'incidents était restrictive et ne recouvrait que les événements ayant des conséquences sensibles sur l'écoulement du trafic et par conséquent sur ces données.

La DAI est maintenant plus largement utilisée comme aide à l'optimisation des réseaux. Elle constitue un outil permettant d'évaluer et de gérer le trafic routier [1]. Elle vise à permettre aux exploitants de réagir à tout moment sur les autoroutes, les zones péri-urbaines et dans les tunnels en cas d'incidents ou d'accidents. Son premier objectif est de réduire les délais de détection des incidents, et donc d'adapter les mesures de secours, de mise en sécurité et de gestion de trafic de manière à réduire les impacts des incidents.

La DAI utilise des dispositifs techniques de boucle, vidéo, radar, etc..., qui se diversifient.

La DAI, si elle présente des avantages en termes de gestion de trafic et de sécurité, présente aussi des coûts, essentiellement pour l'installation et la maintenance des systèmes. Il est intéressant de pouvoir mettre en regard les coûts et les avantages de la DAI, afin d'apprécier les conditions de trafic et les réseaux sur lesquels la DAI paraît particulièrement pertinente.

La DAI, du fait que ses avantages se mesurent assez directement par leur effet sur les délais de traitement des incidents, est probablement une des modalités de gestion dynamique de trafic qui se prête le plus à l'évaluation coûts-avantages.

Ce rapport vise à apporter deux types d'éclairage sur les systèmes de détection automatique d'incidents, en s'appuyant notamment sur le guide technique de l'INRETS, paru en 2005 « Systèmes et méthodes de détection automatique des incidents routiers » [2] :

- dans un premier temps, il rappelle comment la détection d'incidents s'inscrit dans le cadre plus large de la gestion de trafic et de l'information des usagers et il dresse un panorama succinct des technologies et de leurs critères de performance ;
- dans un second temps, il propose un cadre méthodologique pour l'évaluation socio-économique [3] coûts-avantages de la DAI. Un exemple illustre l'utilisation de ce cadre méthodologique.

Ce rapport, et notamment sa partie consacrée à l'évaluation coûts-avantages, n'a pas pour objectif de fixer les domaines de pertinence (c'est-à-dire de rentabilité socio-économique) de la DAI. Il s'agit avant tout d'illustrer en quoi la connaissance actuelle des coûts et des impacts de la DAI sur la gestion de trafic, permet d'ébaucher une analyse coûts-avantages, et, au-delà, d'identifier les principaux paramètres-clés de cette évaluation, pour lesquels les connaissances méritent d'être approfondies. Ce rapport n'a donc pas vocation à recommander le déploiement de tel ou tel type de DAI sur tel ou tel type de réseau ou configuration de trafic.

Chapitre 1 : Principes et principales technologies utilisées

1.1 - Enjeu et outils de surveillance

La gestion du trafic routier pour l'optimisation de l'utilisation des réseaux suppose notamment de traiter au mieux les situations dans lesquelles la viabilité du réseau est dégradée par la survenance d'incidents.

Pour pallier ce type de dégradation, il est nécessaire de surveiller pour détecter puis traiter le plus rapidement possible un incident.

Un des enjeux liés à cette mission particulière du maintien de la viabilité est donc l'optimisation des durées de détection d'un incident, afin de minimiser la gêne à la circulation et le risque encouru par les usagers et les agents d'exploitation.

De manière classique, un service d'exploitation se base pour la surveillance de son réseau sur le patrouillage des agents d'exploitation dont la fréquence de passage en un point du réseau dépend de l'importance de celui-ci et du nombre d'agents disponibles.

Il se base également sur l'alerte émise par les partenaires (forces de l'ordre par exemple) ou par les usagers eux-mêmes.

Enfin, pour les réseaux d'importance (autoroute, routes nationales, voies urbaines), où les enjeux de trafic et sécurité routière sont élevés, un service d'exploitation va pouvoir compter, outre les partenaires, sur :

- les postes d'appel d'urgence ;
- les caméras de surveillance.

Tous ces moyens d'alerte en cas d'incident sont plus ou moins réactifs et lorsque le trafic atteint des niveaux très élevés, tels que le moindre incident provoque une congestion immédiate ou un fort risque de sur-accident, il convient de trouver d'autres outils. C'est en général la raison d'être de la Détection Automatique d'Incident (DAI).

1.2 - Objectifs de la DAI

Dans la définition des niveaux de service offerts aux usagers, le traitement des incidents est clairement un objectif des services gestionnaires des infrastructures. Sa performance donne lieu à des évaluations.

On décompose schématiquement l'efficacité de traitement d'un incident en 2 phases :

- le délai nécessaire pour donner d'alerte ;
- le délai nécessaire pour l'intervention.

Les services gestionnaires visent à optimiser ces délais, à l'aide des moyens matériels et humains dont ils disposent [4].

La DAI est un moyen matériel pour améliorer le délai d'alerte. Cette technologie permet de réduire le temps de traitement d'un incident et donc de :

- réduire la congestion due aux incidents ;
- réduire le risque de sur-accident.

Elle permet également d'avoir connaissance des problèmes sur le réseau le plus rapidement possible, donnant ainsi la possibilité d'en informer les usagers si nécessaire.

Les principales fonctions intéressées sont :

- la régulation du trafic ;
- l'information / le guidage ;
- la gestion des services d'intervention ;
- la sécurité routière.

La DAI fait partie d'une chaîne de gestion constituée de quatre éléments :

- la détection d'incidents ;
- l'information aux usagers ;
- le traitement de l'incident ;
- la gestion du trafic.

La DAI vise à identifier les causes et les conséquences de perturbations du trafic afin de limiter les effets négatifs dans le domaine de la sécurité, l'efficacité du système routier et de l'environnement. Le présent rapport ne traite que de l'efficacité du système routier.

1.3 - Principes de détection

La DAI consiste à mettre en évidence, grâce à une détection rapide, un événement qui apparaît sur le réseau routier et qui génère une perturbation du trafic. On distingue schématiquement deux modalités de détection :

- détection directe de l'événement,
- détection des impacts de l'événement sur le trafic (ralentissements, bouchons, modifications de la répartition du trafic entre voies, modification des trajectoires des véhicules).

Le principe de la DAI est basé sur la quasi-instantanéité de la détection, grâce le plus souvent à des outils informatisés utilisant des algorithmes complexes intégrés dans des capteurs.

Selon le système de DAI utilisé, plusieurs types d'incident peuvent être détectés avec plus ou moins de difficultés, selon les types d'incidents et les technologies employées :

- obstacles sur la chaussée ;
- piéton sur la chaussée ;
- véhicule à l'arrêt ;
- ralentissement / congestion ;
- véhicule à contre-sens.

1.4 - Types de DAI

Trois grandes familles de système DAI existent : les systèmes basés sur des capteurs intrusifs, les systèmes basés sur des capteurs non intrusifs, et les systèmes basés sur les capteurs coopératifs. Les principes de ces capteurs ne seront que brièvement décrits ici ; pour plus d'informations, le rapport « Panorama des systèmes de recueil de données », publié par le Sétra en 2012 [5], détaille les différentes technologies citées dans ce paragraphe.

1.4.1 - DAI capteurs intrusifs

Les capteurs ponctuels qui détectent directement les incidents (les capteurs de choc, installés dans des glissières de sécurité, par exemple) sont d'un usage marginal et spécifiques à des points de fort enjeu, compte tenu de leur coût.

D'autres types de capteurs détectent les effets de l'incident et non l'incident lui-même. En ce sens, ces capteurs ne sont pas spécifiquement dédiés à la DAI, mais plus globalement à la connaissance et à la gestion de trafic (plutôt « hors incident »). Parmi les capteurs ponctuels, on trouve :

- les capteurs à boucles électromagnétiques (boucles traversées par un faible courant dont les variations magnétiques induites par les véhicules impliquent une variation de courant dans la boucle) ;
- les capteurs magnétiques (capteurs intrusifs qui détectent le champ magnétique des véhicules passant au-dessus de la chaussée de manière passive).

La DAI sur capteur ponctuel consiste à utiliser les données de trafic enregistrées sur ces capteurs et de déceler des différences entre celles-ci qui ne peuvent pas s'expliquer par un écoulement normal. Autrement dit, le principe ici est de détecter des anomalies dans la circulation qui sont dues à des incidents. Par exemple, selon la technologie de capteur utilisé et des algorithmes mis en place, un capteur ponctuel pourra tout aussi bien détecter les contre-sens que les congestions (de manière décalée dans le temps).

Par définition, tous les incidents ne sont pas détectés puisque certains ne produisent pas de gêne à l'écoulement.

1.4.2 - DAI capteurs non intrusifs

Un capteur non-intrusif est un élément installé en accotement de chaussée, sur mâts ou portiques. Pour ce type d'équipements, il n'est *a priori* pas nécessaire d'effectuer de travaux sur la chaussée. Pour autant il est parfois nécessaire d'installer le support, même si les supports existants peuvent souvent être mutualisés.

On peut schématiquement distinguer cinq familles de capteurs selon le type de signal utilisé :

- les capteurs à ultrasons (capteurs qui émettent des ultrasons et en réceptionnent les échos) ;
- les capteurs soniques (capteurs qui récupèrent le bruit ambiant de la circulation) ;
- les capteurs laser (capteurs qui envoient un signal infra-rouge et réceptionnent sa réflexion) ;
- les radars ponctuels (qui envoient des ondes radios et les réceptionnent après contact avec les véhicules) ;
- les caméras vidéos (qui enregistrent un flux d'images continu et les traitent).

On peut également citer des dispositifs mixtes utilisant des caméras avec émulation de boucles sur image (caméra vidéo qui crée des zones de détection des véhicules pour simuler des boucles de recueil de données).

À noter que les capteurs non intrusifs peuvent être utilisés soit de manière ponctuelle (sur les points sensibles par exemple), soit en déploiement dit « linéaire » sur une section. Le déploiement linéaire permet notamment, par le rapprochement des informations transmises par plusieurs capteurs en séquence, d'améliorer la qualification de l'événement, lorsque celui-ci a une extension géographique (bouchon, conducteur à contresens, entre autres).

