

Les avancées technologiques dans le domaine de la télématique routière ont favorisé l'amélioration des outils existants de recueil de données du trafic et parfois l'apparition de nouveaux capteurs ou de nouvelles architectures.

Parallèlement, face aux nouveaux comportements des usagers devenus demandeurs et consommateurs d'information routière, les exploitants d'infrastructures routières et des grands groupes industriels ont développé de nouveaux produits, qui nécessitent une alimentation permanente en données de trafic issues de sources multiples : capteurs à boucles, caméras, systèmes embarqués, véhicules traceurs....

L'exploitation conjointe de ces données de sources multiples nécessite la mise en oeuvre de méthodes spécifiques de fusion.

Ces actes rassemblent les communications de la journée spécialisée du 24 octobre 2002, organisée par le LICIT, unité mixte INRETS-ENTPE, consacrée au *recueil multiforme et à la fusion de données en circulation routière*. L'objectif était, d'une part d'appréhender les pratiques actuelles et les besoins non couverts des exploitants et des opérateurs en matière de recueil de données et d'autre part de faire le point sur les techniques permettant la synthèse des informations de sources multiples.

coordination scientifique :

**Nour-Eddin EL FAOUZI** est chargé de recherche au Laboratoire Ingénierie Circulation Transports (LICIT)

**INRETS** INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS ET LEUR SÉCURITÉ



ISSN 0769-0266  
ISBN 2-85782-579-X

Actes INRETS n° 87



RECUEIL MULTIFORME ET FUSION DE DONNÉES EN CIRCULATION ROUTIÈRE



coordination scientifique  
Nour-Eddin EL FAOUZI

## RECUEIL MULTIFORME ET FUSION DE DONNÉES EN CIRCULATION ROUTIÈRE



Journée spécialisée  
du 24 octobre 2002

Prix : 15,24 €

Actes n° 87  
Avril 2003

LES COLLECTIONS DE L'INRETS

Conformément à la note du 04/07/2014 de la direction générale de l'Ifsttar précisant la politique de diffusion des ouvrages parus dans les collections éditées par l'Institut, la reproduction de cet ouvrage est autorisée selon les termes de la licence CC BY-NC-ND. Cette licence autorise la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, cet ouvrage peut être copié, distribué et communiqué par tous moyens et sous tous formats.



Attribution — Vous devez créditer l'Oeuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Ifsttar vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Oeuvre.



Pas d'Utilisation Commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette Oeuvre, tout ou partie du matériel la composant.



Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Oeuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'Oeuvre modifiée.

## Le patrimoine scientifique de l'Ifsttar

Le libre accès à l'information scientifique est aujourd'hui devenu essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés pour de nouveaux travaux, l'Ifsttar a entrepris la numérisation et la mise en ligne de son fonds documentaire. Ainsi, en complément des ouvrages disponibles à la vente, certaines références des collections de l'INRETS et du LCPC sont dès à présent mises à disposition en téléchargement gratuit selon les termes de la licence Creative Commons CC BY-NC-ND.

Le service Politique éditoriale scientifique et technique de l'Ifsttar diffuse différentes collections qui sont le reflet des recherches menées par l'institut :

- Les collections de l'INRETS, Actes
- Les collections de l'INRETS, Outils et Méthodes
- Les collections de l'INRETS, Recherches
- Les collections de l'INRETS, Synthèses
- Les collections du LCPC, Actes
- Les collections du LCPC, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Rapport de recherche des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Méthode d'essai



Institut Français des Sciences et Techniques des Réseaux,  
de l'Aménagement et des Transports  
14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne  
F-77447 Marne la Vallée Cedex 2

Contact : [diffusion-publications@ifsttar.fr](mailto:diffusion-publications@ifsttar.fr)

[www.ifsttar.fr](http://www.ifsttar.fr)



---

Coordination Scientifique  
Nour-Eddin EL FAOUZI

# **Recueil multiforme et fusion de données en circulation routière**

Actes de la journée spécialisée du  
24 octobre 2002  
Lyon-Bron

Actes INRETS N° 87  
Avril 2003

---

---

**Coordination scientifique, édition des actes :**

Nour-Eddin El Faouzi, Chargé de Recherche à l'INRETS-LICIT  
nour-eddin.elfaouzi@inrets.fr

**L'Unité de recherche :**

Laboratoire d'Ingénierie Circulation-Transports (LICIT)  
25, avenue François Mitterrand – case 24 – F 69675 Bron cedex  
Tél. : 04 72 14 23 00 – Télécopie : 04 72 37 68 37

**Auteurs des communications :**

Isabelle Bloch, Laurent Breheret, Simon Cohen, Yves David, Nour-Eddin El Faouzi, Benoît Ferry, Patrick Laffont, Jean Baptiste Lesort, Philippe Mansuy, Jean-Marc Morin, Laurent Nazzani, Nicolas Schwab.

**Organisation de la journée :**

Nour-Eddin El Faouzi, Nicole Teillac  
Avec la participation de Stéphane Aillerie, Marie-Thérèse Biechy, Nadine Favrin, Nicole Russo, Patrick Verard.

INRETS - Service des publications 2, avenue du Général Malleret-Joinville  
94114 ARCUEIL CEDEX - Tél. : 33 (0)1 47 40 70 74 [www.inrets.fr](http://www.inrets.fr)

© Les collections de l'INRETS

N ° ISBN 2-85782-579-X N ° ISSN 0769-0266

---

En application du code de la propriété intellectuelle, l'INRETS interdit toute reproduction intégrale ou partielle du présent ouvrage par quelque procédé que ce soit, sous réserve des exceptions légales.

# Fiche bibliographique

<b>UR (1er auteur)</b> Laboratoire d'Ingénierie Circulation-Transports (LICIT)		<b>Projet n°</b>	<b>Actes INRETS n° 87</b>
<b>Titre</b> Recueil multiforme et fusion de données en circulation routière			
<b>Sous-titre</b> Journée spécialisée du 24 octobre 2002		<b>Langue</b> F	
<b>Auteur(s)</b> Nour-Eddin El Faouzi (ed.)		<b>Rattachement ext.</b>	
<b>Nom adresse financeur, co-éditeur</b>		<b>N° contrat, conv.</b>	
		<b>Date de publication</b> Avril 2003	
<b>Remarques</b>			
<b>Résumé</b> <p>Les avancées technologiques en matière de télématique routière (électronique embarquée, localisation des véhicules, télécommunications, traitement de l'information...) ont favorisé l'amélioration des moyens existants de collecte de données du trafic et parfois l'apparition de nouveaux capteurs ou de nouvelles architectures : équipements embarqués dans les véhicules, déportés en bord de route, recueil multiforme,...</p> <p>Parallèlement, face aux nouveaux comportements des usagers, devenus à la fois demandeurs et consommateurs d'information routière, les exploitants d'infrastructures routières et les grands groupes industriels (constructeurs automobiles, équipementiers,...) ont innové avec de nouveaux produits, qui nécessitent une alimentation permanente en données de trafic issues de sources multiples : capteurs à boucles, caméras, systèmes embarqués, véhicules traceurs...</p> <p>La combinaison de sources multiples est perçue, à juste titre, comme une réponse adaptée aux besoins opérationnels des exploitants et des opérateurs pour mieux remplir les fonctions dont ils sont chargés.</p> <p>Cet ouvrage, rassemble les communications de la journée spécialisée du 24 octobre 2002, organisée par le LICIT, unité mixte INRETS-ENTPE, consacrée au recueil multiforme et à la fusion de données en circulation routière. L'objectif de cette journée vise, d'une part à appréhender les pratiques actuelles y compris les besoins non couverts des exploitants et des opérateurs en matière de recueil de données et, d'autre part, de faire le point sur les techniques de synthèse et de fusion des informations de sources multiples.</p>			
<b>Mots clés</b> Recueil multiforme, fusion de données, ingénierie du trafic, temps de parcours, véhicules traceurs.		<b>Diffusion</b> libre	
<b>Nombre de pages</b> 130	<b>Prix</b> 15,24 €	<b>Confidentiel</b> non	<b>Bibliographie</b> oui

# Publication data form

<b>UR (1st author)</b> Transport and Traffic Engineering Laboratory (LICIT)		<b>Projet n°</b>	<b>INRETS proceedings N° 87</b>
<b>Title</b> Multiform data collection and data fusion in traffic engineering			
<b>Subtitle</b>		<b>Language</b> F	
<b>Author(s)</b> Nour-Eddin El Faouzi (ed.)		<b>Affiliation</b>	
<b>Sponsor, co-editor, name and address</b>		<b>Contract, conv.</b>	
		<b>Publication date</b> April 2003	
<b>Notes</b>			
<p><b>Summary</b></p> <p>Technological advances in the area of road telematics (electronic systems aboard vehicle, vehicle localization, telecommunications, data processing...) have favored an improvement of in existing means of traffic data collection, and sometimes the appearance of new sensors or new architectures : equipment on board vehicles, off-set on the side of roads, multiform data collection...</p> <p>At the same time, in response to the new behaviors of the users, both demanding and consuming traffic information, the traffic management centers and industrial groups (car manufacturers, parts manufacturers...) have developed information and guidance devices, which require a permanent traffic data supply stemming from multiple sources : loop detectors, video cameras, probe vehicles,...</p> <p>The combination of multiple sources is perceived, rightly, as a well-adapted answer to the operational needs of traffic management centers and traffic information operators, allowing them to achieve their goal more efficiently.</p> <p>This volume, gathers the papers resulting from the workshop organized by the Transport and Traffic Engineering Laboratory (LICIT), joint research Unit INRETS-ENTPE, devoted to the multiform collection and fusion of traffic data. The objective of this workshop is twofold : on the one hand to give an overview of current practices and the needs which have yet to be met for traffic management centers and traffic information operators regarding traffic data collection and on the other hand to give a survey of data fusion techniques and to report specific research applications.</p>			
<b>Key words</b> Multiform data collection, data fusion, traffic engineering, travel time, probes		<b>Distribution statement</b> free	
<b>Nb of pages</b> 130	<b>Price</b> 15,24 €	<b>Declassification</b>	<b>Bibliography</b> yes

---

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>9</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>13</b>
<b>Chapitre 1 : Recueil multiforme</b>	<b>15</b>
<b>Capteurs et techniques de recueil : analyse prospective</b>	<b>15</b>
<i>Yves David, SODIT</i>	
<b>1. Introduction</b>	<b>15</b>
<b>2. Analyse bibliographique</b>	<b>16</b>
<b>3. Variables intervenant dans l'exploitation du trafic</b>	<b>16</b>
<b>4. Phénomènes physiques mis en œuvre dans les capteurs</b>	<b>17</b>
<b>5. Les fonctions qui font intervenir des capteurs</b>	<b>18</b>
<b>6. Enquête auprès des professionnels</b>	<b>20</b>
6.1 Aspects économiques	20
6.2 Intérêt des techniques de fusion de données	20
<b>7. Conclusion</b>	<b>22</b>
<b>8. Références</b>	<b>23</b>
<b>Sources de données trafic et caractéristiques : Exemple des temps de parcours</b>	<b>25</b>
<i>Jean-Baptiste Lesort, LICIT INRETS-ENTPE</i>	
<b>1. Introduction</b>	<b>25</b>
<b>2. Les milieux</b>	<b>26</b>
2.1 Le réseau urbain de surface	26
2.2 Les voies rapides urbaines (VRU)	26
2.3 Les autoroutes de liaison	26
2.4 Rase campagne hors autoroute	27
<b>3. Les acteurs et les applications</b>	<b>27</b>
3.1 Les maîtres d'ouvrage	27
3.2 Les prestataires de services d'information	28
3.3 Les exploitants de transport public	28

3.4 Les forces de Police	29
3.5 Les usagers	29
<b>4. La référence</b>	<b>30</b>
<b>5. Les Sources</b>	<b>31</b>
5.1 Les Sources « trajet individuel »	31
5.2 Les Sources « flux »	32
<b>6. Les utilisations</b>	<b>32</b>
<b>7. Conclusion</b>	<b>33</b>
<b>8. Références</b>	<b>33</b>
<b>Chapitre 2 : Besoins des exploitants, des opérateurs et pratiques palliatives</b>	<b>35</b>
<b>Réseau urbain et périurbain : cas de la ville de Toulouse</b>	<b>35</b>
<i>Patrick Laffont, Ville de Toulouse</i>	
<b>1. Objectifs</b>	<b>35</b>
<b>2. Les moyens mis en œuvre pour le recueil</b>	<b>37</b>
2.1 Les capteurs utilisés	37
2.2 La mise en forme des données	37
<b>3. Conclusion</b>	<b>42</b>
<b>4. Référence</b>	<b>42</b>
<b>Réseau interurbain : Estimation des temps de parcours sur le réseau ASF</b>	<b>43</b>
<i>Nicolas Schwab, Laurent Nazzani, ASF</i>	
<b>1. Les temps de parcours sur le réseau ASF</b>	<b>44</b>
1.1 Déploiement opérationnel	44
1.2 Méthode de calcul	44
1.3 Stratégie de diffusion de l'information	45
<b>2. Les évolutions engagées</b>	<b>46</b>
2.1 Optimisation des données de comptage	46
2.2 Densification du recueil de données	46
<b>3. Perspectives d'évolution à plus long terme</b>	<b>46</b>
<b>4. Références</b>	<b>47</b>
<b>Réseau national : Cas de la vallée de Tarentaise</b>	<b>49</b>
<i>Philippe Mansuy, DDE-73</i>	
<b>1. Introduction</b>	<b>49</b>
<b>2. Les contraintes sur ce réseau</b>	<b>49</b>