À titre illustratif, parmi ces familles de capteurs, l'utilisation des capteurs vidéo en détection automatique d'incidents permet de concentrer sur un seul capteur :

- la détection ;
- la validation ;
- l'alarme ;
- l'identification de l'incident.

La DAI vidéo consiste par un traitement d'image à alerter l'opérateur de trafic sur les événements qui surviennent sur le réseau routier qu'il surveille. Ce traitement d'image est réalisé sur les caméras de surveillance implantées régulièrement sur le réseau. Son principe est de détecter tout objet statique présent sur les voies de circulation (cas d'une voiture en panne) ou tout objet en mouvement qui n'est pas un véhicule (cas d'un piéton présent sur la chaussée). Cette détection génère une alerte qui peut être instantanément envoyée au poste de commande de l'opérateur.

On distingue principalement deux types de capteurs pour les caméras, selon qu'elles possèdent un capteur CMOS (Complementary Metal Oxyde Semiconductor) ou un capteur CCD (Charge Coupled Device).

Le capteur est un composant électronique permettant de retraduire une image lumineuse en signaux électriques qui seront ensuite codés et compressés afin de donner une image en pixels. En effet, la surface du capteur intègre une couche de silicium qui va réagir à l'action des photons et la traduire en grandeur électrique.

Le capteur CCD est plus sensible à la lumière, et il a tendance à mieux fonctionner dans des conditions d'éclairage variable. De plus, il offre une meilleure qualité d'image même utilisé lors d'un faible éclairage. Par contre, il offre des résolutions HD (1280x720 pixels) où le capteur CMOS, lui offre des résolutions Full HD (1920x1080 pixels).

Caractéristiques métrologiques	CCD	CMOS
Résolution	Comparable	
Taille des pixels	Comparable	
Sensibilité	Élevée	Moyenne
Bruit	Faible	Élevé
Risques de saturation	Élevée	Faible
Rapidité	Grande	Très grande

Les performances des caméras dépendent des conditions d'éclairage et sont donc très sujettes aux problèmes de nuit. Il faut également bien faire attention au calage initial et à ne pas mettre la caméra dans l'axe direct d'un lever ou un coucher de soleil qui peut éblouir le capteur et le rendre donc inutile pendant ces périodes-là. Ces points sont donc particulièrement sensibles lors du positionnement de la caméra.

1.4.3 - DAI capteurs coopératifs

Les systèmes embarqués peuvent également servir de vecteurs de transmission de l'information, collectée par les véhicules « détecteurs », soit directement aux véhicules approchant soit à un centre de gestion de trafic via une unité de bord de voie. La DAI par systèmes ou capteurs coopératifs est fondée sur la contribution des véhicules eux-mêmes (et donc de leurs conducteurs) à la détection de l'incident. L'« anomalie » détectée par un ou plusieurs véhicules (vitesse anormale, changement brusque de file, freinage brutal, perte d'adhérence, ou absence d'un véhicule entré sur une section à la sortie de la zone...) concourt à qualifier un incident. L'anomalie peut également être signalée par le conducteur lui-même, s'il aperçoit une anomalie dans le trafic ou sur l'infrastructure (obstacle mobile, obstacle fixe, véhicule à contre-sens...)

Dans tout système coopératif, l'intelligence est partagée entre le véhicule et son environnement. Les véhicules sont en communication entre eux et avec l'infrastructure routière ; ce qui permet une fiabilité de l'information sur l'état du réseau routier. L'Illustration 1 représente le principe des systèmes coopératifs.

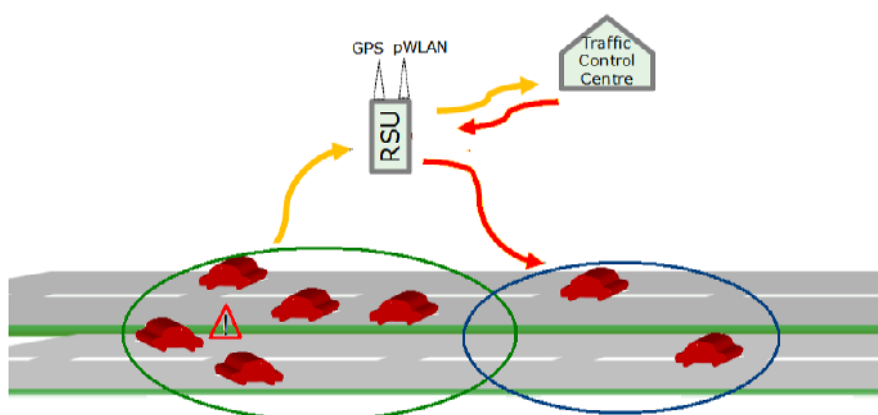


Illustration 1: Système coopératif avec signal d'un incident pour les suivants

La qualification de l'événement par systèmes coopératifs (en fonction notamment du nombre de véhicules détecteurs) constitue une dimension de complexité de ces systèmes par rapport aux DAI ponctuelles décrites ci-dessus.

1.5 - Quelques éléments pour l'analyse de pertinence

Les paragraphes ci-dessous présentent, de façon qualitative, quelques critères pouvant être utilisés pour déterminer la performance des principaux types de capteurs pour la DAI.

La performance de la détection automatique d'incidents peut, en synthèse, être qualifiée par trois critères :

- le taux de détection (TD) : le rapport entre le nombre d'incidents détectés et le nombre d'incidents détectables : mesure de la sensibilité du système ;
- le taux de fausse alarme (TFA) : le rapport entre le nombre de fausses alarmes rapporté et le nombre total d'alarmes : mesure de la probabilité qu'une alarme soit fausse ou la fréquence de fausse alarme (FFA) : le nombre de fausses alarmes rapportées à l'unité de temps : gênes occasionnées par les fausses alarmes à l'opérateur ;
- le délai de détection (DD) : le laps de temps qui s'écoule entre la survenue de l'incident et sa détection.

La performance de la détection automatique d'incidents porte sur l'ensemble de la chaîne de détection, qui comporte les capteurs, la transmission, le traitement de l'information (dont les algorithmes). À noter qu'une grande part de la performance est portée par des algorithmes, surtout au sein de systèmes comportant plusieurs capteurs. La performance des algorithmes est elle-même liée à la capacité de stockage et de traitement des données historiques ou grâce auxquelles l'anomalie est détectée. Outre la fiabilité et le calibrage du capteur, la performance de la DAI est influencée par plusieurs paramètres d'environnement du capteur qui agissent différemment selon le type de capteur, comme le décrit le tableau suivant :

Capteurs		Principaux paramètres de performances des capteurs				
		Densité du trafic	Conditions d'environnement	Physionomie du trafic	Densité de mesures / Position des capteurs	Taux d'équipement de véhicules
Capteurs intrusifs	Boucles électromagnétiques					
	Capteurs magnétiques				x	
	Capteurs de choc				x	
Capteurs non intrusifs	Capteurs ultrasons				x	
	Capteur infrarouge				x	
	Soniques			x	x	
	Vidéo	x	x	x	x	
	Radars ponctuels				x	
Capteurs coopératifs	Dispositif embarqué	x				x
	Cartes de péages	x	x		x	x
	Caméra (Lapi)		x			

La performance de la DAI de tous les capteurs ponctuels dépend évidemment de la densité de capteurs présents sur la section étudiée. Et quasiment tous les capteurs nécessitent des algorithmes adaptés. De même les calibrages nécessaires au moment de l'installation des capteurs sont déterminants (dans ces calibrages, il est également pris en compte les maintenances régulières à avoir pour garder un niveau de fiabilité des données importantes).

Pour les caméras, les conditions extérieures, comme la météo peuvent avoir un impact important sur la performance de la DAI, c'est pourquoi les caméras qui servent de DAI sont souvent plus performantes dans les tunnels où l'environnement est contrôlé sauf en cas d'incident. De manière intrinsèque, les capteurs coopératifs (hors LAPI) nécessitent d'avoir une flotte suffisamment équipée afin de récupérer une information assez fiable.

Les caméras linéaires de DAI sont généralement affectées par la densité de trafic du fait que le traitement de l'image est plus délicat, alors qu'au contraire cette densité est souvent un signe positif pour les systèmes coopératifs (hors LAPI). La physionomie de trafic (différence VL/PL et changements de voie plus ou moins fréquents, entre autres) a un impact sur les capteurs soniques, et sur les caméras (avec les effets de masque et/ou la difficulté de suivre correctement sans fausse alerte les changements de voie brutaux, par exemple).

Capteurs		Natures des incidents						
		Arrêt	Ralentissement	Congestion	Véhicule lent	Véhicule à contre-sens	Piéton	Débris
Capteurs intrusifs	Boucles électromagnétiques		X	X		(X)		
	Capteurs magnétiques		X	X		(X)		
Capteurs non intrusifs	Capteurs de choc							
	Capteurs ultrasons	X		X	X	X		
	Capteur infrarouge	X		X	X	X	X	
	Soniques							
	Vidéo	X	X	X	X	X	X	X
	Radars ponctuels	X	X	X	X	X	X	
Capteurs coopératifs	Dispositif embarqué	X	X	X	[X]	[X]	[X]	[X]
	Cartes de péages		X	X				
	Caméra (Lapi)		X	X				

(X) : des progrès sont à attendre dans ce domaine, et les recherches actuelles laissent à penser que ces capteurs pourront très bientôt avoir ces fonctionnalités.

[X] : l'alerte manuelle coopérative peut être, par extension, incluse dans les systèmes coopératifs embarqués ; elle peut couvrir les incidents signalés par les conducteurs.

L'objet de cette partie n'est pas de proposer une analyse de pertinence des différents systèmes de DAI en fonction d'incidents ou d'événements recherchés. Plus modestement, le tableau précédent se propose d'indiquer quels types d'incidents ou d'événements sont *a priori* « à la portée » des différents capteurs de DAI. Pour aller au-delà dans l'analyse de performance, les tableaux ci-dessus suggèrent qu'il convient d'abord de bien qualifier la variété et la typologie des incidents et événements auxquels la DAI vise à réguler :

- de faire le lien entre les objectifs de détection d'une part et les objectifs de gestion de trafic des incidents d'autre part, certains capteurs ayant clairement des fonctionnalités communes à ces deux objectifs ;
- d'analyser le caractère plus ou moins « linéaire » de la problématique de détection : dans certains cas, les enjeux de détection peuvent être *a priori* « équi-répartis » sur le linéaire du réseau, dans d'autres cas, ils peuvent être concentrés sur des points singuliers, en raison de leur vulnérabilité, ou bien des caractéristiques du trafic ;
- de tenir compte des coûts des différentes technologies et, à l'intérieur de ce critère, du parc d'équipements éventuellement déjà installés.