---

2.1 Zones exposées à des chutes de bloc	50
2.2 Sécurité dans les tunnels	50
2.3 Charges exceptionnelles de trafic	51
<b>3. Stratégies de gestion</b>	<b>51</b>
3.1 Sens montant	51
3.2 Sens descendant des stations	52
<b>4. Architecture matérielle</b>	<b>52</b>
4.1 Interface développé pour la gestion des zones à risques	52
4.2 Pratiques de l'exploitant	53
4.3 Les orientations	54
<b>Référence</b>	<b>54</b>
<b>Besoin des exploitants, des opérateurs et pratiques palliatives : Synthèse et compléments</b>	<b>55</b>
<i>Benoît Ferry, DREIF-DIT</i>	
<b>1. Les utilisateurs de données de trafic</b>	<b>55</b>
<b>2. Enquête auprès de 16 CIGT</b>	<b>55</b>
<b>3. Résultats globaux sur les besoins</b>	<b>56</b>
<b>4. Les autres besoins</b>	<b>56</b>
<b>5. Eléments de synthèse</b>	<b>56</b>
5.1 Constat	56
5.2 Besoins	57
<b>6. Référence</b>	<b>57</b>
<b>Chapitre 3 : Techniques de fusion de données et applications à l'exploitation du trafic</b>	<b>59</b>
<b>Méthodes numériques en fusion de données</b>	<b>59</b>
<i>Isabelle Bloch, ENST Paris</i>	
<b>1. Introduction</b>	<b>59</b>
<b>2. Schéma de fusion</b>	<b>60</b>
<b>3. Fusion probabiliste et bayésienne</b>	<b>61</b>
3.1 Mesures d'information	61
3.2 Modélisation et estimation	62
3.3 Combinaison dans un cadre bayésien	63
3.4 Combinaison vue comme un problème d'estimation	65
3.5 Décision	65
<b>4. Fusion dans la théorie des fonctions de croyance</b>	<b>65</b>
4.1 Modélisation	66

---

4.2 Estimation des fonctions de masse	68
4.3 Combinaison conjonctive	71
4.4 Autres modes de combinaison	74
4.5 Décision	75
<b>5. Fusion floue et possibiliste</b>	<b>76</b>
5.1 Modélisation	76
5.2 Fonctions d'appartenance et distributions de possibilité	78
5.3 Combinaison	79
5.4 Décision	84
<b>6. Conclusion</b>	<b>84</b>
<b>7. Références</b>	<b>85</b>
<b>Estimation multisource des temps de parcours : panorama et premiers résultats</b>	<b>91</b>
<i>Nour-Eddin El Faouzi, LICIT INRETS-ENTPE</i>	
<b>1. Introduction</b>	<b>92</b>
<b>2. Contexte opérationnel</b>	<b>92</b>
<b>3. Techniques d'agrégation et de fusion explorées</b>	<b>94</b>
3.1 Agrégation d'estimateurs	96
3.2 Fusion de données	99
<b>4. Conclusions et perspectives</b>	<b>106</b>
<b>5. Références</b>	<b>107</b>
<b>Une fusion d'algorithmes de détection automatique des incidents routiers</b>	<b>109</b>
<i>Simon Cohen, GREZIA – INRETS</i>	
<b>1. L'importance de l'intégration</b>	<b>109</b>
<b>2. L'évolution des technologies de DAI</b>	<b>110</b>
<b>3. Des performances variables</b>	<b>111</b>
<b>4. Le calibrage optimal des algorithmes</b>	<b>111</b>
<b>5. Des essais de fusion d'algorithmes</b>	<b>112</b>
5.1 Un essai neuronal	112
5.2 Une procédure de vote par veto	113
5.3 Un couplage logique	113
<b>6. Une application sur un site francilien</b>	<b>114</b>
6.1 Le calibrage	114
6.2 Les performances de la fusion par couplage	114

---

<b>7. Une perspective pour l'exploitation</b>	<b>116</b>
<b>8. Références</b>	<b>117</b>
<b>Applications de la fusion de données à la surveillance du trafic et à l'information des usagers</b>	<b>119</b>
<i>Laurent Breheret, SODIT</i>	
<b>1. Introduction</b>	<b>119</b>
<b>2. Les données utilisables</b>	<b>120</b>
<b>3. Les modèles applicables</b>	<b>120</b>
<b>4. Les étapes dans la fusion de données</b>	<b>122</b>
<b>5. Le système de fusion de données étudié</b>	<b>122</b>
<b>6. Conclusion</b>	<b>123</b>
<b>7. Références</b>	<b>124</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>125</b>



---

# Remerciements

L'organisateur remercie les présidents des sessions, les intervenants pour la qualité scientifique de leurs exposés ainsi que pour leur diligence dans la production de manuscrits de qualité, et enfin les très nombreux participants de tous horizons qui ont favorisé les échanges d'idées durant les exposés et la table ronde de clôture de cette journée.



---

# Introduction générale

Les avancées technologiques en matière de télématique routière (électronique embarquée, localisation des véhicules, télécommunications, traitement de l'information...) ont favorisé l'amélioration des moyens existants de collecte de données du trafic et parfois l'apparition de nouveaux capteurs ou de nouvelles architectures : équipements embarqués, déportés en bord de route, recueil multiforme,...

Parallèlement, face aux nouveaux comportements des usagers, devenus à la fois demandeurs et consommateurs d'information routière, les exploitants d'infrastructures routières et les grands groupes industriels (constructeurs automobiles, équipementiers,...) ont innové avec de nouveaux produits, qui nécessitent une alimentation permanente en données de trafic issues de sources multiples : capteurs à boucles, caméras, systèmes embarqués, véhicules traceurs...

La combinaison de sources multiples est perçue, à juste titre, comme une réponse satisfaisante aux besoins opérationnels des exploitants et des opérateurs afin de mieux remplir les fonctions dont ils sont chargés. L'exploitation pertinente, d'une part des complémentarités entre les différentes sources, et d'autre part du volume et de la richesse des données disponibles, exige néanmoins la mise en œuvre de méthodes de fusion de données propres à traiter les spécificités de chacune des sources, les incohérences et les contradictions éventuelles.

L'objectif de cette journée, consacrée au recueil multiforme de données et à la fusion de données en circulation routière, vise donc d'une part, à appréhender les pratiques actuelles y compris les besoins non couverts des exploitants et des opérateurs en matière de recueil de données et, d'autre part, de faire le point sur les techniques de synthèse et de fusion des informations de sources multiples.

Au travers de quelques exemples de recherches menées sur la fusion de données en ingénierie du trafic, cette journée a permis de créer l'opportunité de dialogue entre les participants et de concourir à l'identification d'applications potentielles en circulation routière, dans une perspective de déboucher sur des projets plus ambitieux associant les exploitants, les opérateurs de systèmes d'information et leurs conseils.

N.-E. El Faouzi



---

# Chapitre 1

## Recueil multiforme

# Capteurs et techniques de recueil analyse prospective

**Yves David**

*SODIT*

*2, avenue Edouard Belin*

*31400 Toulouse*

---

### **Résumé**

*Cette analyse prend comme point de départ une étude menée en 1999 par la SODIT et le CETE de l'Est pour le compte du PREDIT, sur l'évolution des technologies et des pratiques en matière de recueil de données de trafic. L'objectif de cette étude était de dresser un état de l'art sur la technologie des capteurs et sur les différentes applications des systèmes de recueil de données, et de définir les besoins de recherche pouvant exister dans ce domaine.*

*L'exposé présentera plus en détail la démarche et les résultats de cette étude, en essayant de les mettre à jour à partir des publications plus récentes parues sur le sujet.*

---

## **1. Introduction**

Une étude baptisée DATAPLUS a été menée en 1999 pour le compte du PREDIT par la SODIT, avec la collaboration du CETE de l'Est, sur l'évolution des techniques et des pratiques en matière de recueil de données, avec pour objectif de dégager les besoins de recherche dans ce domaine [2, 3].

Le programme proposé comportait différentes démarches complémentaires destinées à permettre une exploration aussi exhaustive que possible du champ de l'étude :

- une analyse bibliographique en vue d'inventorier les grandeurs intéressant les exploitants du trafic, l'évolution des méthodes de recueil, leurs principales applications et les performances obtenues ;
- un inventaire, fondé sur la bibliographie et l'expérience des partenaires chargés de l'étude, des variables pouvant intervenir dans l'exploitation du trafic ;

- un examen sommaire des principaux phénomènes physiques et des techniques de capteurs utilisés dans les recueils de données ;
- 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 ;
- des contacts avec différents professionnels intéressés par le recueil de données : exploitants, fabricants, services d'étude et d'essais ;
- enfin un examen des aspects économiques et des enjeux.

Dans le présent exposé on se propose de rappeler les principaux résultats de cette étude, en tenant éventuellement compte de publications plus récentes, et en insistant sur les conclusions qui s'en dégagent concernant le domaine de la fusion des données de trafic.

## 2. Analyse bibliographique

Environ 400 documents publiés dans les 10 dernières années ont été collectés et analysés. Les principales constatations qui se dégagent de l'analyse de cette documentation sont :

- l'intérêt croissant porté aux techniques de capteurs dites « non intrusives », notamment au traitement d'images TV. Cependant les boucles inductives sont loin d'être abandonnées et elles sont largement utilisées dans la plupart des grands systèmes d'exploitation mis en place actuellement ;
- l'importance attachée à la détection automatique des incidents (DAI) et à la mesure des temps de trajet ;
- la place relativement importante consacrée dans la littérature à des fonctions autres que la régulation de trafic ou l'information routière, telles que le péage électronique et la répression des infractions.

## 3. Variables intervenant dans l'exploitation du trafic

L'analyse bibliographique et les discussions entre experts ont permis d'établir une liste de l'ordre de 40 variables pouvant être classées en 9 catégories :

- caractéristiques fondamentales du trafic (Q, V, TO, K) ;
- grandeurs complémentaires ou dérivées : présence/passage de véhicules, longueurs de queues, niveaux de trafic, congestion, temps de parcours, O/D ;
- événements ayant une incidence sur le trafic : accidents, incidents, bouchons, mouvements tournants, changements de voie ;
- caractéristiques des véhicules ;
- détection d'objets autres que les VP ou PL ;
- surveillance des infractions ou de défauts des véhicules ;
- détection des conditions météorologiques ;

- grandeurs liées à l'environnement (bruit, pollution) ;
- grandeurs liées à des besoins d'étude et de recherche.

Chacune de ces variables a fait l'objet d'une fiche contenant les rubriques suivantes :

- objectifs de la mesure relative à cette variable ;
- fonctions intéressées ;
- performances attendues ;
- capteurs ou principes physiques utilisables ;
- performances obtenues ;
- avantages et inconvénients de chaque capteur - problèmes rencontrés ;
- aspects économiques ;
- besoins de développement.

Les résultats de cette analyse ont été résumés dans un tableau croisant ces variables et les moyens de mesure disponibles, qui fait apparaître :

1. que pour chaque variable considérée il existe généralement au moins un capteur permettant de la mesurer ;
2. que le traitement d'image vidéo notamment se prête à la mesure d'un nombre important de variables ;
3. que quelques besoins restent cependant insuffisamment couverts : par exemple le pesage dynamique des essieux, dont la précision mériterait d'être améliorée, ou la détection des 2-roues.

## 4. Phénomènes physiques mis en œuvre dans les capteurs

Une liste des principaux phénomènes physiques mis en œuvre dans les capteurs a été établie :

- induction électromagnétique ;
- magnétomètres ;
- capteurs micro-ondes actifs/passifs ;
- infrarouge passif/actif ;
- capteurs acoustiques passifs/ actifs (ultrasons) ;
- capteurs sensibles à la pression (tubes pneumatiques, piézo-électriques... etc.) ;
- capteurs optiques (vidéo, lasers, capteurs infrarouge passifs... etc.) ;
- capteurs météo : vent, visibilité, température, anémomètres, humidité... etc. ;
- capteurs mesurant l'effet du trafic sur l'environnement : CO, CO<sub>2</sub>, NO, bruit ;
- véhicules actifs (ou véhicules « flottants »).

Si l'on fait abstraction des capteurs météo ou liés à la protection de l'environnement, et si l'on s'intéresse uniquement aux capteurs de trafic proprement dits, il apparaît que ces capteurs font essentiellement appel à 3 phénomènes physiques : l'électromagnétisme, l'acoustique et l'effet de la pression des pneus.

Bien que l'on puisse envisager d'autres principes physiques pour détecter des véhicules, il est vraisemblable que les principales évolutions en matière de capteurs continueront à faire intervenir ces 3 phénomènes.

Dans le domaine de l'électromagnétisme en particulier, on peut remarquer que les capteurs existants mettent en œuvre une partie très limitée du spectre :

- la bande 50-150 kHz (boucles) ;
- les bandes autour de 10 et 24 GHz (radars) ;
- la bande infrarouge (lasers ou capteurs IR passifs) ;
- la bande optique visible (vidéo).

La littérature récente montre déjà que d'autres bandes de fréquence sont explorées :

- la bande 77 GHz en principe allouée aux radars embarqués, mais qui peut avoir des applications pour des radars fixes [6] ;
- les bandes 94 GHz ou 180 GHz envisagées pour des capteurs radiométriques passifs [7] ;
- les bandes GSM et 5,8 GHz : le fait que de nombreux véhicules émettent dans ces bandes peut être mis à profit pour les besoins de l'analyse du trafic ;
- enfin dans la bande infrarouge, le prix des caméras commence à les rendre abordables pour l'observation du trafic [9].

Une autre évolution évoquée dans l'étude DATAPLUS est relative à l'emploi de drones ou ballons comme supports pour des capteurs d'observation du trafic : les progrès faits en matière de drones ces dernières années et évoqués régulièrement dans la presse rendent cette perspective tout à fait plausible.

Les perspectives d'utilisation de « véhicules flottants » (« probe cars ») tiennent enfin une place de plus en plus importante dans la littérature, et il est probable que ce moyen d'analyse du trafic va se développer, en tirant parti d'une part des progrès réalisés en matière de lecture automatique de plaques minéralogiques, d'autre part du développement des communications sol-véhicules.

## 5. Les fonctions qui font intervenir des capteurs

A partir de l'examen de différents inventaires de fonctions intéressant l'exploitation de la route, réalisés dans les grands programmes internationaux tels que PROMETHEUS, ITS America, DRIVE ou ERTICO, une liste de 43 fonctions a été élaborée, pouvant se classer sous les 17 rubriques suivantes :

- régulation du trafic ;
- information routière ;

- guidage dynamique ;
- sécurité-protection anticollision ;
- sécurité par rapport aux conditions météo ;
- gestion des accidents/incidents - DAI ;
- planification des déplacements ;
- gestion de la demande - intermodalité ;
- péages ;
- gestion du stationnement - parkings et aires de service ;
- surveillance de l'environnement : bruit, pollution ;
- répression des infractions - surveillance des équipements de sécurité des véhicules ;
- protection des ouvrages d'art (poids, gabarit) ;
- autoroute automatique/AICC ;
- maintenance des infrastructures ;
- surveillance de l'état du conducteur ;
- études - recherches - évaluations - statistiques.

On peut remarquer tout d'abord que le nombre de fonctions ainsi mises en évidence fait apparaître clairement le caractère stratégique du recueil de données pour l'exploitation du trafic.

Des fiches ont été établies pour chacune de ces fonctions, indiquant

- ses 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.

En établissant des correspondances entre fonctions, besoins de mesures, et capteurs existants, on a pu mettre en évidence que l'on dispose actuellement de suffisamment de moyens de mesure et de détection pour réaliser la plupart des fonctions étudiées. Cependant quelques besoins restent insuffisamment couverts, par exemple :

- l'observation du trafic sur des réseaux routiers de rase campagne, qui soulève des difficultés du fait de l'étendue de ces réseaux, et pour lesquels une solution consisterait à faire appel à des moyens de surveillance aérienne - aéronefs, ballons, drones, voire satellites - en utilisant des capteurs de type vidéo ou radar
- la prédiction des temps de trajet sur des réseaux urbains ;
- la détermination rapide de matrices origine/destination, qui pourrait bénéficier des développements en matière de lecture automatique de plaques minéralogiques ;
- la répression des infractions dans des péages électroniques multivoies ;

- la détection en sécurité d'obstacles ou de véhicules arrêtés dans des zones de mauvaise visibilité (courbes, sommets de côte), qui peut être indispensable pour les fonctions de type « autoroute automatique » ;
- la détection des piétons.

## 6. Enquête auprès des professionnels

Cette enquête a confirmé dans l'ensemble les résultats dégagés par les autres démarches.

On peut retenir des entretiens avec les exploitants de réseaux routiers qu'ils se satisfont dans l'ensemble des performances des capteurs dont ils disposent, mais qu'ils sont particulièrement sensibles :

- au coût d'installation et de maintenance des dispositifs de recueil de données ;
- à la disponibilité insuffisante des capteurs, et notamment des boucles implantées dans la chaussée.

### 6.1 Aspects économiques

Une évaluation sommaire du marché des capteurs a été réalisée afin de faire ressortir les enjeux économiques des actions de recherche-développement dans ce domaine.

Cette évaluation a montré que le chiffre d'affaires en France lié à la production de capteurs et de stations de détection était relativement modeste, de l'ordre de 80 MF/an.

### 6.2 Intérêt des techniques de fusion de données

Les techniques de fusion de données sont encore relativement peu appliquées sur le terrain, mais font l'objet de recherches dans de nombreux laboratoires aussi bien en France qu'à l'étranger.

Les besoins dans ce domaine devraient s'accroître dans les années qui viennent sous l'influence de plusieurs facteurs :

#### a) Multiplication et diversification des capteurs implantés sur les routes

Les exploitants sont d'accord pour estimer que la densité des installations de recueil de données devrait s'accroître sur la plupart des infrastructures. Par ailleurs si les mesures de trafic ont jusqu'à présent reposé presque exclusivement, du moins en Europe, sur les boucles inductives, d'autres capteurs commencent à être utilisés couramment pour l'exploitation routière. C'est le cas par exemple :

- des caméras TV avec analyse d'image, dont l'usage se développe très vite pour la mesure du trafic. Le nombre de systèmes installés dans le monde est passé de l'ordre de quelques prototypes au début des années 90 à plus de 20 000 actuellement. Ces caméras peuvent se substituer aux boucles, mais peuvent aussi dans certains cas leur être associées ;

- des dispositifs de lecture automatique de plaques minéralogiques par caméra TV, utilisées par exemple sur le réseau routier britannique par le serveur d'information routière TrafficMaster pour la mesure des temps de trajet ;
- d'autres capteurs de surveillance du trafic sur des zones étendues sont en cours de développement et pourraient apparaître dans les prochaines années : radar français ARMADA, radar italien DEEP VIEW [8].

## b) Développement du recueil de données par « véhicules flottants » (« probe vehicles »)

Outre la lecture automatique de plaques évoquée ci-dessus, le développement des moyens de communication entre sol et véhicules par exemple par radio-téléphone GSM ou par les liaisons courte portée à 5,6 GHz ou en infra-rouge, élargira la palette des outils permettant de suivre des véhicules individuellement sur un réseau, et de nombreuses publications évoquent l'utilisation de « véhicules flottants » pour la mesure du trafic, l'évaluation des temps de trajet, et la détection des incidents.

## c) Mise en œuvre de fonctions devant respecter des contraintes sévères de sécurité

La réalisation des installations d'exploitation de la route a jusqu'à présent été peu tributaire de contraintes de sécurité, beaucoup de ces installations ayant un caractère informatif et laissant au conducteur la responsabilité de sa sécurité.

La seule application soumise à des contraintes de sécurité rigides est le feu de carrefour, qui doit être conçu de façon à ne jamais autoriser de mouvements dangereux (« verts en croix »).

On voit apparaître cependant des fonctions nouvelles, d'aide à la conduite, qui vont imposer des précautions particulières pour la réalisation du recueil de données. C'est le cas par exemple :

- de la fonction d'aide à la conduite en file (ICC : Intelligent Cruise Control) : cette fonction met en œuvre des dispositifs de détection embarqués, radars ou lasers. Ces dispositifs reposent cependant sur l'émission d'ondes qui se propagent en ligne droite, et ont des difficultés pour détecter des obstacles dans les courbes ou derrière les sommets de côtes. Le conducteur doit donc rester vigilant lorsqu'il aborde ces zones à visibilité réduite. La mise en sécurité totale de cette fonction exigerait que l'on dispose dans ces zones des capteurs au sol capables de détecter les obstacles cachés et de déclencher un avertissement en cas de danger ;
- de la protection contre les collisions en file dans les tunnels. Plusieurs dispositifs de signalisation lumineuse dynamique destinés à aider les conducteurs à maintenir des intervalles suffisants entre les véhicules ont déjà fait l'objet d'études préliminaires, tels le « Furet » ou le dispositif « STRIP » étudié par la SODIT pour le PREDIT [4, 11]. Ces dispositifs mettent en œuvre des capteurs qui permettent de commander des signaux lumineux implantés linéairement le long de la chaussée, et de créer ainsi des zones de protection derrière chaque véhicule. L'absence de détection d'un véhicule arrêté par exemple pourrait avoir des conséquences graves sur la sécurité du trafic ;

- une autre fonction, liée à la conduite automatique sur route ou autoroute, est également souvent évoquée dans la littérature, bien que sa réalisation pratique soit assez problématique : il s'agit de la protection contre les collisions dans des carrefours où les feux rouges classiques se verraient remplacer par des dispositifs de détection des véhicules en approche, associés à des moyens de communication sol-véhicules.

Dans tous les cas qui viennent d'être évoqués la sécurité du trafic repose sur une détection sûre des véhicules et autres obstacles pouvant se trouver sur la chaussée. Etant données les performances moyennes des capteurs existants, cette sûreté de détection ne pourra être garantie que par l'association de différents types de capteurs fonctionnant en redondance. Par exemple pour traiter du premier cas (ICC), un article japonais ([10]) évoque la possibilité d'associer un radar, un laser et des capteurs vidéo en lumière visible et en infrarouge.

#### d) Applications de la fusion de données

Les constatations précédentes suggèrent un certain nombre d'applications possibles des techniques de fusion de données :

- mise à profit de la multiplication des installations de recueil d'une technologie donnée (p.ex. capteurs à boucle) pour affiner les données recueillies, assurer un contrôle mutuel des stations de recueil, et éventuellement permettre une reconstitution de données manquantes ;
- combinaison de données fournies par des capteurs « ponctuels » (boucles) et des capteurs de surveillance de zones étendues (vidéo, radars) ;
- combinaison de données fournies par des capteurs au sol et par des véhicules flottants ;
- traitement de données fournies par des capteurs redondants avec pour objectif de garantir un certain objectif de sécurité.

## 7. Conclusion

Cet exposé illustre tout d'abord le caractère stratégique du recueil de données pour la réalisation de toutes les fonctions intéressant l'exploitation du trafic. C'est ce caractère stratégique, plus que l'enjeu économique de l'industrie des capteurs, qui justifie des efforts de recherche et de développement dans ce domaine.

Les thèmes sur lesquels ces efforts devraient porter ont été évoqués dans les différents paragraphes qui précèdent. **La fusion de données est certainement un des thèmes importants à soutenir.**

## Références

- [1] Ciccarelli A. et al. Innovative Traffic Data Collection : An Analysis of Potential Uses in Florida, *Florida Department of Transportation, Technical Memorandum, N° 1*, December, 2001.

- [2] Dataplus. Etude prospective PREDIT sur l'évolution des besoins dans le domaine du recueil de données de trafic - *Rapport PREDIT*, 30 septembre 1999.
- [3] David Y., L. Breheret, S. Care-Colin. State of art, perspectives and research needs in matter of road traffic sensors. *Proceedings of the World Congress on Intelligent Transport Systems : ITS'00*. 2000.
- [4] Durand-Rauchery. Controlling the distance between vehicles in tunnel., *Proceedings of the World Congress on Intelligent Transport Systems : ITS'00*. 2000.
- [5] Eckart O. Traffic monitoring using along track airborne interferometric SAR system. *Proceedings of the World Congress on Intelligent Transport Systems : ITS'00*. 2000.
- [6] Jägert F. et al. 77 GHz traffic radar sensor for speed enforcement. *Proceedings of the World Congress on Intelligent Transport Systems : ITS'00*. 2000.
- [7] Klingler M. et al. Millimetric wave passive imaging system for survey and obstacle detection in ITS., *Proceedings of the World Congress on Intelligent Transport Systems : ITS'01*. 2001.
- [8] Pani B. et al. Experimental evaluation of radar based vehicle tracking and traffic parameters estimation., *Proceedings of the World Congress on Intelligent Transport Systems : ITS'00*. 2000.
- [9] Ogasawa T. et al. Vehicle detection by infrared image processing. *Proceedings of the World Congress on Intelligent Transport Systems : ITS'99*. 1999.
- [10] Ozaki M. et al. Roles of the road sensors for AHS. *Proceedings of the World Congress on Intelligent Transport Systems : ITS'99*. 1999.
- [11] Strip. Etude de faisabilité d'un système de régulation de trafic en tunnel par bandes lumineuses. *Rapport PREDIT*. mai 2001.