Le chapitre suivant s'efforcera de prolonger la grille d'évaluation ci-dessus par une évaluation socio-économique. Il s'intéresse, dans un objectif illustratif, au cas *a priori* le plus simple, le plus éprouvé du point de vue des performances techniques : celui de la DAI vidéo linéaire.

Chapitre 2 : Éléments d'évaluation socio-économique

2.1 - Introduction

La DAI analysée dans ce chapitre est celle portée par des caméras. Les DAI effectuées par des capteurs, bien que possibles, offrent souvent des résultats moins probants (car la détection est souvent plus lente) et ne forment pas le cœur de la présente étude.

Pour tester une approche socio-économique de la pertinence de la DAI, l'analyse ne portera que sur les gains de temps de parcours, et de fiabilité de temps de parcours. Les sur-accidents devraient en théorie être pris en compte dans les calculs, mais leur caractère est trop aléatoire, et leur niveau d'apparition est insuffisamment connu d'un point de vue statistique pour être intégré dans cette approche. Dans le même ordre d'idées, ne sont pas pris en compte ici des dommages (corporels, économiques ou sur l'environnement), des accidents eux-mêmes, même si, dans certains cas (tunnels, points sensibles), ces dommages constituent la principale raison d'être de la DAI. Ainsi, ce sont les conséquences sur le trafic des accidents qui seront le cœur de l'évaluation qui est proposée ici.

Tous les critères ne peuvent pas être pris en compte et certaines hypothèses simplificatrices peuvent donc être mises en place, au niveau des données et au niveau des modèles qui seront utilisés. Cela ne dénature pourtant pas les évaluations qui seront faites en cohérence avec les différentes valeurs utilisées dans les différents référentiels d'évaluation par ailleurs.

Cette mesure de gestion dynamique de trafic, par sa nature dynamique, requiert des données qui sont plus précises que les données nécessaires à l'évaluation d'un projet (plus macroscopique) qui se contente du nombre total de véhicules sur une journée. Les modèles utilisés sont des modèles de trafic simples d'écoulement du trafic (dans la poursuite de ce qui avait également été fait dans [6]) et utilisent donc des hypothèses très fortes de calcul (ne prenant pas en compte les phénomènes microscopiques comportementaux de circulation, tels les dépassements).

2.2 - Principe général

D'un point de vue théorique, l'ensemble des avantages que la DAI pourrait procurer peut se résumer dans le tableau suivant :

Avantages	Précision
Temps de parcours	Congestions plus courtes
Fiabilité des temps de parcours	Impact plus faible des incidents, donc perturbations plus lissées
Pollution	Les congestions étant plus faibles, la pollution qui en découlerait devrait, théoriquement diminuer
Sécurité	Avec des informations, plus rapidement transmises, les sur-accidents pourraient être diminués.
Confort	De la même manière, avec le savoir plus rapide d'un incident, les usagers pourraient décider en amont de changer d'itinéraire ou d'adapter leur allure aux conditions

Toutefois, l'ensemble de ces avantages ne sera pas décrit dans la suite du rapport. La méthodologie suivante présente alors les aspects pris en compte.

2.2.1 - Méthodologie générale

Le principe général de cette évaluation consiste à :

- simuler les pertes de temps dues à des incidents qui réduiraient de manière plus ou moins fortes les trafics ;
- considérer le trafic de manière homogène et utiliser alors la théorie de trafic simple d'écoulement ;
- considérer que les accidents ne seront que de simples réductions de capacités au point étudié.

Ainsi, on peut propager les conséquences d'un accident sur tout un trafic en observant les différents temps de parcours théoriques grâce à la demande théorique. La DAI va permettre de réduire la durée de l'incident et donc de canaliser l'impact des différents événements sur le trafic. Ce faisant, on s'abstient de regarder d'une quelconque manière la vitesse des différents véhicules, ou les risques de sur-accidents évités. En effet, l'étude porte uniquement sur un point de vue « gestion de trafic ». Les accidents évités sont, de toute façon, très difficilement quantifiables, puisqu'ils sont, par nature, évités donc ne se sont pas produits. La vitesse des véhicules et donc les différentes nuisances et pollutions associées demandent de recueillir des données comportementales plus précises.

Le modèle utilisé pour faire les calculs sont des modèles de théorie du trafic simple. Les calculs se font à partir de courbes de véhicules cumulés. Celle-ci suppose, entre autres :

- que le flux de véhicules se comporte en First In First Out (FIFO), c'est-à-dire que les dépassements ne sont pas pris en compte ;
- que le flux est homogène en vitesse moyenne sur l'espace et le temps.

Pour estimer la perte de temps de parcours moyenne sur une journée, un accident va donc être simulé à chaque instant de la journée. Ainsi, la propagation et le calcul des temps de parcours se fera pour chaque accident simulé, et on pourra donc comparer les résultats entre une situation sans DAI et une situation avec DAI (et donc dont les temps de réduction de capacité seront considérés comme plus courts).

2.2.2 - Apports théoriques explicatifs

Dans la suite du présent rapport, le pas de temps privilégié sera la minute. En effet, elle permet d'être suffisamment précise pour répondre aux besoins d'une évaluation assez fine des gains de temps et de fiabilité de temps de parcours, et suffisamment proche de la réalité terrain aussi, puisque des données 1 minute peuvent souvent être utilisées aujourd'hui (moyennant un traitement qui ne sera pas abordé ici toutefois, mais qui est très important également). Ainsi :

- $C(t)$ la capacité d'une section en fonction du temps (en véh/min) ;
- $Q(t)$ le débit qui s'écoule en fonction du temps (en véh/min).

Pour rappel, à t_0 , si $C(t_0) \geq Q(t_0)$, alors le trafic s'écoule de manière fluide (la capacité est donc celle liée à la section étudiée, elle ne devrait pas être une valeur générique si l'on veut garder une certaine précision).

Si $Q(t_0) > C(t_0)$, alors un stock de véhicules va apparaître, et les véhicules stockés seront les premiers véhicules à repartir (hypothèse FIFO).

Ainsi $Q(t_0) - C(t_0)$ est le stock accumulé à t_0 , et si ce stock est inférieur à $C(t_0+1)$, alors il se sera entièrement écoulé à t_0+1 , et n'aura donc perdu qu'une seule minute. À l'inverse, s'il lui est supérieur, seule une partie aura pu s'écouler, et une autre partie fera partie du stock suivant (qui se sera agrandi du débit arrivant) :

le stock à t_0+1 sera donc $[Q(t_0) - C(t_0) - C(t_0+1)] + Q(t_0+1)$.

Dans la formule précédente, l'expression entre crochets $[Q(t_0) - C(t_0) - C(t_0+1)]$ est positive et ce nombre de véhicules aura donc perdu au moins deux minutes.

Dans le cas d'un incident, c'est la capacité C , qui diminue à un certain instant et pendant une certaine durée. On comprend alors toute l'importance de réduire la durée de cette diminution de la capacité, puisque l'itération du calcul précédent amène à un calcul complet des temps perdu, qui pourrait être représenté par une courbe des véhicules cumulés (CVC). Cette courbe représente l'observation en un point donné de la section étudiée, la somme de tous les véhicules étant passés. Ainsi la courbe suivante montre le gain de temps (en véh.min) :

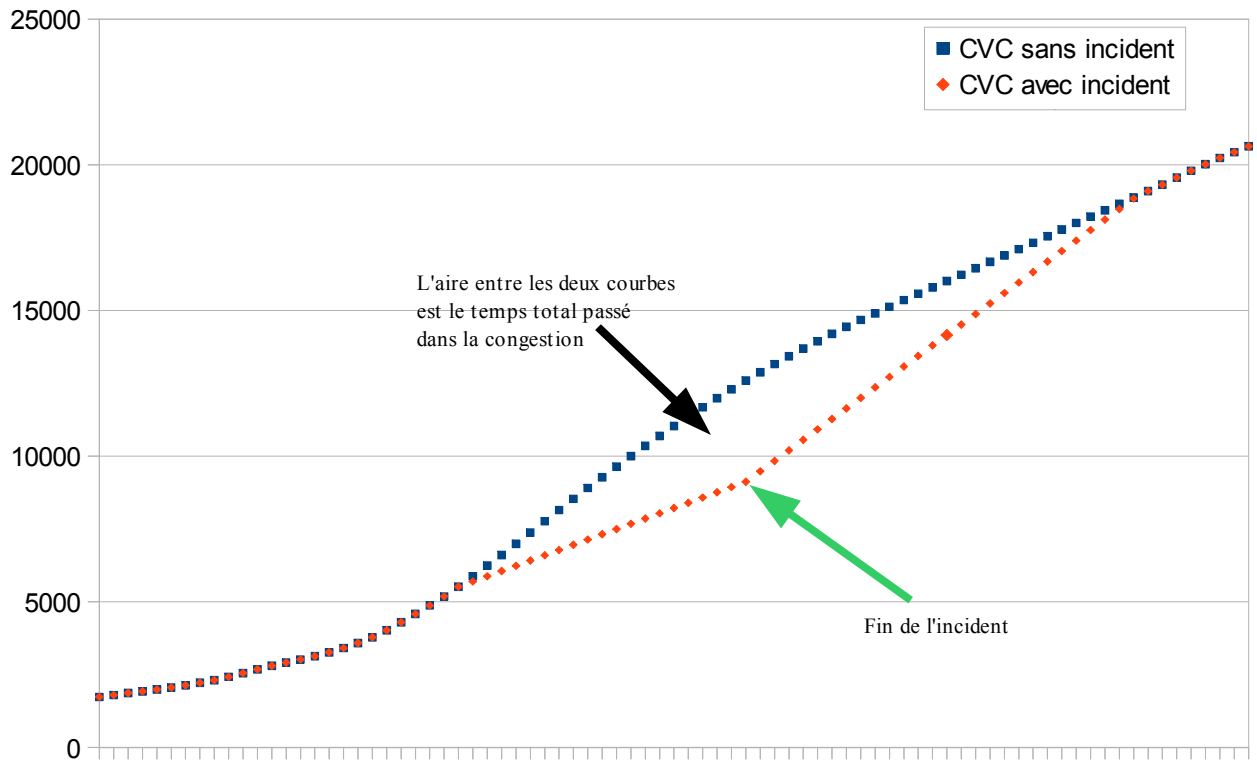


Illustration 2: Exemple graphique de perte de temps

Après la flèche verte qui désigne la fin de l'incident (aux alentours de 9h20), le débit est égal à la capacité maximale sans incident de la section.