---

# Sources de données trafic et caractéristiques : Exemple des temps de parcours

**Jean-Baptiste Lesort**

*Laboratoire d'Ingénierie Circulation-Transports (LICIT)*

*INRETS-ENTPE*

*25, avenue François Mitterrand*

*69675 Bron Cedex*

*[jean-baptiste.lesort@inrets.fr](mailto:jean-baptiste.lesort@inrets.fr)*

---

## **Résumé**

*Sur l'exemple de la mesure et de l'estimation des temps de parcours, on peut voir à la fois la diversité des mesures disponibles (depuis celles fournies par des véhicules spécialement équipés jusqu'aux possibilités offertes par les téléphones mobiles, en passant par les badges de télépéages et les capteurs de trafic) et celle des applications : applications en temps réel ou différé, en rase campagne ou en milieu urbain, à destination du public (information des usagers) ou des exploitants (indicateur de qualité du trafic).*

*On peut ainsi voir comment les spécifications d'un système en termes de performances résultent d'un compromis entre les besoins de l'application et les possibilités offertes par les données disponibles.*

---

## **1. Introduction**

Les données de trafic se caractérisent tout d'abord par leur diversité, diversité à la fois de nature, de moyens de recueil et d'utilisation. Elles se caractérisent également d'une façon générale par une qualité très moyenne en termes de précision, de disponibilité, de représentativité. Il est enfin relativement facile de recueillir de très grandes quantités de données, plus difficile d'en extraire l'information utile. A travers l'exemple de la mesure du temps de parcours, l'objectif de ce papier est de montrer comment, dans la diversité des exigences liées à chaque type d'application, il est possible d'utiliser au mieux les différentes sources de données.

## 2. Les milieux

La question de la mesure du temps de parcours se pose depuis longtemps dans des contextes et des milieux divers. Les premières applications concernaient d'abord le réseau urbain de surface, où il s'agissait plutôt d'enquêtes destinées à évaluer l'efficacité de stratégies d'organisation et de régulation du trafic. C'est ensuite en milieu périurbain, en particulier sur voies rapides, que des applications davantage liées à l'information des usagers se sont développées. Plus récemment la question de la mesure du temps de parcours sur autoroute de liaison a fait l'objet d'un intérêt marqué. Dans le même temps les applications de ce type au réseau urbain de surface étaient également développées. Tout ceci a bien montré les points communs et les spécificités de ces différents milieux.

### 2.1 Le réseau urbain de surface

Les réseaux urbains de surface sont loin de présenter des caractéristiques homogènes. On peut en fait définir deux catégories bien typées, entre lesquelles tous les intermédiaires et tous les mélanges existent.

Le premier type de réseau est le réseau urbain de centre ville, dont il faut d'ailleurs exclure certains hypercentres historiques dont les rues très étroites et le faible niveau de trafic posent des problèmes particuliers. La caractéristique principale de ce type de réseau est de comporter une majorité de carrefours à feux, et de présenter des congestions récurrentes importantes mais assez bien localisées (carrefours critiques). Les conditions de trafic sur ce type de réseau sont en général bien lisibles, d'autant qu'ils bénéficient souvent d'une grande densité de points de mesure liés à la régulation du trafic (gestion centralisée des feux)

Dans les zones moins denses ou périurbaines, le tableau est assez différent : nombreux carrefours sans feux ou giratoires, congestions plus diffuses, stationnement moins contrôlé. Ces zones présentent des difficultés importantes pour l'estimation des temps de parcours, d'autant que la densité de points de mesure y est en général faible. La notion même de temps de parcours moyen y est sujette à caution lorsqu'on examine l'allure des distributions de temps de parcours sur des portions d'itinéraires, où l'écart type est souvent supérieur à la moyenne.

### 2.2 Les voies rapides urbaines (VRU)

Les VRU sont des réseaux parfois très maillés (en Ile de France, mais aussi en région lyonnaise et progressivement ailleurs), avec des distances entre échangeurs courtes (de l'ordre du kilomètre voire inférieure). Ces réseaux présentent des niveaux de trafic et de congestion récurrente très élevés, assez réguliers dans le temps. Ils constituent le lieu privilégié des techniques d'estimation en ligne des temps de parcours. Le trafic y est en effet moins perturbé que sur les réseaux de surface, du fait de l'absence de carrefours et de stationnement, et la densité de points de mesure y est souvent importante (2 points de mesure par kilomètre typiquement).

### 2.3 Les autoroutes de liaison

Les autoroutes de liaison présentent de longs segments homogènes, la distance entre échangeurs pouvant typiquement atteindre une trentaine de kilomètres. L'essentiel des

congestions est par ailleurs de nature non récurrente : elles sont liées soit à des incidents soit à des pointes de trafic ponctuelles (grands départs) ; elles sont éventuellement reproductibles d'une année sur l'autre mais il reste difficile d'accumuler des données statistiques. La densité de points de mesure sur ce type d'axe est par ailleurs en général limitée, souvent à un point de mesure sur chaque section séparant deux échangeurs. En revanche, l'existence du péage constitue une source de données supplémentaire, soit par son exploitation directe (cartes de péage) soit par une utilisation indirecte, notamment des badges de télépéage.

## 2.4 Rase campagne hors autoroute

Il existe peu d'applications de mesure ou d'estimation des temps de parcours en rase campagne hors autoroutes. Un certain nombre de sites présentant un intérêt particulier font cependant l'objet d'applications spécifiques, notamment les vallées alpines desservant les stations de sport d'hiver (Tarentaise par exemple), mais il s'agit d'opérations très particulières généralement non transposables.

# 3. Les acteurs et les applications

Comme les milieux, les acteurs de la circulation routière sont multiples et leurs utilisations des temps de parcours variées.

## 3.1 Les maîtres d'ouvrage

En milieu urbain, les maîtres d'ouvrage des réseaux de voirie et de leur exploitation sont essentiellement :

- l'Etat, représenté en l'occurrence par les Directions Départementales de l'Équipement (ainsi en Île-de-France que par la Direction Régionale pour ce qui est des voies rapides non concédées) est en charge du réseau national.
- Les Départements en charge des réseaux de routes départementales
- Les Communes ou groupements de communes

Il faut y ajouter les quelques concessionnaires de voies rapides présents dans le milieu urbain (SAPN et bientôt COFIROUTE en ce qui concerne l'Île-de-France).

En milieu interurbain les maîtres d'ouvrage sont principalement l'Etat et les sociétés concessionnaires d'autoroutes, parfois les départements.

Les actions des maîtres d'ouvrage mettant en jeu la mesure ou l'estimation des temps de parcours correspondent à deux objectifs principaux : réguler le trafic, évaluer leurs actions et leurs investissements.

### a) Réguler le trafic

La régulation du trafic, c'est-à-dire une meilleure maîtrise des flux, est l'objectif de base des gestionnaires de la voirie. Cet objectif se décompose en plusieurs objectifs intermédiaires.

- Utiliser l'information aux usagers pour mieux répartir les flux,

- Organiser le réseau, par exemple dans le cadre de la mise en œuvre d'un plan de déplacements urbains.
- Mieux connaître en temps réel les conditions de circulation.
- Gérer les situations de crise.
- Répondre à la demande d'information des usagers.
- Favoriser une circulation « apaisée ».

## **b) Evaluer les actions et les investissements des maîtres d'ouvrage**

L'évaluation de leur action est une préoccupation constante des maîtres d'ouvrages. Cette évaluation concerne deux points :

- L'évaluation de la rentabilité des investissements qu'ils sont amenés à faire pour améliorer le fonctionnement de leur réseau, par la mesure du gain collectif obtenu.
- L'évaluation de l'efficacité des actions menées, notamment par les exploitants, afin d'améliorer cette efficacité.

C'est l'utilisation qui est faite actuellement des enquêtes de temps de parcours hors-ligne réalisées par les gestionnaires de la voirie. L'utilisation d'une mesure automatisée des temps de parcours devrait permettre éventuellement de remplacer tout ou partie de ces enquêtes à un moindre coût, mais surtout d'en améliorer les résultats par une meilleure couverture géographique et temporelle.

## **3.2 Les prestataires de services d'information**

Les prestataires de service d'information routière sont évidemment au premier chef utilisateurs de données sur les temps de parcours. Sauf à avoir leurs propres sources d'information (les flottes de véhicules pour le système SKIPPER par exemple), ils sont tributaires des gestionnaires de la voirie pour disposer de ces informations. Par ailleurs leurs exigences sont de natures diverses selon le service qu'ils veulent fournir : Information événementielle sur les incidents ou les bouchons, ou cartographie complète des temps de parcours pour un service de guidage dynamique. Dans la mesure par ailleurs où leurs relations avec les usagers sont contractualisées (achat d'un système, abonnement...), ils doivent garantir la qualité du service qu'ils fournissent. Ils sont ainsi amenés à demander aux gestionnaires de voirie des garanties sur la qualité des données que ceux-ci leur fournissent, éventuellement à titre onéreux. Ceci pose tout le problème de la qualification des données.

## **3.3 Les exploitants de transport public**

Les exploitants de transports publics de surface sont intéressés par la connaissance de l'état du trafic à trois titres :

- Pour leurs besoins propres (organisation de tableaux de marche, régulation de ligne...) il est intéressant de connaître de façon précise les conditions d'écoulement du trafic qui environne les véhicules de TC.

- Pour l'information des voyageurs, la connaissance des temps de parcours du trafic est une aide à la prévision des temps de parcours TC.

Les systèmes d'information multimodale, qui ont vocation à accueillir les temps de parcours routiers, intéressent l'ensemble des exploitants.

### 3.4 Les forces de Police

Les forces de police sont amenées à intervenir sur la gestion du trafic, en particulier en situation de crise. A ce titre elles peuvent être intéressées par un instrument permettant un diagnostic rapide et synthétique des conditions de trafic.

### 3.5 Les usagers

Les usagers sont en tout état de cause les destinataires finals de l'information ou de la gestion du trafic. Au-delà de l'évidence, qui est leur souhait de se déplacer rapidement dans les meilleures conditions de sécurité et de confort, les études et enquêtes menées sur leurs attentes en matière d'information montrent :

- La forte demande d'une information routière de qualité, qui apparaît dans toutes les enquêtes, mais qui doit être relativisée lorsqu'on observe les difficultés de diffusion des systèmes commercialisés.
- L'incidence non négligeable de celle-ci sur les choix d'itinéraires lorsqu'elle est présente (ex : affichage des temps de parcours sur le Boulevard Périphérique Parisien, panneaux à message variables CORALY sur les voies rapides lyonnaises...).
- L'existence d'un marché réel mais limité pour une information routière payante (SKIPPER, VISIONAUTE...).

L'exemple de l'affichage des temps de parcours sur le Boulevard Périphérique montre bien l'utilisation qui en est faite par les usagers. La légère augmentation des trafics sur le boulevard périphérique qui en a résulté montre que, plutôt qu'un facteur de dissuasion incitant les usagers à abandonner le périphérique en situation de congestion, l'information « temps de parcours » est davantage utilisée comme un facteur rassurant pour l'utilisateur pris dans un bouchon qui constate que celui-ci n'est que local. En ce sens, l'information sur les temps de parcours joue trois rôles :

- Un rôle de diminution du stress, qui peut favoriser une circulation apaisée (c'est tout le sens également de l'information sur les temps d'attente ou les temps de trajets en transport public, qui n'a pas nécessairement d'effet sur une décision ou un choix, mais qui peut, en limitant l'incertitude de l'utilisateur, diminuer son stress).
- Un rôle de meilleure répartition des flux permettant une utilisation optimale des voies principales.
- En conséquence, un renforcement de la hiérarchisation du réseau, le délestage des voies principales sur les voies secondaires étant limité aux situations qui le nécessitent véritablement.

En ce sens, les intérêts et les objectifs des usagers (choisir le meilleur itinéraire pour rejoindre leur destination le plus rapidement possible) peuvent être convergents avec ceux des gestionnaires de la voirie (maîtriser et réguler les flux).

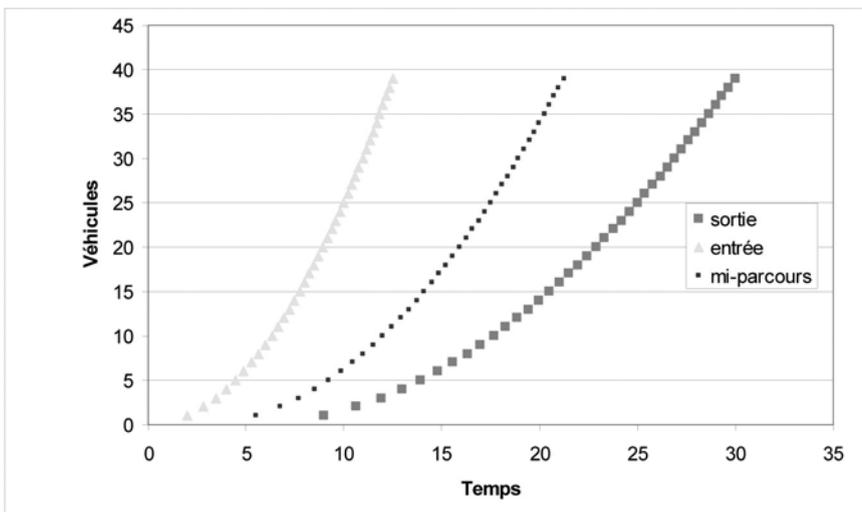
On peut noter au passage, et c'est un point important du débat sur le statut de l'information routière, que le statut de l'utilisateur vis à vis de l'information est double : utilisateur d'une ressource publique et des services qui lui sont associés (l'information fournie par le gestionnaire de la voirie), il peut être aussi le client de l'opérateur qui lui fournit un service supplémentaire (information ou guidage embarqué).

## 4. La référence

Dans la mise en œuvre ou l'évaluation d'une technique de mesure ou d'estimation des temps de parcours, une question est souvent négligée malgré son importance : c'est celle de la référence, c'est-à-dire de la réalité qu'on cherche à mesurer ou à estimer. Plus précisément la question est celle de savoir quelle est « la » valeur du temps de parcours que l'on cherche à approcher par la mesure ou l'estimation. Pour bien comprendre la complexité de cette question, il suffit d'examiner le cas théorique d'une portion de route à plusieurs voies.

Le cas idéal est celui dit « FIFO » pour « *first in - first out* », c'est-à-dire le cas où il n'y a pas de dépassements et où les véhicules sortent du tronçon de route dans l'ordre dans lequel ils sont entrés. Lorsqu'on trace la courbe du nombre cumulé de véhicules en entrée et que l'on reporte les temps de parcours individuels en abscisse, on obtient des courbes présentant l'allure suivante :

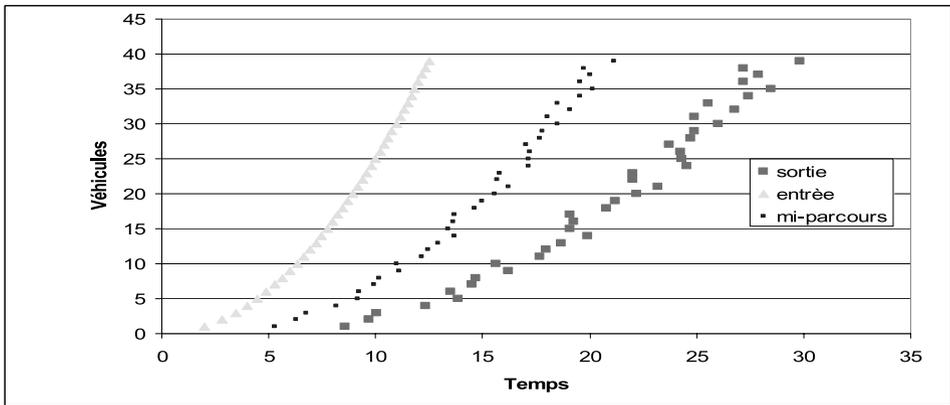
Figure 1 : Courbe du nombre cumulé de véhicules et temps de parcours : cas idéal



Dans ce cas, la notion de temps de parcours à l'instant  $t$  est intuitive, même si elle peut avoir deux définitions : soit le temps de parcours du véhicule entrant à l'instant  $t$  (ou une éventuelle interpolation si aucun véhicule n'entre à cet instant), soit le temps de parcours du véhicule sortant à ce même instant.

Malheureusement ce cas trivial n'est guère observable en pratique. La situation qui s'en rapproche le plus est celle d'une voie rapide en situation congestionnée, ce qui explique au passage les bonnes performances des techniques d'estimation de temps de parcours dans ce type de configuration. Dans le cas plus général où les temps de parcours présentent une dispersion, on peut obtenir l'allure de courbes suivante :

**Figure 2 : Courbe du nombre cumulé de véhicules et temps de parcours : cas général**



La notion de temps de parcours moyen à l'instant  $t$  est alors beaucoup moins évidente, et toute estimation risque de se retrouver à l'intérieur d'une fourchette de deux écart types : si l'aléa est supérieur aux variations dues aux conditions de trafic, il est clair que la notion de moyenne n'a plus de sens. Ceci explique, indépendamment des difficultés techniques qui sont réelles par ailleurs, la difficulté de mesurer des temps de parcours représentatifs en milieu urbain hors centre ville.

## 5. Les Sources

Les sources de données utilisables pour la mesure des temps de parcours sont de deux natures bien différentes : celles qui donnent des informations individuelles sur un échantillon de véhicules, et celles qui donnent des informations sur le flux global.

### 5.1 Les Sources « trajet individuel »

Les sources individuelles sont soit embarquées à bord des véhicules (système de mesure embarqué type MiTemps, système d'information bidirectionnel), soit liées à l'infrastructure (lecture de plaques minéralogique), soit mixtes (lecture de badges hyperfréquence type badges de télépéage). Leurs caractéristiques communes sont de

donner directement des mesures de temps de parcours sur des itinéraires ou des portions d'itinéraires, mais de ne les donner que sur un échantillon de véhicules (même la lecture des plaques minéralogiques ne parvient pas encore à l'exhaustivité). Par ailleurs ces informations sont connues de manière asynchrone, puisque c'est le passage d'un véhicule devant un capteur ou un relais de communication qui déclenche l'arrivée de l'information.

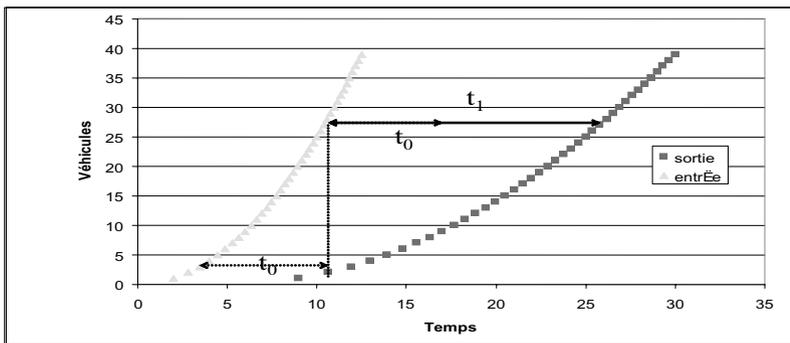
## 5.2 Les Sources « flux »

Les sources liées aux flux, c'est-à-dire les capteurs de mesure du trafic présentent des caractéristiques opposées à celles des sources liées aux véhicules. Elles sont tout d'abord ponctuelles, ou éventuellement locales, et ne donnent en aucun cas d'information sur une zone étendue. Elles sont en deuxième lieu indirectes, c'est-à-dire qu'elle donne des mesures (débits, vitesses, taux d'occupation...) à partir desquelles il est possible d'estimer des temps de parcours, mais en aucun cas les temps de parcours eux-mêmes, ceci étant d'ailleurs dû à leur caractère ponctuel. Elles sont en revanche exhaustives ou quasi exhaustives, c'est-à-dire qu'elles fournissent une information sur l'ensemble du flux. Elles sont enfin synchrones, c'est-à-dire interrogeables à intervalles réguliers. Elles peuvent par ailleurs dans certains cas être utilisées de façon asynchrone, en fournissant par exemple la vitesse ou le temps d'occupation de chaque véhicule.

## 6. Les utilisations

Sans chercher à faire une description des différentes techniques de mesure ou d'estimation des temps de parcours, il est possible d'exposer leurs grands principes. Ils reposent au vrai à peu près tous sur des principes voisins. Dans tous les cas il s'agit d'obtenir des courbes voisines de celles figurant ci-dessous, présentant le cumul des véhicules entrant et les temps de parcours associés. Ceci montre bien que le problème est double. Il s'agit tout d'abord de mesurer ou d'estimer un temps de parcours  $t_0$  « en sortie » à l'instant  $t$ , c'est-à-dire le temps mis par le véhicule qui sort à cet instant. Il s'agit ensuite de projeter ce temps dans l'avenir pour obtenir le temps  $t_1$  qui sera celui des véhicules qui entrent à l'instant  $t$ . C'est donc bien un double problème d'estimation et de prévision.

Figure 3 : Calcul des temps de parcours à partir du cumul des véhicules



## 7. Conclusion

Le rapide tour d'horizon présenté ici montre bien le **caractère multiforme de la question de la mesure et de l'estimation des temps de parcours** : multiplicité des milieux, multiplicité des acteurs et des applications, multiplicité enfin des sources de données possibles et de leurs caractéristiques. Ceci renforce la nécessité, dans le cadre d'une application particulière, de bien définir les conditions d'utilisation de la mesure des temps de parcours et les exigences qui doivent y être attachées. La diversité des sources et le caractère incomplet de chacune d'entre elles montrent également **l'intérêt d'utiliser au maximum toutes les sources disponibles et donc de développer des techniques de prise en compte globale intégrant et utilisant pleinement les complémentarités, les redondances et même les contradictions entre ces sources.**

## Références

- [1] Bonvallet, F. et Robin-Prevallee, Y. Indicateurs globaux de la circulation sur réseau construit à partir des données centralisées d'un système d'exploitation, *Recherche Transports Sécurité*, n° 28, pp. 99-112, 1990.
- [2] Buisson Ch. et Lesort J. B. Travel time : an indicator for traffic management, 2<sup>nd</sup> symposium on Decision making in urban and civil engineering », 2000.
- [3] Branston D. Link travel time functions : a review«. *Transportation Research*, n° 10, pp. 223-236, 1976.
- [4] Cohen S., Haj-Salem H. Evaluation comparative des affichages bouchons et temps de parcours. L'expérience de la ville de Paris, *Recherche Transports Sécurité* n° 51, pp. 29-37, 1987.
- [5] Cottinet M. Recueil de données et véhicules traceurs. *T.E.C.* n° 149, 1998.
- [6] Thijs R., Bovy P. H. L., Lindveld Ch. D. R. The issue of travel time for road networks. *Estimators of travel time for road networks.*, Delft, 2000.



---

# Chapitre 2

## Besoins des exploitants, des opérateurs et pratiques palliatives

### Réseau urbain et périurbain : cas de la ville de Toulouse

**Patrick Lafont**

*Ville de Toulouse – Campus Trafic*

*Parc d'activité de Montblanc*

*2, impasse Alphonse Bermond*

*31500 Toulouse*

*[patrick.laffont@mairie-toulouse.fr](mailto:patrick.laffont@mairie-toulouse.fr)*

---

#### **Résumé**

*La gestion de la circulation dans une agglomération comme celle de Toulouse a conduit les différents exploitants à développer les moyens d'analyse du trafic et de sa restitution sous multiples formes, en fonction des destinataires des données : élus, techniciens, partenaires, usagers professionnels ou particuliers.*

*Les recueils de type « enquête ménage » ne font pas l'objet de cette publication car elles sont plutôt réalisées dans le cadre des études préalables à la planification urbaine.*

---

## 1. Objectifs

Le recueil de données dans les agglomérations vise à répondre à plusieurs utilisations :

- **La connaissance des conditions de déplacement :** Les gestionnaires de voirie cherchent à affiner leurs connaissances de la répartition des conditions de

déplacements. Les analyses possibles sont nombreuses mais on peut distinguer principalement :

1. L'accidentologie. Les constats effectués par la Police Nationale fournissent des informations sur les contextes des accidents de circulation. L'exploitation de ces données permet de mieux cibler les actions de modifications d'infrastructures ou de réglages des feux tricolores.
  2. Les grands flux de déplacements. Ces données permettent de réaliser des analyses et des évaluations sur la fréquentation des différentes voiries. Elles permettent aussi de détecter les réserves de capacité.
  3. L'analyse des principaux phénomènes de congestion de trafic.
  4. Les fréquentations des parcs de stationnement dont les taux d'occupation sont à mettre en relation avec les fréquentations des quartiers
  5. Toutes ces données doivent être disponibles en continu pour permettre un diagnostic correct du fonctionnement de l'agglomération, pour évaluer l'impact de mesures d'exploitation particulière ou l'incidence d'événements prévisibles ou exceptionnels.
- **La planification de la régulation du trafic :** Le système de régulation de trafic des feux tricolores nécessite la connaissance préalable des évolutions des valeurs des points de mesure en fonction des heures de la journée et du type de jour. Les stratégies de régulation à mettre en œuvre dépendent directement de ces mesures.
- **La mise en œuvre des algorithmes de régulation et l'exploitation des réseaux :** Les stratégies de régulation sont donc envisagées à priori. Il est nécessaire ensuite de réaliser au plus juste les commutations de ces réglages préétablis en fonction des mesures temps réel. C'est aussi dans ce domaine que se mettent en œuvre les stratégies visant à diminuer la congestion.

Toutes les décisions automatiques sont soumises aux contrôles des opérateurs qui peuvent les modifier, à partir d'information disponibles sur les réseaux de vidéosurveillance ou par les informations des patrouilleurs.

Dans le domaine de l'exploitation routière les opérateurs ont aussi besoin de données précises statiques, de type autorisation d'occupation du domaine public, arrêté de circulation, connaissance des manifestations culturelles, sportives ou à titre revendicatif.

- **L'information des usagers :** Cette fonctionnalité s'est imposée récemment. Détenteurs d'un grand nombre d'éléments, les centres de gestion du trafic apparaissent comme des fournisseurs potentiels d'informations à destination des usagers professionnels et des utilisateurs dans le but d'optimiser le fonctionnement des différents réseaux de déplacements. Cette fonctionnalité qui apparaissait

comme une utilisation marginale des PC s'affirme être une mission à part entière, à laquelle il faut affecter toutes les ressources nécessaires pour que les informations diffusées soient les plus crédibles possibles, en particulier il apparaît nécessaire de réaliser des points de mesures exclusivement affectés à la fonction information usagers.