Ainsi avec les notations précédentes, soit les notations suivantes :

- T_i la durée de la perturbation due à l'incident sans DAI,
- T'_i celle de la perturbation due à l'incident avec DAI, (et on a donc $T'_i < T_i$)
- $C_i(t)$ la capacité résiduelle due à l'incident à l'instant t ,
- $S(t)$ le stock sans DAI à l'instant t ,
- $S'(t)$ le stock avec DAI à l'instant t ,
- $V_c(t)$ les véhicules cumulés sans DAI à t ,
- $V'_c(t)$ les véhicules cumulés avec DAI à t ,
- T_D , la date de début d'incident.

En fait, la définition de $C_i(t)$ est la même que celle de $C(t)$ pour t compris entre T_D et $T_D + T_i$, mais elle permet d'avoir des formules plus claires.

Le stock est défini de manière récurrente : $S(t+1) = \max(0, S(t) + [Q(t) - C(t)])$. Et on a la même définition pour S' .

Les véhicules cumulés se calculent de façon récurrente aussi de la manière suivante :

$$V_c(t+1) = V_c(t) + \min(S(t) + Q(t), C(t))$$

Alors il suffit de faire la somme des différences des véhicules cumulés pour obtenir la perte de temps totale entre l'incident avec DAI et celui sans :

$$\sum_{t=T_d}^{T_d+T_i} (V'_c(t) - V_c(t)) \quad (\text{car le pas de temps est de 1 minute})$$

La durée T_i est donc particulièrement importante, et comme elle dépend du temps de détection de l'incident, la présence de la DAI a un impact fondamental sur le gain de temps.

2.3 - Hypothèses de calcul

Cette évaluation nécessite donc de prendre quelques hypothèses générales de calcul qui sont données ci-dessous :

- la section est considérée simplement sans aucun point dur et est considéré comme strictement linéaire ;
- les accidents sont moyennés sur tout le linéaire étudié, ainsi que sur toute une année ;
- les accidents sont également donc totalement décorrélés du trafic mais pas de la période de la journée ;
- les DAI sont donc utilisées de manière linéaire : elles détectent dans un certain champ de vision de manière égale à chaque endroit du linéaire ;
- les équipements de la DAI sont ici totalement considérés propres à chaque système : il n'y a donc aucune mutualisation des équipements, comme cela pourrait être mis en place opérationnellement, par exemple avec les modules énergétiques ;
- les coûts de la non-fiabilité sont pris en compte sur une journée avec accident, auxquels on applique un coefficient correcteur en fonction de la fréquence des accidents.

Aussi, sont pris en compte ici :

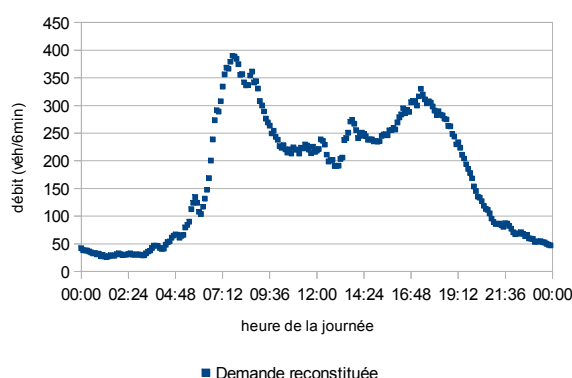
- les données de trafic sur une journée-type ;
- les données d'accidents de manière moyennée (fréquence, position dans le temps) ;
- les temps d'intervention et la rapidité de détection des systèmes DAI ;
- les temps d'intervention et de détection sans la DAI.

Cette première approche permet d'avoir une vision sur la nécessité ou non de mettre en place la DAI sur un tronçon donné (un tronçon d'environ 200m, distance de détection d'une DAI). Elle permettrait également de prendre en compte plusieurs caractéristiques de tronçon, et donc d'avoir une section un peu plus hétérogène. Toutefois, pour cette étude, les caractéristiques des tronçons dépendent donc essentiellement de deux entrées : le trafic et la rapidité d'intervention sur le tronçon donné.

2.3.1 - Données utilisées

Dans cette évaluation, une journée-type représentative d'une voie structurante d'agglomération autour de la région lyonnaise sera étudiée (rocade Est de Lyon, sur la N346, gérée par le CIGT Coraly). Cette journée-type a donc été mesurée avec des capteurs fournissant des données toutes les 6 minutes, à un endroit unique d'un tronçon. Pour les besoins de l'évaluation, cette donnée a ensuite été moyennée de sorte à obtenir des données toutes les minutes. Toutefois, un travail de traitement de données a été effectué afin d'obtenir une demande qui soit la plus représentative possible. Ce travail de traitement de données, très important, ne sera toutefois pas discuté dans ce rapport.

La demande prise en compte est la suivante :



C'est une demande sur une section interurbaine de 2x2 voies, déjà très chargée. On suppose que la capacité à vide est de 3600 véh/h sur les 2 voies étudiées.

Il faut noter que la donnée sur le taux de poids lourds n'est pas disponible. Aussi les coûts des temps de parcours ne prennent pas en compte cet aspect. On peut néanmoins supposer que la majorité des poids lourds doivent éviter les heures de pointe, et qu'ainsi, on suppose que ce manque d'information est négligeable en poids face au reste.

Pour les données accidents, les taux ont été sélectionnés à partir de certains axes nationaux. Les ratios de répartition des accidents dans une journée sont ceux donnés dans le diagnostic général du système Gutenberg de 2010, effectué par le Cété Nord-Picardie :

- 35% des accidents se produisent en Heures de Pointe du Soir (HPS) ;
- 15% des accidents se produisent en Heures de Pointe du Matin (HPM) ;
- le reste (50% se produisent pendant le reste de la journée).

L'horizon d'étude est un horizon déterminé par la durée de vie calculée dans les travaux du Sétra pour la DGITM sur la maintenance des équipements (2013), qui est estimée à 7 ans. Ces travaux donnent également les informations nécessaires sur les coûts de maintenance. Cela permet d'avoir une durée de fonctionnement assez importante, tout en prenant également en compte le coût de renouvellement des systèmes et le progrès technique sur les nouvelles générations d'équipements.

On suppose également que les durées des accidents sont égales à tout moment de la journée, et que ces durées diminuent en présence d'une DAI : lorsqu'il n'y a pas de DAI, les incidents sont estimés à 28 minutes en heures de pointe et 35 minutes en heures creuses, alors qu'elles sont supposées constantes égales à 20 minutes avec la DAI. Cette différence se justifie uniquement par une détection beaucoup plus rapide des accidents, et en considérant qu'aucune alerte n'est donnée par les usagers dans un cas, comme dans l'autre. Quelques tests de sensibilité sont testés ci-après, avec notamment des temps de détection à plus ou moins cinq minutes.

2.3.2 - Éléments d'évaluation

2.3.2.1 - Principes généraux

Pour cette évaluation, l'étude s'appuie sur les théories simplifiées du trafic et notamment sur les courbes de véhicules cumulés. La capacité du tronçon est choisie égale à 3600 véh/h, en cas de situation sans incident. Elle est de 1800 véh/h en cas d'incident. On considère ici simplement, et de façon simplifiée, un incident qui bloquerait une seule voie, sans avoir d'impact sur la voie résiduelle.

L'estimation des impacts d'un incident bloquant une voie de circulation se fait alors à chaque minute, puis sera ensuite pondéré par la fréquence des accidents selon la période de la journée.

Les estimations des HPS et HPM se font en fonction de la demande en trafic initiale. On prend le début des deux périodes d'heure de pointe lorsque la demande excède 3000 véh/h, et la fin de ces périodes sera prise telle que la demande soit inférieure à 2700 véh/h. Cet hystérésis permet d'ores et déjà de prendre un peu en compte la période de relaxation après les pics de trafic de la journée (les demandes les plus élevées dans la journée). Ce choix des périodes est très important dans tous les calculs puisqu'il détermine les différentes périodes.

Les données collectées étant des données 6 minutes, une moyenne a été effectuée pour récupérer des données 1 minute.

Seule une journée-type d'un jour de semaine dont le trafic est relativement important est pris en compte dans le calcul. Or il ne représente qu'environ 200 jours par an. Par simplification, on considère que l'apport de la DAI est négligeable pour les autres périodes de l'année, et qu'ainsi les gains y sont de 0 : c'est une hypothèse relativement importante, mais elle se veut volontairement forte pour compenser toute surestimation que ce jour-type porte de manière intrinsèque.

Pour effectuer cette évaluation, une hypothèse très forte a été prise concernant le trafic. En effet, il a été supposé que les gains de temps d'une année sur l'autre soient simplement affectés d'un coefficient linéaire (celui de la progression nationale de trafic, 1,7 %).

2.3.2.2 - Scénarios

Pour estimer les gains d'une DAI, un deuxième scénario a été défini à partir des données de base présentées dans la partie 2.3.1 -. En effet, la demande précédente dépassant les 42000 véh/jour représente un trafic assez élevé. Aussi, une homothétie a été effectuée afin d'étudier les avantages d'une DAI pour une demande moins forte de 35000 véh/jour. Il est alors à noter que la demande suit les mêmes variations relatives que la courbe précédente (par construction). Aussi, les niveaux estimés des HPM et HPS sont également pris de sorte à obtenir les mêmes plages horaires. Ces périodes sont très importantes pour la qualification de la fiabilité des temps de parcours.