## **2. Les moyens mis en œuvre pour le recueil**

### **2.1 Les capteurs utilisés**

#### **a) Les boucles électromagnétiques**

C'est le moyen classique qui permet de réaliser le recueil des débits et taux d'occupation sur les différentes sections de voirie. La multiplicité de l'utilisation des données fournies par ces capteurs impose une grande attention au positionnement et à la constitution des points de mesure.

#### **b) Les caméras de vidéosurveillance**

L'utilisation de la vidéo dans les PC s'est imposée naturellement car elle permet de palier le fait qu'il est difficile d'organiser des patrouilles dans toutes les voies principales d'une agglomération. La visualisation en temps réel permet de réaliser des détections d'incidents très rapidement et d'apporter des éléments objectifs sur certains dysfonctionnements des réseaux de voirie. Ils permettent aussi de gérer les incidents.

La vidéo fait aussi son entrée dans le recueil automatique d'incident. Son utilité dans les tunnels et sur les réseaux de voiries rapides urbaines n'est plus à prouver. L'utilisation de ces capteurs en milieu urbain fait l'objet d'expérience dans le domaine de la gestion des feux tricolores ou de la détection d'incidents en milieu urbain.

#### **c) Mesure de temps de parcours**

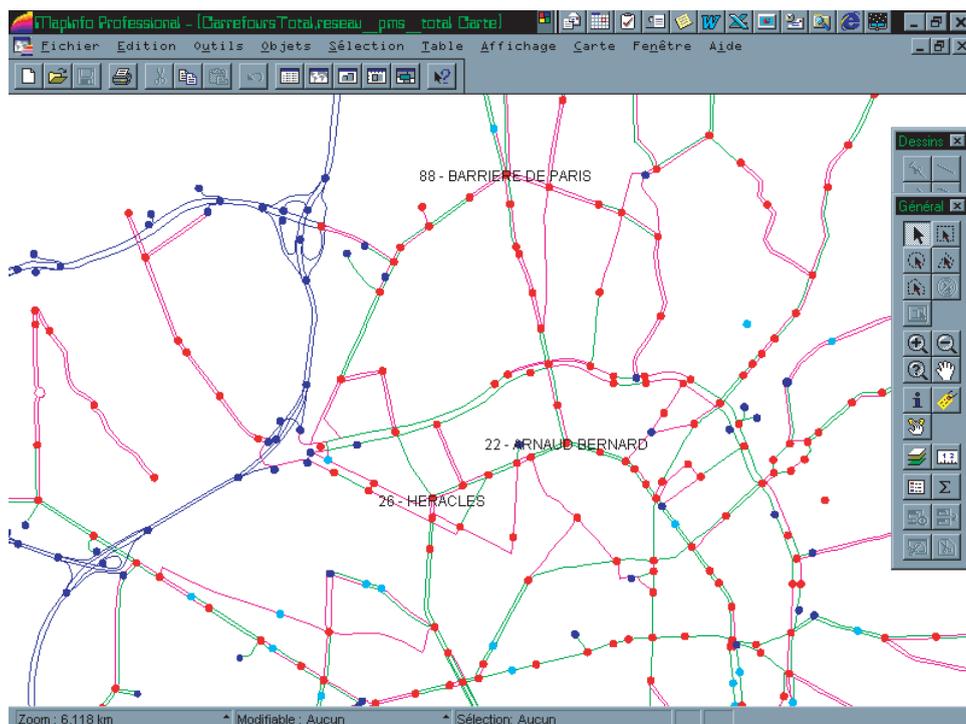
La mesure des temps de parcours par véhicule flottant permet aussi d'obtenir des éléments objectifs sur les conditions de fonctionnement des réseaux de déplacements routiers ou TC.

### **2.2 La mise en forme des données**

#### **a) Le référentiel**

La collaboration nécessaire entre les différents exploitants de réseau de déplacements a fait apparaître rapidement l'utilité de disposer d'une terminologie et de localisants communs. La mise au point d'un référentiel commun a été réalisée tout en essayant de tenir compte des utilisations possibles de cette présentation des données. Les deux premières utilisations sont la gestion des feux situés à l'intersection des réseaux et l'information des usagers.

Figure 3 : Référentiel commun



La mise en forme de ces données et l'élaboration d'un référentiel commun est une étape clé préparant celle de l'utilisation conjointe des ces données (fusion de données).

## b) Les résultats

Parmi les utilisations possibles de ces données, citons :

- Cartographie des accidents.
- Détection d'incidents.
- Visualisation des congestions.

Sur les aspects accidentologies, les données proviennent des relevés de gendarmerie et les patrouilles qui constituent une source d'information précieuse, essentiellement sur la qualité de l'incident.

Figure 4 : Cartographie des accidents : Tous les accidents corporels sur cinq ans

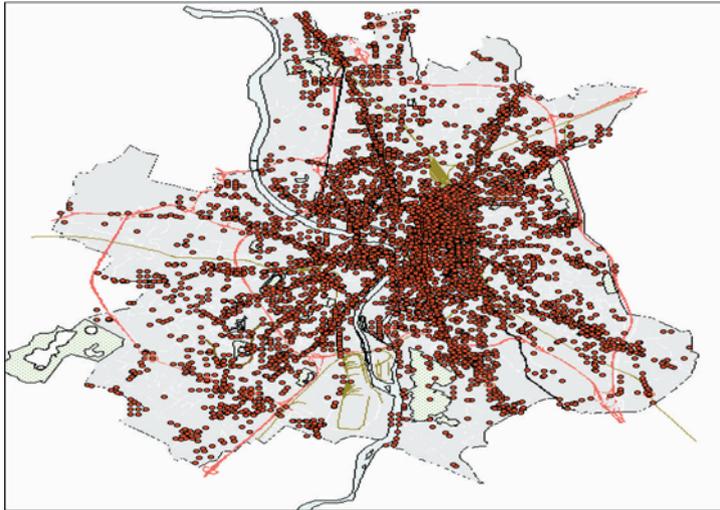


Figure 5 : Cartographie des accidents : Détails sur quelques carrefours

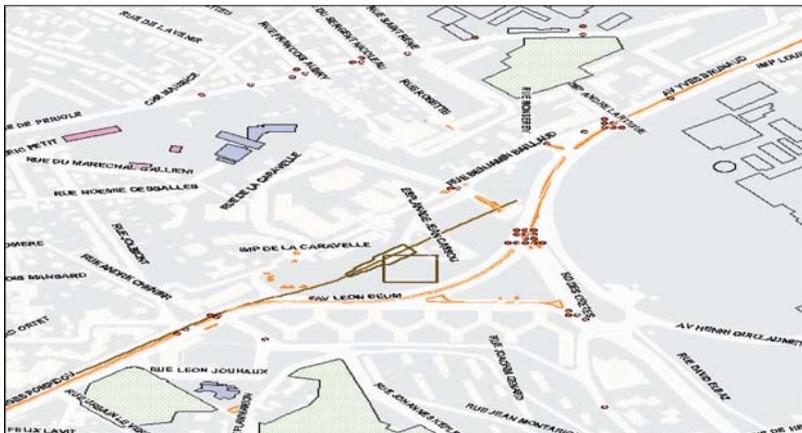


Figure 6 : Détection d'incidents : masque de détection

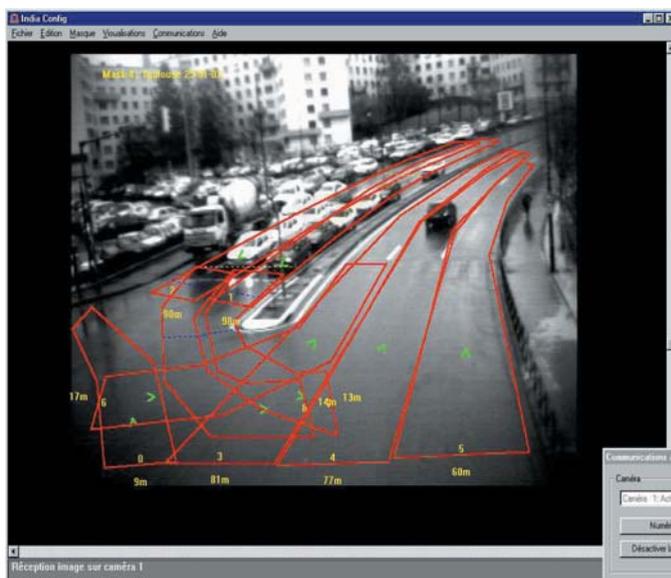
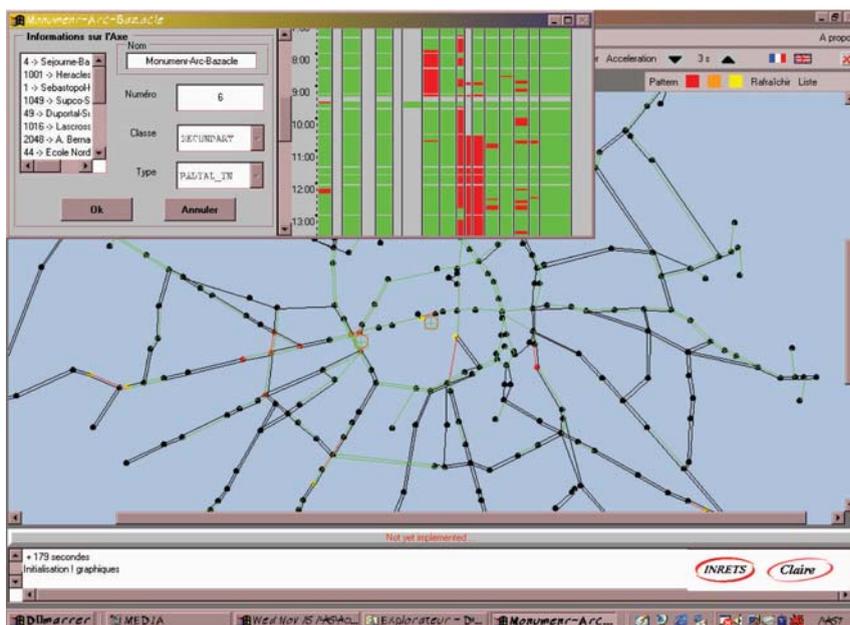


Figure 7 : Détection d'incidents : détection



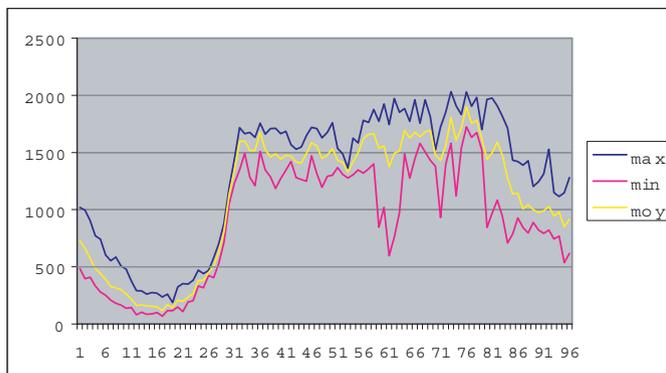
La possibilité d'obtenir des synoptiques complets permet de détecter les congestions et de mettre en place les moyens de résorption de celles-ci. Ils permettent aussi d'obtenir une bonne image de la diffusion dans le temps et dans l'espace des bouchons.

Figure 8 : Visualisation des congestions



Quant aux données issues de points de mesures, dans un souci de suivi, des enveloppes (min-max) sont associées aux caractéristiques mesurées (cf. figure 7) et l'utilisation de ces données permet de répondre aux diverses préoccupations de gestion et d'exploitation.

Figure 9 : Enveloppes de débits



A titre d'exemple, nous présentons ci-dessous une illustration dans le cadre de l'observatoire du centre ville.

### Une tendance à la progression de la part du trafic le matin, une diminution l'après-midi

**Analyse horaire :** les graphiques ci-contre n'illustreront pas des flux en valeur brute, mais la part du trafic de chacune des heures de la journée par rapport au trafic total journalier.

#### En semaine, une croissance de la part du trafic du matin

En 1999, la part du trafic du matin croît, surtout avant 6 h. Parallèlement, la part du trafic d'après-midi et surtout de soirée baisse. Ceci est un fait nouveau puisque, d'une année sur l'autre, le trafic avait tendance à baisser dès 6 h. et jusqu'à 16 h. seulement.

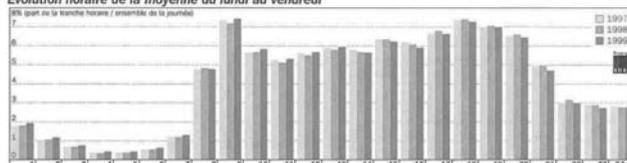
Le matin comme le soir, la part des heures de pointe reste stable. Elles sont moins étalées le matin que le soir.