2.3.2.3 - Hypothèses sur les gains pris en compte

Les gains que l'on peut considérer dans les opérations d'exploitation pour les systèmes de DAI sont liés aux coûts subis par la collectivité concernant les temps passés en circulation et les coûts des accidents. Ici, les gains des coûts des accidents ne sont pas pris en compte. Les gains de temps sont, quant à eux, différenciés en deux catégories :

- les gains de temps bruts ;
- les gains de fiabilité de temps de parcours.

La valeur du temps est considérée égale à 18€₂₀₁₂ en 2012 (valeur du temps en interurbain de moins de 50km de distance).

Les gains de fiabilité dépendent de la période de la journée. Et on prendra donc l'écart entre le projet et la référence pour la différence entre le 9ème décile des temps de parcours et la médiane pour chaque période de la journée (HPM, HPS, et le reste qu'on notera par simplification HC pour Heures Creuses).

2.3.2.4 - Hypothèses sur les coûts

Les travaux du Sétra pour la DGITM de 2013 sur la maintenance des équipements donnent des coûts d'équipements pour les DAI. Les résultats dépendant toutefois des recensements effectués, la précision n'est pas toujours très fine. Pour combler ces lacunes, deux hypothèses de coûts sont considérées ici :

- les coûts moyens des travaux Sétra 2013, soit :

Coût de renouvellement	43 000 €
Coûts d'exploitation	4 240 €
Coûts de maintenance	2 500 €

- les coûts ci-dessus, majorés de 50 %.

(NB : les coûts d'exploitation prennent en compte l'électricité et la télécommunication, mais pas les coûts d'opérateurs ; on considère ainsi que l'investissement en système DAI n'a pas pour finalité l'économie d'un poste d'agent qu'il soit opérateur ou agent de patrouille.).

2.3.2.5 - Coût de la fiabilité des temps de parcours

D'un point de vue pratique, la distribution des temps de parcours est calculée grâce à une ventilation des incidents sur la journée mais aussi en fonction de la fréquence des incidents sur les différentes périodes de la journée (comme indiqué au paragraphe 2.3.1). Ces incidents sont alors moyennés sur chaque période de la journée, et les poids correspondant à la ventilation des incidents sur les périodes de la journée sont ensuite pris en compte. Les deux distributions des temps de parcours entre les deux situations (sans DAI et avec) seront par la suite comparées : la différence entre le 9ème décile et la médiane est ainsi calculée pour chaque situation. À cette différence entre les deux situations est ensuite affecté un coefficient de 2,5 pour valoriser les gains de fiabilité de temps de parcours. (Ces gains de fiabilité sont estimés ne toucher que ce 9ème décile, et les gains de temps de parcours fiables n'affectent donc que cette seule tranche des véhicules impactés.)

Pour estimer la fiabilité des temps de parcours, des tableaux exposant le nombre de véhicules touchés par chaque catégorie de retard sont sortis pour l'ensemble des incidents (selon la période de la journée concernée) :

Proj HPS	nb dans les différentes classes	répartition cirepérage décile
0	415851,71	61,28% médiane
1	24780	64,93%
2	28260	69,10%
3	29910	73,51%
4	30750	78,04%
5	33810	83,02%
6	35550	88,26%
7	37560	93,79% 9ème décile
8	31320	98,41%
9	10800	100,00%

Illustration 3: Sortie des temps de parcours pour les HPS lors d'une analyse

L'Illustration 3 montre une répartition des écarts de temps de parcours avec une situation sans incident pour une situation avec utilisation de la DAI. On trouve donc une distribution temporelle avec l'identification du 9ème décile et de la médiane ; ce qui permet de donner les éléments nécessaires pour le calcul de la fiabilité des temps de parcours.

Ce gain A_{fiab} vaut donc :

$$A_{fiab} = [(T_{90}^{ref} - T_{50}^{ref}) - (T_{90}^{pro} - T_{50}^{pro})] * N_{90} * VdT * C_{fiab}$$

où

T_x^i est le temps de parcours supplémentaire par rapport à une situation fluide pour la situation i (projet $i=pro$ ou référence $i=ref$) et un centile x (9ème décile : $x=90$, médiane : $x=50$) ;

N_{90} est le nombre de véhicules d'un décile (ce qui équivaut à prendre un dixième du nombre de véhicules d'une période [HPM, HPS ou HC]) ;

VdT est la valeur du temps ;

C_{fiab} est le coefficient utilisé pour la valorisation de ce gain de fiabilité (ici 2,5).

2.3.2.6 - Formulation du bilan coûts-avantages

En synthèse, le bilan coûts-avantages s'écrit :

$$[-I + \sum_{t=0}^D \frac{(A_t - C_t)}{(1+a)^t}]$$

où

I est l'investissement en équipements DAI ;

A_t représente les avantages (réduction des temps de congestion) ;

C_t représente les coûts annuels de maintenance + exploitation ;

a est le taux d'actualisation ;

D est la durée de la vie de l'équipement, que l'on supposera égale à la durée de vie optimale.

Dans la suite, puisque l'on s'intéresse au domaine de pertinence, on utilisera le critère selon lequel le bilan coûts-avantages pendant la durée de vie est positif, soit :

$$-I + \sum_{t=0}^D \frac{(A_t - C_t)}{(1+a)^t} > 0$$

2.4 - Résultats préliminaires

Les résultats sont présentés ci-dessous pour deux *scenarii* de trafics et différentes hypothèses de prise en compte de la valeur de la fiabilité des temps de parcours. Les résultats sont présentés par le nombre d'accidents (par section de 200 m ou par km) à partir duquel le bilan coûts-avantages de la DAI est positif.

2.4.1 - Scénario 1 : trafic journalier supérieur à 42 000 véh/jour

Sans prise en compte de la fiabilité des temps de parcours

Le tableau suivant fournit le nombre et la densité accidents / incidents détectés à partir duquel le système DAI devient pertinent (au sens où son bilan coûts-avantages apparaît positif).

	nb accidents	densité (acc/km/an)
initial	4,1	21
200 jours	7,6	38
50% coûts	11,4	57

Les situations présentées dans le tableau correspondent aux situations précédemment décrites :

- « initial » pour la situation où on considère une année composée uniquement des jours-types (donc 365 jours où les gains sont ceux du jour étudié) ;
- « 200 jours » pour la situation où seuls 200 jours dans l'année où la DAI apporte quelque chose, les autres jours sont considérés comme totalement inefficaces pour la DAI. Ici, en fait, il faut donc que les 31 accidents par kilomètre soient détectés par la DAI se trouvent dans les 200 jours sélectionnés ;
- « 50 % coûts » ajoute à la situation précédente une incertitude de coûts complets (investissement, maintenance, fonctionnement) de 50 %.

Avec prise en compte d'une valeur de fiabilité de temps de parcours

Si l'on prend en compte la valeur de la (non-) fiabilité des temps de parcours, il est important de noter les durées calculées des HPM et HPS. Aussi, dans ce cas-test, l'HPM dure 144 minutes, et l'HPS dure 114 minutes. Ce sont des durées assez conséquentes, mais le trafic étant lui-même important, il semble assez naturel d'avoir de telles durées. Il est également important de noter que ce trafic crée d'ores et déjà des congestions en heures de pointe du matin.

Le tableau suivant fournit le nombre et la densité accidents / incidents détectés à partir duquel le système DAI devient pertinent (au sens où son bilan coûts-avantages apparaît positif).

	nb accidents	densité (acc/km/an)
initial	3,0	15
200 jours	5,5	27
50% coûts	8,2	41

On notera que la fiabilité du temps de parcours représente environ 28% des avantages, ce qui est important. Pour autant les résultats se comprennent assez bien de manière théorique, puisque les calculs de temps perdus sont d'autant plus importants pour les véhicules qui sont le plus impactés par les incidents, et donc comme la DAI réduit la durée des incidents, ces temps gagnés sont très importants.

2.4.2 - Scénario 2 : trafic journalier de 35 000 véh/jour

Ce scénario a la même forme relative de la demande de trafic (c'est une homothétie de la demande précédente), mais avec une valeur journalière de 35 000 véh/jour. Les résultats seront donnés à la fois avec le calcul de la fiabilité des temps de parcours, et sans.

Sans prise en compte de la fiabilité des temps de parcours

	nb accidents	densité (acc/km/an)
initial	11,4	57
200 jours	20,9	104
50% coûts	31,3	157

Avec prise en compte d'une valeur de fiabilité de temps de parcours

	nb accidents	densité (acc/km/an)
initial	7,3	36
200 jours	13,3	66
50% coûts	19,9	100

On remarque alors qu'il y a un rapport de presque 3 entre les deux scénarios. Or on sait également que les formes des demandes de trafic sont très importantes dans la constitution de l'évaluation. Il faut donc être assez prudent avec les résultats du cas-test, même si par ailleurs, ce cas-test semble plutôt sous-évaluer l'utilité de la DAI, puisque celle-ci est directement liée de manière positive au trafic et que les calculs, faute de pouvoir estimer correctement les modifications dynamiques du trafic dans le temps, n'a estimé qu'un simple facteur pour la description des gains de temps.

Dans ce cas, la valeur de la fiabilité des temps de parcours représente environ 36% des gains totaux.

2.5 - Tests de sensibilité

Pour tenter de mieux cerner les domaines d'incertitude d'une telle analyse, quelques premiers tests de sensibilité ont été effectués sur des paramètres importants du modèle. Ces tests de sensibilité sont conduits sur le scénario 1 (42k véh/j) de la partie précédente et les comparaisons se font sur ce scénario.

2.5.1 - Test sur la capacité

Un premier test a été mené sur la capacité théorique d'un tronçon. Dans le cas-test précédemment décrit, elle s'élève à environ 3600 véh/h. Le choix de cette valeur, surestimation des valeurs communément utilisées dans le cas d'une 2x2, se voulait compensatrice d'une éventuelle surestimation de la reconstitution de la demande.

Or, les tables Sétra indiquent plutôt une capacité à 3460 véh/h, qui contraindrait donc encore plus le trafic qui s'écoule à notre point d'étude. Ce changement de capacité accentuera donc encore plus les congestions créées et donc soulignera davantage les effets de la DAI.

On trouve alors les résultats suivants :

Sans prise en compte de la fiabilité des temps de parcours

	nb accidents	densité (acc/km/an)
initial	3,3	16
200 jours	6,0	30
50% coûts	9,0	45

Avec prise en compte d'une valeur de fiabilité de temps de parcours

	nb accidents	densité (acc/km/an)
initial	2,3	12
200 jours	4,2	21
50% coûts	6,4	32

La valeur de la fiabilité des temps de parcours représente environ 29 % des gains totaux.

Le seuil de pertinence de la DAI est ainsi abaissé d'environ 20 %.

2.5.2 - Test sur la capacité résiduelle

La question de la capacité résiduelle en situation d'incidents est cruciale dans le modèle. Ci-dessus l'hypothèse d'une réduction « homothétique » de la capacité peut ne pas refléter les comportements de « friction » qui apparaissent au droit ou en amont de l'incident. De plus, une simple panne sur bande d'arrêt d'urgent réduit certainement moins la capacité que ne le ferait un accident. Un second test a donc été mené pour évaluer la sensibilité par rapport à la « dureté » de l'accident, c'est-à-dire l'impact de l'accident sur les conditions de circulation résiduelle. Pour ce faire, en partant toujours du premier scénario, deux cas ont été étudiés :

- le premier avec une capacité résiduelle élevée de 2400 véh/h ;
- le second avec une capacité résiduelle faible de 1200 véh/h.

Capacité résiduelle	Sans fiabilité de temps de parcours			Avec fiabilité de temps de parcours		
		nb accidents	densité (acc/km/an)		nb accidents	densité (acc/km/an)
2400 véh/h	initial	8,7	43	initial	5,3	26
	200 jours	15,8	79	200 jours	9,7	48
	50% coûts	23,8	119	50% coûts	14,5	72
		nb accidents	densité (acc/km/an)		nb accidents	densité (acc/km/an)
1200 véh/h	initial	2,6	13	initial	1,8	9
	200 jours	4,8	24	200 jours	3,3	17
	50% coûts	7,2	36	50% coûts	5,0	25

On voit bien l'importance de la capacité résiduelle sur les apports de la DAI. En effet, plus la congestion pourra être sévère (dans le cas où la capacité résiduelle est donc faible), plus le gain de temps de réaction de la DAI aura un impact.

L'impact sur la fiabilité des temps de parcours est aussi intéressante à observer, puisque l'on voit que la fiabilité des temps de parcours a moins d'influence sur les seuils de rentabilité lorsque la capacité résiduelle est fiable. Ce qui laisse supposer que la DAI agit moins sur la variabilité des temps de parcours lorsque ces temps de parcours sont très élevés : cela peut sembler logique en mettant en parallèle le fait que les usagers déjà pris dans les congestions n'en sortent pas vraiment plus tôt dans le sens où la congestion est très forte très vite, et qu'elle dure suffisamment longtemps pour que la résorption de ces congestions n'arrive que tard (lorsque les débits d'arrivée commencent déjà à diminuer).

2.5.3 - Test sur la durée de détection de la DAI

Un des critères qui porte une influence vraiment primordiale sur l'efficacité de la DAI est la durée d'un incident. Dès lors, il convient de tester la sensibilité de ce facteur au regard de notre scénario étudié. On pourra par exemple utiliser une durée plus longue de l'incident dans le cas où la DAI n'observerait pas directement l'incident, mais également ses conséquences.

Ainsi, deux hypothèses alternatives à l'hypothèse centrale seront prises pour cette durée d'incident :

- la première considère que la réduction de capacité dure seulement 15 minutes (on pourrait supposer par exemple que l'arrivée plus rapide des secours réduise encore la durée de la réduction de capacité) ;
- la seconde considère que la réduction de capacité dure 25 minutes : on pourrait alors considérer que l'efficacité de la DAI n'est pas aussi bonne qu'escomptée et que la détection n'est pas aussi rapide que prévue, ou on considère que la DAI identifie une remontée de file (peut-être due à un incident, en tout cas c'est un événement).

Au total, les hypothèses sur les durées d'incidents sont donc les suivantes :

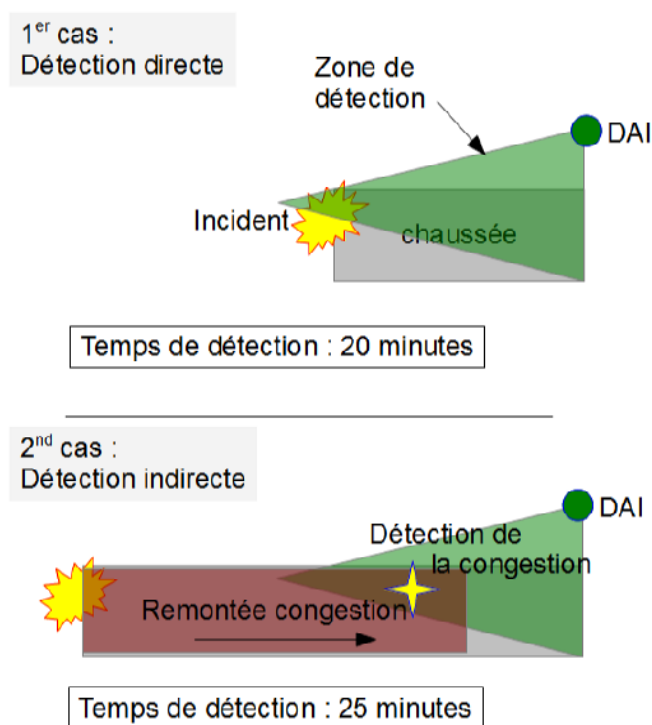
scénario	HPM	HC	HPS
Référence, sans DAI	28 min	35 min	28 min
Scénario initial avec DAI		20 min	
Variante de sensibilité DAI 15 min		15 min	
Variante de sensibilité DAI 25 min		25 min	

Le tableau suivant présente le résultat des variantes, illustrée par le seuil de pertinence (exprimé en nombre et densité d'accidents / incidents)

Durée incident	Sans fiabilité de temps de parcours			Avec fiabilité de temps de parcours		
		nb accidents	densité (acc/km/an)		nb accidents	densité (acc/km/an)
15 minutes	initial	2,9	14	initial	2,0	10
	200 jours	5,2	26	200 jours	3,7	19
	50% coûts	7,9	39	50% coûts	5,6	28
25 minutes	initial	9,5	48	initial	7,7	39
	200 jours	17,4	87	200 jours	14,1	71
	50% coûts	26,1	130	50% coûts	21,2	106

Comme prévu, ce paramètre est particulièrement important à bien pouvoir calibrer : il modifie du simple au triple les résultats calculés.

Avec la seconde hypothèse, on pourrait tenter d'utiliser les résultats de manière macroscopique pour essayer de déterminer un gain lorsque la DAI sert également à détecter les congestions dues à un événement. Dans ce cas, en considérant toujours des accidents répartis de manière linéaire, on pourrait donc avoir des résultats pour une DAI sur 200 m pour la détection directe avec durée de l'incident de 20 minutes et 200 m à détection indirecte avec durée de l'incident de 25 minutes comme l'illustre le schéma suivant :



ustration 4: Schéma du cas étudié avec détection indirecte supposée

Les résultats avec le cas-test donnent :

Sans prise en compte de la fiabilité des temps de parcours

	nb accidents	densité (acc/km/an)
initial	2,9	14
200 jours	5,3	26
50% coûts	7,9	40

Avec prise en compte d'une valeur de fiabilité de temps de parcours

	nb accidents	densité (acc/km/an)
initial	2,2	11
200 jours	3,9	20
50% coûts	5,9	30

Sur ce cas-test, on pourrait assimiler cette détection sur 400 m, à une DAI dont les incidents sont d'un quart d'heure.

2.5.4 - Test sur les différentes périodes

Pour le calcul des temps perdus et pour connaître la répartition temporelle et donc les coefficients associés aux fréquences d'accidents, les heures de pointe sont également un paramètre sur lequel des tests de sensibilité peuvent être menés.

Le tableau suivant présente les différents résultats des deux cas d'étude : le premier cas-test (avec un hystérésis à 3000/2700 (véh/h)) et le deuxième cas pour tester la sensibilité avec un hystérésis à 2700/2430 véh/h [90% de la valeur d'entrée].

On obtient alors les durées suivantes :

		entrée/sortie (véh/min)	
		50/45	45/40,5
Durée (min)	HPM	144	192
	HPS	114	174

La durée des HPM augmente d'un tiers environ alors que celle des HPS augmente de plus de 50 %. Cela dénote de l'importance de bien différencier les deux heures de pointe.

Sans prise en compte de la fiabilité des temps de parcours

	nb accidents	densité (acc/km/an)
initial	4,7	23
200 jours	8,5	43
50% coûts	12,8	64

Avec prise en compte d'une valeur de fiabilité de temps de parcours

	nb accidents	densité (acc/km/an)
initial	3,6	18
200 jours	6,5	32
50% coûts	9,7	49

La valeur de la fiabilité des temps de parcours représente 24 % des gains totaux.

L'évolution du seuil de pertinence par rapport au scénario 1 est donc relativement peu importante (un peu plus de 10 % supplémentaires). Les résultats semblent relativement peu sensibles à ce paramètre.

2.6 - Éléments de synthèse

Le tableau suivant présente les résultats de l'analyse, en nombre d'incidents par km et par an, le seuil de rentabilité de la DAI :

	Seuil de pertinence : densité d'accidents par km						
	42k	35k	HP	capa	dur+	dur-	resi+
Scénario initial	21	57	23	16	48	14	43
+50% coûts de la DAI	57	157	64	45	130	39	119
avec valeur de la fiabilité	41	100	49	32	106	28	72

Pour rappel, les différents scénarios testés sont décrits dans le tableau suivant :

		Scénarios							
		42k	35k	HP	capa	dur+	dur-	resi+	resi-
capacité initiale	(véh/h)	3600	3600	3600	3460	3600	3600	3600	3600
capacité résiduelle	(véh/h)	1800	1800	1800	1660	1800	1800	2400	1200
temps perturbé projet	(min)	20	20	20	20	25	15	20	20
durée HPM	(min)	144	144	192	144	144	144	144	144
durée HPS	(min)	114	114	174	114	114	114	114	114
trafic	(véh/j)	42k	35k	42k	42k	42k	42k	42k	42k

Au total, les seuils de rentabilité estimés de la DAI se situent principalement dans une fourchette de 20 à 60 accidents/incidents par km et par an.