#### Augmentation de la part du trafic de retour de week-end le dimanche soir

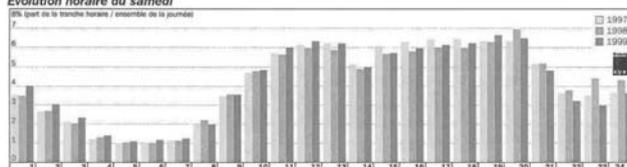
Comme les années précédentes, la part du trafic de nuit du vendredi diminue au samedi 7 heures augmente en 1999. Cette augmentation nocturne est plus forte qu'en semaine.

En 1999, les évolutions horaires du trafic des autres périodes du week-end diffèrent d'habitude : plus de trafic le samedi en journée, moins la nuit du samedi au dimanche, plus le dimanche à partir de midi (influence du mois d'enquête - juin ?).

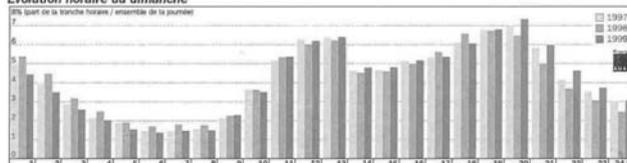
Evolution horaire de la moyenne du lundi au vendredi



Evolution horaire du samedi



Evolution horaire du dimanche



Source : Ville de Toulouse, Service circulation-transport.

## 3. Conclusion

Face au principal besoin des exploitants qui est la connaissance des conditions de déplacements et qui peut se décliner en plusieurs actions, les données nécessaires pour répondre à ce besoin sont issues de plusieurs canaux : capteurs classiques, vidéosurveillances, patrouilles... La multiplicité des données nécessite **d'opérer une liaison, voire une fusion, entre les données dont le recueil est automatique et celles de nature événementielle.**

La hiérarchisation de ces données collectées et le fonctionnement en mode dégradé des outils de régulation constituent un autre besoin auquel est confronté l'exploitant et pour lequel les outils de qualification, d'agrégation et de fusion de données pourraient fournir une solution.

## Référence

David Y., Breheret L., Henry J.-J. et Care-Colins S. DATA-PLUS : études prospectives dans le domaine du recueil de données de trafic. Rapport PREDIT, Collections CERTU, décembre 1999.

---

# Réseau interurbain : Estimation des temps de parcours sur le réseau ASF

**Nicolas Schwab, Laurent Nazzani**

*Autoroutes du Sud de la France (ASF)*

*Département Exploitation de la route*

*Quartier Ste Anne, A7, échangeur d'Avignon Nord, Vedène*

*84967 Le Pontet Cedex*

*[nicolas.schwab@asf.fr](mailto:nicolas.schwab@asf.fr) [laurent.nazzani@asf.fr](mailto:laurent.nazzani@asf.fr)*

---

## **Résumé**

*Autour du système d'estimation des temps de parcours mis en service sur les axes les plus chargés du réseau ASF, cet exposé abordera d'une part la description théorique et algorithmique de ce système ainsi que ses utilisations opérationnelles et d'autre part les évolutions envisagées à court et à moyen terme.*

*Ces évolutions sont de deux sortes : une densification des moyens de mesures et l'optimisation de l'utilisation des données de comptage par couplage de l'algorithme actuel avec une méthode mixte utilisant les débits (méthode de stock) et la notion de stations virtuelles.*

*Un dernier volet, plus prospectif, sera consacré aux apports éventuels de sources alternatives comme par exemple celle de véhicules traceurs.*

---



## Journée INRETS « Fusion de données »

# Estimation des temps de parcours sur le réseau ASF

## Méthode de calcul actuelle et pistes d'amélioration



### Plan de la présentation

- Les temps de parcours sur le réseau ASF :
  - Méthode de calcul
  - Déploiement opérationnel
  - Stratégie de diffusion de l'information
- Les évolutions engagées (R&D court terme)
  - Contraintes de l'outil actuel et pistes d'évolution
    - ↳ Densification du réseau de recueil
    - ↳ Optimisation de l'utilisation des données de comptage disponibles
- Les perspectives d'évolution à plus long terme
  - Intégration de sources de données complémentaires (véhicules traceurs : GPS/GSM/DSRC)
  - Aggrégation (spatiale) de données TP issues de différents systèmes de calcul



### L'information temps de parcours sur le réseau ASF

ASF diffuse l'information Temps de parcours sur les axes les plus chargés de son réseau depuis l'été 1998.

#### Historique du déploiement

- couverture 2000 (approx 650 km)
- couverture 2002 (approx 1050 km)
- perspectives de couverture 2005



### La méthode explorée et mise en œuvre par ASF

ASF a engagé des recherches sur la méthode « vitesses », avec les objectifs suivants :

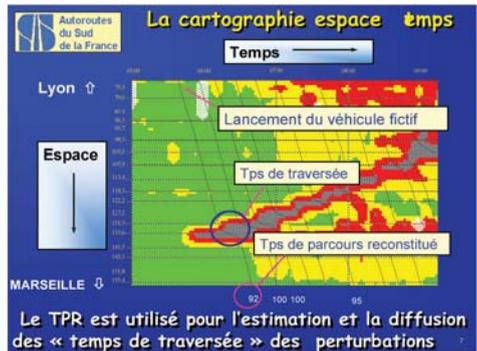
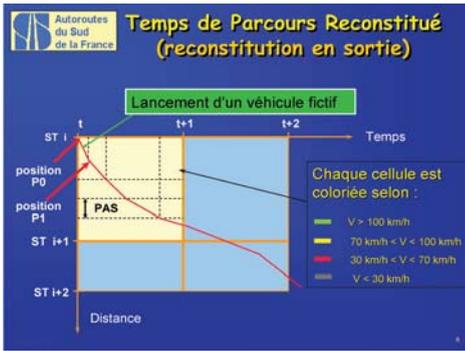
- ↳ établir une méthode fiable de reconstitution du temps de parcours (TPR) d'un véhicule sortant du réseau à un instant "t"
- ↳ fournir à l'usager une estimation du temps de parcours (TPE) lorsqu'il rentre sur l'autoroute à un instant "t"
- ↳ créer un outil d'aide à l'exploitation, permettant à la fois de visualiser les niveaux de saturation de l'autoroute, et d'en suivre l'évolution en temps réel



### Les méthodes de calcul étudiées

2 méthodes ont été étudiées par les sociétés françaises d'autoroute :

- ↳ Analyse des heures d'entrée et de sortie relevées sur les tickets de transit
- ↳ Exploitation des données recueillies par les stations de comptage
  - ↳ Méthode « vitesses »
  - ↳ Méthode de calcul de stock (analyse des débits entrants et sortants sur un axe)

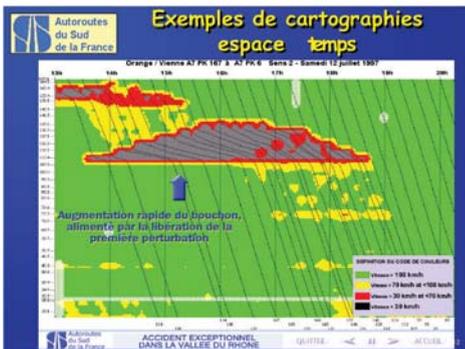
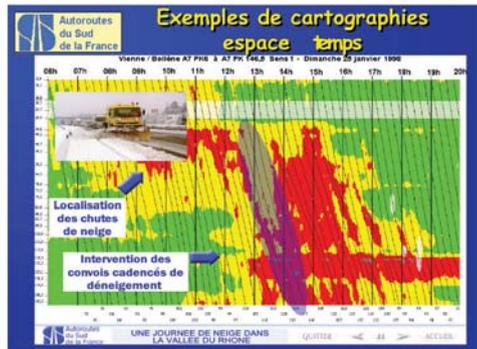
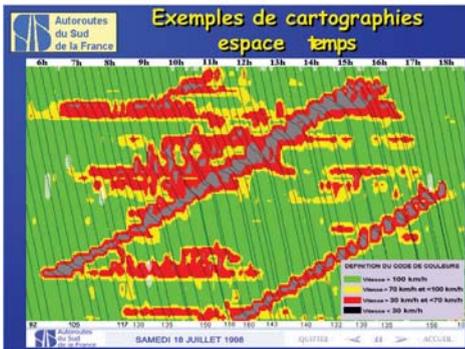
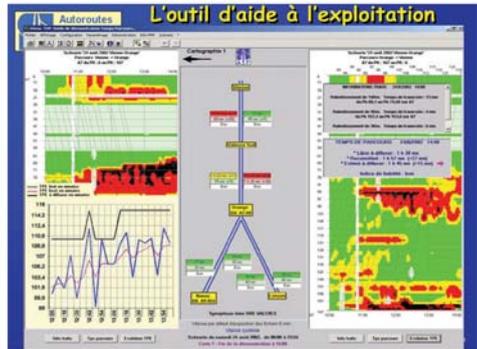


### Temps de Parcours Estimé (estimation en entrée)

- ✓ Estimation basée sur un modèle de régression linéaire multiple

$$TPE(t) = a \cdot TPI(t) + b \cdot Qmoy(t) + c \cdot Vmoy(t) + d \cdot TMoy(t) + e$$

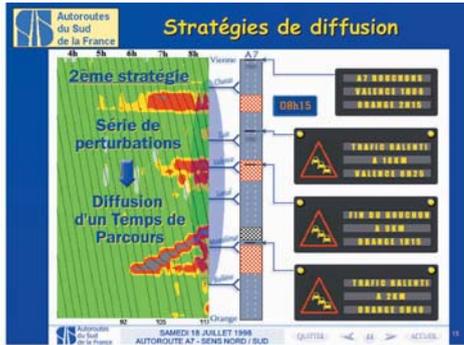
- ✓ Diffusé sur PMV, radio 107,7 FM et Internet pour les TP sur grands itinéraires interurbains
- ✓ Modèles calibrés par type de jour, par parcours et par sens



### Stratégies de diffusion

Les temps de parcours ne sont diffusés que si l'écoulement du trafic est perturbé.

- Si la perturbation est localisée, nous diffusons un "temps de traversée" de la perturbation.
- Si la perturbation est généralisée, nous diffusons un "temps de parcours" global, de ville à ville.



### Autoroutes du Sud de la France - Les media traditionnels de diffusion

**Panneaux à Messages Variables (PMV)**

**Radios dédiée d'information routière (107,7 FM)**

### Autoroutes du Sud de la France - Les media innovants de diffusion

**Internet : [www.asf.fr](http://www.asf.fr)**

**Internet Mobile : WAP et SMS**

### Autoroutes du Sud de la France - Les évolutions à court terme

**Objectif : favoriser le déploiement de l'outil en réduisant ses contraintes d'utilisation et en améliorant sa réactivité.**

**Les évolutions envisagées :**

- ↳ Densifier le recueil de données sur certains axes (objectif : 1 station tous les 10 km pour obtenir un niveau de précision fiable).
- ↳ Développer des méthodes de calcul complémentaires pour optimiser l'utilisation des données de comptage existantes.

### Autoroutes du Sud de la France - Densification du recueil de données

Plus de 410 points de comptage sur le réseau ASF, dont :

- 80 sur échangeurs
- 25 sur axes de service
- 310 en section courante

### Autoroutes du Sud de la France - Optimisation des données de comptage

Développement d'un module complémentaire utilisant la méthode de stock et la notion de stations virtuelles :

- ↳ Détection des congestions par analyse du stock de véhicules.

$$Stock\_i(t) = S_{oi} + \sum_{j=1}^n Q_{jv}(t) - Q_{ov}(t)$$

*S<sub>oi</sub> : stock initial  
 Q<sub>am</sub> : débit entrant  
 Q<sub>ov</sub> : débit sortant*

- ↳ Intégration des temps de parcours de stock.

$$TP(t) = \sum_{i=1}^n \frac{S_i(t)}{Q_{ov}(t)}$$

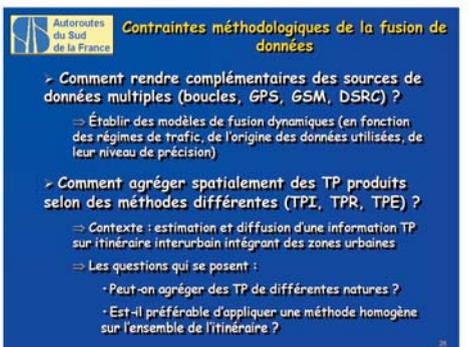
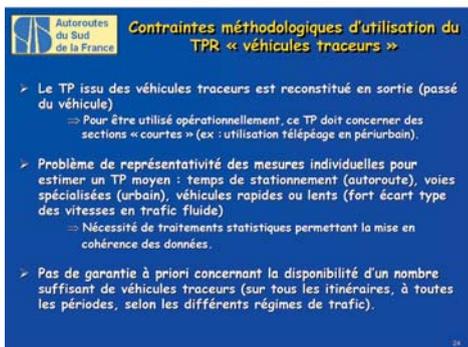
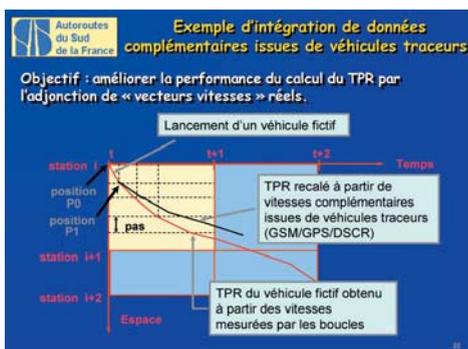
*S : stock  
 Q<sub>ov</sub> : débit sortant*

- ↳ Implantation de stations virtuelles aux extrémités des congestions (vitesses virtuelles déduites des TP Stock ou des saisies MCI).