Ces seuils de rentabilité sont illustrés par les courbes suivantes qui représentent le bilan coûts-avantages de la DAI, dans les différents scénarios testés, en fonction de la densité d'incidents :

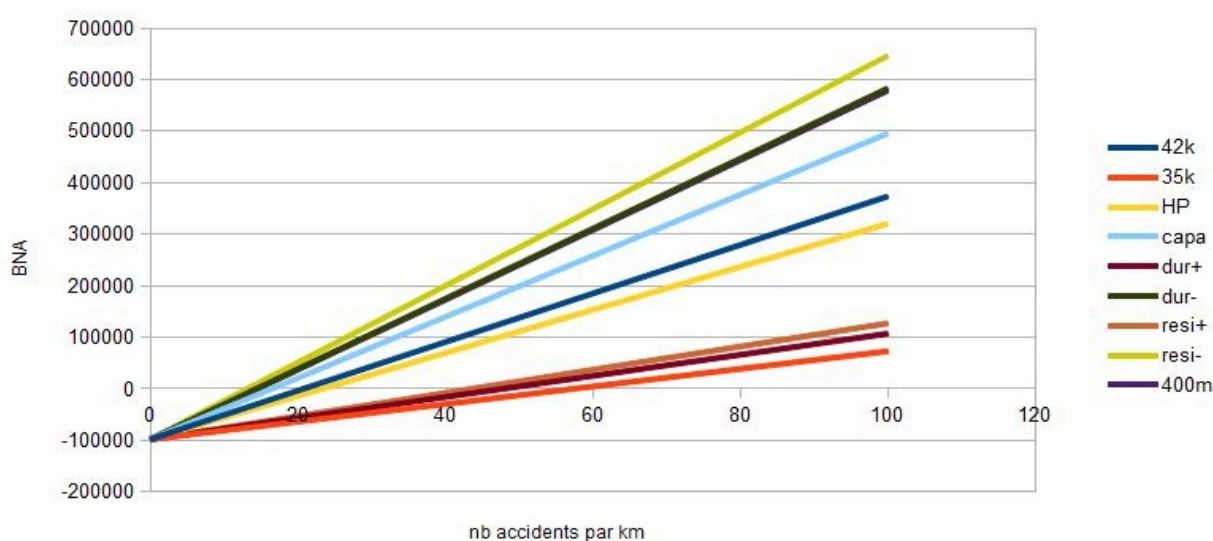


Illustration 5 : bénéfice net actualisé en fonction de la densité d'accidents ;
scénario d'hypothèses initial

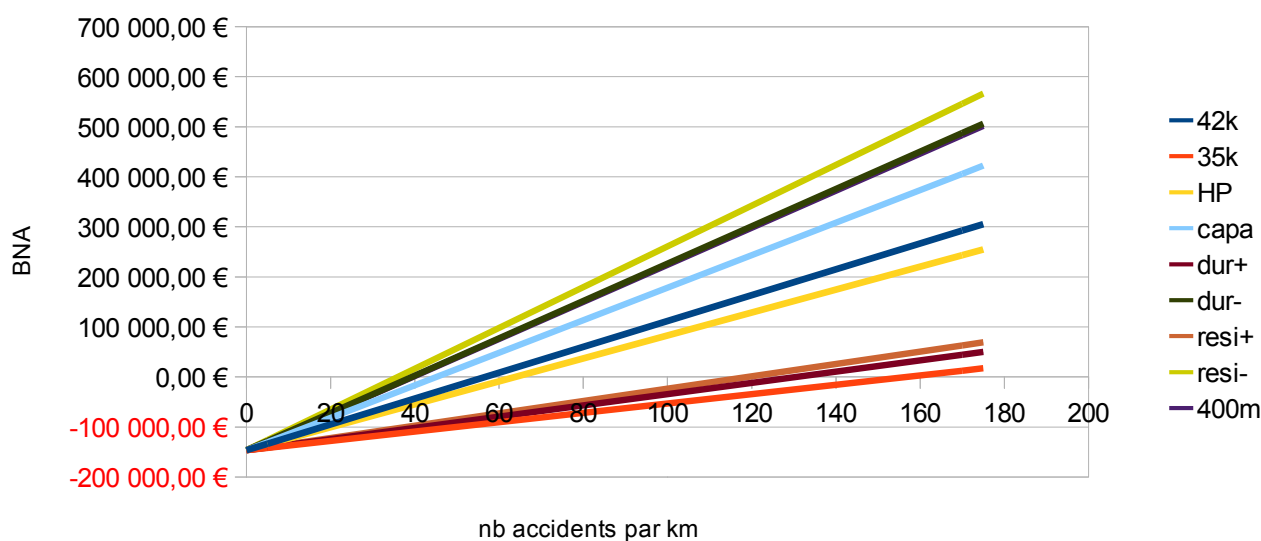


Illustration 6 : bénéfice net actualisé en fonction de la densité d'accidents ;

scénario de coûts de DAI majorés de 50 %

2.7 - Tentative de rapprochement avec des données d'incidentalité

Il peut être intéressant de tenter de comparer cette fourchette avec des données observées, même si l'on sait la difficulté à mesurer la densité d'incidents (dont les pannes notamment).

Pour construire une estimation, les données sur les accidents graves peuvent constituer une première « brique » de connaissance de l'incidentalité. Ensuite, et d'après les données sur les accidents graves recensés entre 2007 et 2009, on peut considérer :

- que sur autoroutes, on recense deux fois moins d'accidents graves que d'incidents perturbants ;
- que sur nationales, on recense trois fois moins d'accidents graves que d'incidents perturbants.

Les indicateurs SURE montrent que sur les VRU, les accidents graves représentent le quart des accidents recensés, alors que sur voies nationales interurbaines, elles ne représentent qu'environ la moitié.

Si la construction d'indicateurs agrégés d'incidentalité apparaît possible à un niveau agrégé à partir de données d'accidentalité et de rapports incidents / accidents, l'analyse de la pertinence de la DAI doit se faire à des niveaux plus fins, et donc recourir à des données plus fines.

A titre d'exemple, le recensement des incidents sur le réseau routier national d'Ile de France géré par la DiRIF peut fournir une base d'analyse de pertinence plus détaillée. Ainsi, le recensement manuel des agents de la DiRIF pour le premier semestre 2011 indique que les accidents graves représentent, sur son réseau, environ le sixième des incidents relevés. (L'échantillon est ici de quelque 6600 relevés). Sur ce recensement de la DiRIF, en supposant que le deuxième semestre est identique au premier, et en utilisant les longueurs des sections gérées par la DiRIF sur *Isidor*¹, on peut estimer les densités suivantes :

¹ <http://isidor.application.i2/isidorv2>

tronçon	densité (incidents/km/an)
A4	71,4
A14	64,6
A3	37,9
A86	36,9
A13	34,2
A1	31,4
A6a	29,8
A10	27,4
A6b	26,7
A12	19,3
A104	16,7
N118	15,3
A15	15,2
N315	13,4
A6	12,2
N406	10,3
moyenne des densités des 33 autres sections	1,9
moyenne des densités en IdF	10,7
densité moyenne en IdF	5,9

Illustration 7: densités d'incidents estimées sur les sections du réseau DiRIF (2011)

Le tableau ci-dessus suggère qu'en moyenne, les sections du réseau routier national en Ile de France exploité par la DIRIF, n'entrent pas dans le domaine de pertinence de la DAI. Mais cette analyse « moyenne » est peu opérationnelle : ainsi, les sections les plus « incidentogènes » du réseau semblent entrer dans la fourchette de pertinence de la DAI.

Ceci ne signifie pas pour autant que la DAI soit justifiée sur l'ensemble de ces tronçons, compte tenu notamment des incertitudes et limites de la méthode illustrée ci-dessus. L'analyse de la pertinence de la mise en place d'une DAI doit en effet se faire de façon encore plus détaillée, à l'échelle de certains points durs des sections. Il faut donc de nouveau rappeler le besoin de se référer à des études d'accidentologie / incidentologie détaillées avant de se prononcer sur la possible pertinence d'une DAI en un point particulier.

2.8 - Limites et approfondissements

Les premiers résultats illustratifs ci-dessus suggèrent les premières pistes d'approfondissement. Tout d'abord, les impacts en termes de fiabilité des temps de parcours sont assez variants d'une situation à une autre (entre un cinquième et un tiers des gains totaux). Ces fiabilités des temps de parcours théoriques soulignent également l'importance théorique de ce gain, qui peut s'avérer extrêmement important pour les usagers (et d'autant plus lors d'incidents).

Pour la capacité de la voie, les variations impliquent un peu plus de changements (de l'ordre d'un cinquième) et les impacts sur la fiabilité des temps de parcours semblent également négligeables.

Il faut donc être particulièrement vigilant aux différents paramètres qui entrent en jeu ici. La définition des heures de pointe se doit d'être rigoureuse pour avoir des résultats comparables. De la même manière les caractéristiques des voies sont importantes à estimer correctement, car ces valeurs jouent un rôle important dans les calculs. La demande en entrée est bien sûr une donnée essentielle dans l'analyse effectuée, puisque c'est elle qui va déterminer les impacts de l'accident/incident.

Les modèles d'évaluation décrits précédemment présentent également leurs limites.

Pour cette évaluation, les données qui sont nécessaires à l'évaluation sont assez simples, elles sont souvent moyennées dans le temps et dans l'espace. Cela amène donc des biais qui ne pourront pas être évités :

- Le tracé de la section n'est pas pris en compte (la section est supposée linéaire) et les points durs de trafic non plus : on ne peut donc pas savoir où positionner les caméras de DAI ; toutefois, pour pallier le problème, il est souvent utile de s'adresser au gestionnaire qui connaît les points durs et peut essayer de guider le cadrage de la pose des capteurs, par exemple.
- Les tronçons étudiés doivent être calibrés en capacité. Or ces capacités peuvent également varier si d'autres mesures de gestion de trafic sont mises en place.
- Le trafic PL n'est pas pris en compte dans le calcul des gains de temps de parcours (leur valeur du temps est bien plus élevée que celle des VP).
- Les coûts des accidents ne sont pas pris en compte : on ne prend pas en compte les phénomènes de sur-accidents, par exemple, mais cette gestion des coûts devrait être possible si des PMV sont utilisés dans la mise en place de la mesure.
- Soit on considère chaque tronçon de manière indépendante (ce qui est lourd), soit on considère toute la section de manière homogène et tous les tronçons ont alors des caractéristiques moyennées identiques. Ce point peut être gênant dans le cadre d'accumulation d'accidents sur des points singuliers particulièrement localisés.
- Le trafic induit n'est pas pris en compte : en effet, la variation de la fiabilité des temps de parcours est améliorée par les systèmes de DAI, et les usagers seraient donc plus facilement attirés par cet itinéraire, moins variable dans le temps.

Toutefois la plus grande incertitude réside dans la répartition du trafic aux années suivantes, car il n'est pas possible d'estimer correctement cette progression, que ce soit, à cause de la mise en place de la mesure (trafic induit), de la mise en place de mesures de gestion de trafic annexe (ici le système est pris fermé, alors, qu'il ne l'est pas), et par l'évolution naturelle des trafics qui dépend des types de trafic (pendulaires, de transit, etc...), de l'affectation générale sur le réseau d'où est tiré le tronçon étudié. De plus, les temps de calcul restent encore très longs. Toutefois, aucune optimisation n'a été menée pour réduire les temps de calcul. Le travail est purement exploratoire.

Le modèle d'évaluation utilisé dans cette étude exploratoire est perfectible, à plusieurs titres :

- Dans ce modèle, on peut également prendre en compte des points de circulation avant ou après des convergents (en connaissant le coefficient de priorité) ou des divergents. [Ce point est important pour la répartition des congestions.]
- Les poids lourds pourraient éventuellement être pris en compte de manière totalement macroscopique, dans le sens où ils ne le seraient que dans les coûts et seraient considérés comme 2 unités de véhicule particulier, par exemple. (Conversion communément admise, mais pouvant mener à calibrage.)
- Actuellement, on suppose une progression proportionnelle des gains de temps d'année en année, il pourrait être plus intéressant (à condition d'avoir les données nécessaires ou des modèles assez robustes) d'intégrer plus précisément des évolutions de trafic sur lesquels la répartition des accidents peut être menée.
- Avec l'utilisation de messages à l'attention des usagers, les trafics peuvent même être reportés, et un gain pourra alors être observé sur l'axe étudié. L'utilisation globale du réseau (dont l'itinéraire de déviation emprunté par les usagers qui auraient suivi le conseil de reroutage) ne pourra toutefois pas être mesurée.
- Les phénomènes de sur-accidents n'ont pas été traités ici. Ces phénomènes sont difficiles à évaluer, en raison de la difficulté statistique à qualifier les sur-accidents et leur contexte de trafic. Ce point, sensible, mérite d'être creusé, ne serait-ce qu'en essayant d'en encadrer le poids dans l'évaluation à l'aide d'une fourchette d'hypothèses (qui sont liés aux informations routières embarquées, ou sur chaussée).
- Le modèle utilisé permet aussi théoriquement une visualisation plus spatiale des problèmes de congestion. Une utilisation de ces modèles avec application spatiale pourrait s'avérer très utile pour d'autres évaluations. En fait, le modèle considère le trafic en un point donné du réseau, mais il peut également prendre en compte d'autres points du réseau et les faire interagir entre eux de sorte à mieux appréhender les congestions de manière fine.
- De plus, n'est traité ici que succinctement la détection indirecte des accidents. Toutefois, la DAI permettrait en effet de détecter de manière plus indirecte les accidents (en observant une remontée de congestion, par exemple). Ce point mériterait également un approfondissement, d'autant plus que la modélisation théorique serait proche de celle qui pourrait être utilisée pour les systèmes coopératifs.

Ces pistes d'améliorations ne semblent pas hors de portée pour une implémentation future de l'approche esquissée dans cette étude exploratoire. Pour autant, elles nécessitent de mieux calibrer les paramètres. Cette étude exploratoire, malgré ses limites mais aussi grâce aux axes d'approfondissement identifiés, suggère que c'est maintenant sur des cas réels que les travaux pourraient être prolongés. Parmi ces cas réels, ceux permettant une analyse fine avant-après pourraient considérablement enrichir l'approche méthodologique ci-dessus, notamment sur les paramètres clés de l'évaluation que sont la rapidité de détection et les impacts des différents types d'incidents sur l'écoulement du trafic.

Eléments de conclusion

La détection automatique d'incidents améliore la qualité de services et des infrastructures et accélère nettement l'élimination des difficultés occasionnées par les accidents et incidents en diminuant les perturbations.

La gestion de la circulation permet de répondre à la demande des exploitants routiers en utilisant au maximum les infrastructures existantes, en abrégant les temps de transport et en améliorant la fiabilité des réseaux routiers.

La circulation du trafic se concrétise par des mesures qui :

- rendent à la route sa capacité temporairement perdue par une gestion des incidents, qui se fait par la réouverture des routes au trafic le plus rapidement possible après un bouchon ou un accident ;
- informent en temps réel l'état du trafic par la diffusion d'informations relatives à la circulation : les systèmes utilisables (GPS, radio, etc...) font gagner en efficacité l'utilisation des infrastructures routières.

Les détecteurs hors sol fondés sur différentes technologies de détection sont particulièrement utiles sur les routes ou dans les tunnels afin de fournir un large éventail de paramètres de détection, d'informations exactes et de classification à partir d'un emplacement unique.

Les différents capteurs cités peuvent avoir plusieurs fonctions autres que la détection automatique d'incidents telles que :

- classification des véhicules,
- vitesse.

L'évaluation du système de DAI est une illustration sur un cas-test très spécifique et dont la méthodologie n'est pas encore fixe et déterminée. Elle permet néanmoins d'avoir des premiers éléments de méthodologie pour des évaluations socio-économiques de mesures de gestion dynamique de trafic ayant un impact plus microscopique sur un axe. Elle soulève notamment de grands problèmes dont le plus important semble être la prévision de trafic, qui est extrêmement importante pour ces mesures à impact très microscopiques. La question de la fiabilité des données est également assez importante à soulever. Le calibrage de paramètres-clés est aussi essentiel à assurer. On peut, entre autres, noter dans le cadre d'études précises :

- la capacité réelle de l'infrastructure,
- la répartition par voie (en amont d'un divergent, notamment),
- les coefficients pour les convergents.

Cette évaluation est un exemple d'utilisation simple des théories simplifiées du trafic, qui permettent de mettre en avant l'importance de la gestion de trafic en regard aux gains de temps lors de congestion, et l'importance de la fiabilité des temps de parcours.

Bibliographie

- [1] : Collection Sétra, *Détection Automatique d'Incidents*, 1999
- [2] : Simon Cohen, Inrets, *Systèmes et méthodes de détection automatique des incidents routiers*, 2005
- [3] : Boiteux, *Transports : choix des investissements et coût des nuisances*, 2001
- [4] : Collection Certu, *DATA PLUS : étude prospective dans le domaine du trafic routier*, 1999
- [5] : Rapport d'étude Sétra, *Panorama des systèmes de recueil de données de trafic routier*, 2012
- [6] : Rapport d'étude Sétra (PCI RDRT), *Évaluation a priori des mesures de régulation de trafic par des modèles simplifiés*, 2012

Glossaire

CCD	<i>Charge-coupled device</i> (dispositif à transfert de charge)
CMOS	<i>Complementary metal oxide semiconductor</i> (semiconducteur complémentaire métal-oxyde)
CVC	Courbe de véhicules cumulés
DAI	Détection automatique d'incidents
DD	Délai de détection
DGITM	Direction générale de l'infrastructure, des transports et de la mer
FFA	Taux de fausses alarmes
FIFO	<i>First in first out</i> (premier arrivé, premier sorti)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (système de localisation mondial)
(Full) HD	(Très) Haute définition
HPM	Heure de pointe du matin
HPS	Heure de pointe du soir
Inrets	Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité
PL	Poids lourd
PMV	Panneau à messages variables
Sétra	Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements
TD	Taux de détection
TFA	Taux de faux alarmes
VL/VP	Véhicule léger/Véhicule particulier

Pôles de Compétences et d'Innovation

"Régulation dynamique des réseaux de transport" (RDRT).

Ce document a été élaboré sous le pilotage du Sétra par le PCI RDRT.

*Le **PCI RDRT** a pour objectifs d'apporter les éléments de diagnostic et d'évaluation nécessaires à l'élaboration et la mise-en œuvre des stratégies, mesures et systèmes de régulation des flux de transports, notamment dans une logique multimodale.*

Le PCI RDRT est situé au CETE de Lyon et CETE Île-de-France.



Rédacteurs

Virginie CORRE – CETE IdF

mél : virginie.corre@developpement-durable.gouv.fr

Sylvain TROUBETZKY – CETE Lyon

mél : sylvain.tribetzky@developpement-durable.gouv.fr

Boris LY – Sétra

mél : boris.ly@developpement-durable.gouv.fr

Au 1^{er} janvier 2014, les 8 CETE, le Certu, le Cetmef et le Sétra fusionnent pour donner naissance au Cerema : centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements

110, rue de Paris - SOURDUN – BP 124 – 77487 PROVINS Cedex – France
téléphone : 33 (0)1 60 52 31 31 – télécopie : 33 (0)1 60 52 31 69

Document consultable et téléchargeable sur les sites web du Sétra :

- Internet : <http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr>
- Intranet (Réseau ministère) : <http://intra.setra.j2>

Ce document ne peut être vendu. La reproduction totale du document est libre de droits.
En cas de reproduction partielle, l'accord préalable du Sétra devra être demandé.

© 2013 Sétra – Référence : 1318w – ISRN : EQ-SETRA—13-ED16—FR

Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique
du MEDDE