### Autoroutes du Sud de la France - Les perspectives d'évolution à plus long terme

**Objectif : intégrer dans l'outil temps de parcours ASF des sources de données complémentaires issues de véhicules traceurs.**

- ↳ Les sources identifiées : GPS / GSM / DSRC.
- ↳ Les données envisagées : Vecteurs de vitesses permettant de compléter les mesures de vitesse issues des boucles de comptage existantes.



## Références

Nazzani L. et Schwab N. Travel time estimation and diffusion on interurban motorways : the ASF experience, *European Workshop on Travel Time Estimation, SERTI Project*, Avignon 8-9 November 2001, pp. 21-24.



---

# Réseau national : Cas de la vallée de Tarentaise

**Philippe Mansuy**

*DDE de Savoie (DDE-73)*

*Adret, 1, rue des Cévennes – BP 1106*

*73011 Chambéry Cedex*

*[philippe.mansuy@equipement.gouv.fr](mailto:philippe.mansuy@equipement.gouv.fr)*

---

## **Résumé**

*Avec plus de 300 000 lits touristiques en stations de montagne, la Tarentaise représente un enjeu économique de premier ordre, mais son réseau de voirie d'accès est constitué autour de la seule RN90 au départ d'Albertville. La demande de trafic lors des pointes saisonnières y atteint des valeurs de l'ordre de 30 000 véh. par jour et par sens. De plus, sur l'itinéraire d'accès aux stations, des zones à risques de chutes de rochers ont été recensées interdisant toute saturation au droit de ces zones à risque.*

*Pour faire face à cette préoccupation sécurité et pour gérer au mieux les accès aux stations, depuis l'hiver 1999-2000, un système de régulation par feu a été mis en place.*

*Dans cet exposé, nous décrivons ce dispositif, appelé RECITA en insistant sur les stratégies de gestion utilisées et les outils développés pour la gestion des zones à risques.*

---

## **1. Introduction**

L'appareil touristique de la Tarentaise est exceptionnel, plus de 300 000 lits touristiques sont réalisés en altitude, mais son réseau de voirie d'accès est constitué autour de la seule RN 90 au départ d'Albertville.

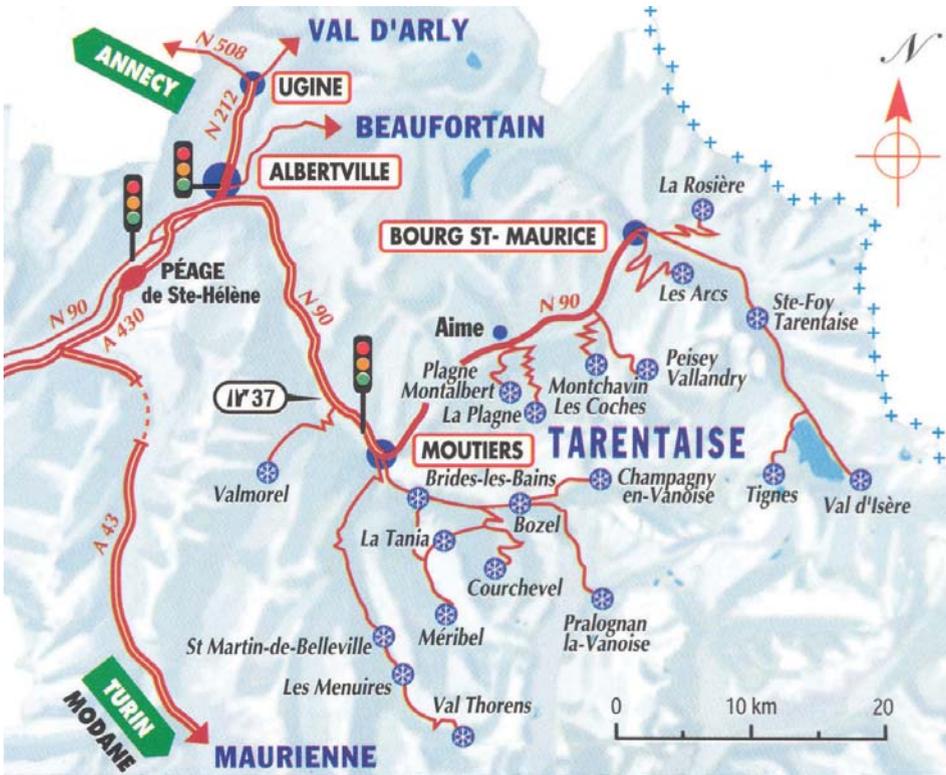
## **2. Les contraintes sur ce réseau**

Ce réseau de voiries est soumis à 3 types de contraintes :

- exposition aux chutes de blocs ;
- sécurité dans les tunnels
- de fortes charges de trafic,

auxquelles, il faut ajouter, comme toutes les voiries de montagne, les contraintes de viabilité hivernale.

Figure 1 : Réseau de voirie d'accès aux stations des Tarentaise



## 2.1 Zones exposées à des chutes de bloc

La route nationale 90 est aménagée le long de l'Isère sous des falaises actives qui laisse tomber des blocs de l'ordre de 2 à 20 m<sup>3</sup>. Bien que d'importants travaux de sécurisation soient entrepris depuis plusieurs années, (merlons, filets ASM, confortement de falaise), certains secteurs sont encore exposés.

Le risque étant connu, la consigne retenue par la préfecture est la suivante : « **Aucune saturation sous les zones à risque de chutes de blocs.** »

## 2.2 Sécurité dans les tunnels

On trouve deux tunnels sur la route nationale 90 : le tunnel de Ponserand et le tunnel du Siaix. Depuis l'évènement du tunnel du Mont Blanc, la sécurité dans les tunnels est encadrée par une nouvelle réglementation.

Elle touche la détection, la surveillance en continu (des conditions d'exploitation et des équipements), la mise en œuvre des Plans d'Intervention et de Sécurité.

## 2.3 Charges exceptionnelles de trafic

Les migrations hivernales d'accès aux stations de Tarentaise occasionnent des pointes de trafic importantes : environ 9 samedis par an sont concernés par un trafic de l'ordre de 60 000 véhicules pour les deux sens sur la 4 voies entre Albertville et Moutiers.

Au-delà des contraintes de sécurité citées plus haut, qui se traduisent par l'obligation d'intervenir immédiatement en cas de saturation sous les falaises actives ou en tunnel, l'objectif pour l'exploitant est de maintenir le trafic au plus prêt de la capacité de la route nationale.

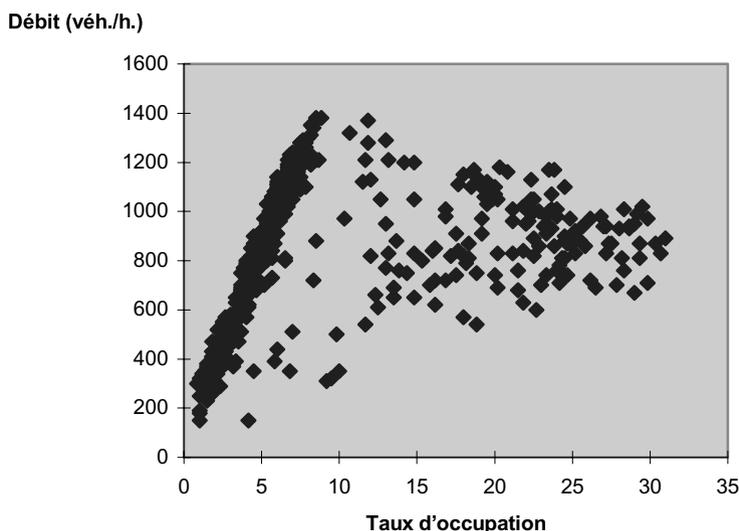
## 3. Stratégies de gestion

### 3.1 Sens montant

Lors des pointes de trafic liées aux déplacements des vacances d'hiver et de printemps, la section Moutiers – Tunnel du Siaix montre un fonctionnement à double capacité (cf. figure 15).

En régime fluide, un débit de 1 200-1 300 véh./h. est possible – et c'est l'objectif pour l'exploitant, tandis qu'en régime de saturation – sous les zones à risques de chutes de bloc – le débit oscille entre 600 et 1 100 avec une moyenne de 900 véh./h.

**Figure 2 : Débit – concentration sur la RN 90  
Section Moutiers vers le tunnel du Siaix**



Pour mettre en œuvre un contrôle des débits, des feux en pleine voie sur la RN 90 ont été implantés. Système RECITA.

La stratégie de gestion suivie par les exploitants est de :

- surveiller les zones sous les falaises actives et en tunnels ;
- réguler le trafic avec les feux pleine voie pour prévenir d'une saturation par une gestion « prudente de la consigne » et d'appliquer une consigne d'anti-saturation dès l'apparition d'un ralentissement.

Cette gestion du réseau est complétée par :

- une information par PMV – signalisation de la queue de bouchon et diffusion du temps de parcours – à l'état expérimental ;
- diffusion de flashes d'informations sur les ondes ;
- distribution d'un dépliant expliquant les fondements de la régulation par feux.

## 3.2 Sens descendant des stations

En période de pointe, soit 9 à 12 samedis par an, la situation est également très difficile. La RN 90 entre Bourg-Saint-Maurice et Moutiers est saturée en plusieurs endroits, le temps de parcours peut excéder plusieurs heures.

Une gestion par feux est en place pour empêcher toute saturation sous le tunnel du Siaix et sous les zones à risques. Des feux sont également en place pour équilibrer les arrivées des différentes stations.

Une information sur les temps de parcours en projet.

## 4. Architecture matérielle

Un CIGT installé à Albertville, le PC Osiris, est opérationnel 24 h sur 24, et toute l'année.

Le PC OSIRIS subit une mutation puisque les opérateurs doivent jouer un rôle de plus en plus fréquent de gestionnaire du trafic.

Initialement doté de quelques caméras distribuées sur le réseau de voiries, d'un réseau radio permettant d'être en contact avec les patrouilleurs et d'un système de collecte des stations de comptages ; au fil des fonctions qui s'ajoutent chaque année, les responsabilités des opérateurs se cumulent.

Il y a lieu d'organiser le poste de contrôle et de commande, non plus pour surveiller le bon fonctionnement des équipements, mais pour apporter à l'opérateur les alarmes, analyses, indicateurs afin qu'il prenne les mesures adéquates qui auront été identifiées pour faire face à la situation présente.

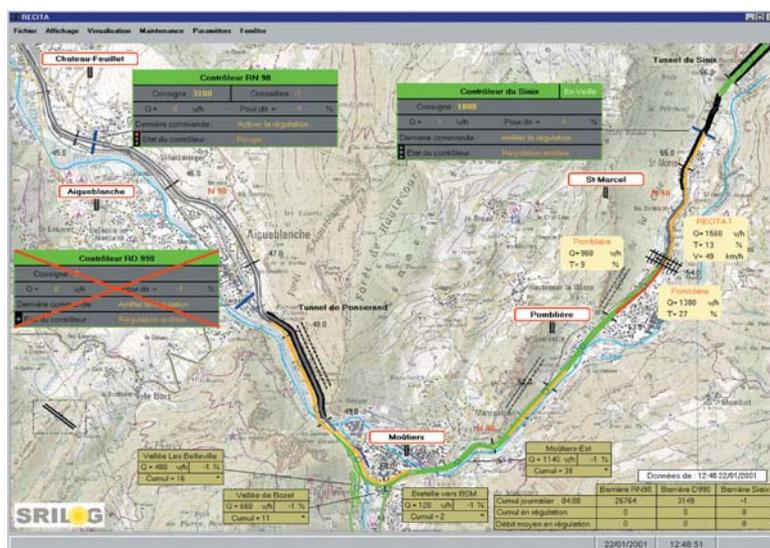
### 4.1 Interface développé pour la gestion des zones à risques

Une interface Homme Machine spécifique a été développée pour la gestion des zones à risques.

La RN 90 depuis Aigueblanche jusqu'au tunnel du Siaix est représentée ; chaque tronçon de voirie est représenté par un code de couleur qui dépend du taux d'occupation du capteur sur la chaussée.

La commande des feux de signalisation est accessible depuis l'écran, l'opérateur entre une consigne de débit, la chaîne de transmission et d'automatismes s'adapte pour que la ligne de feu laisse passer le volume égal à la consigne affichée.

Figure 3 : Un exemple de l'I.H.M. développée pour la gestion des zones à risques



L'opérateur dispose également de caméras qui visualisent la section, il faut noter que cette double information s'avère intéressante, l'IHM permet la supervision de l'ensemble de la section, la caméra apporte la vérification de l'évènement.

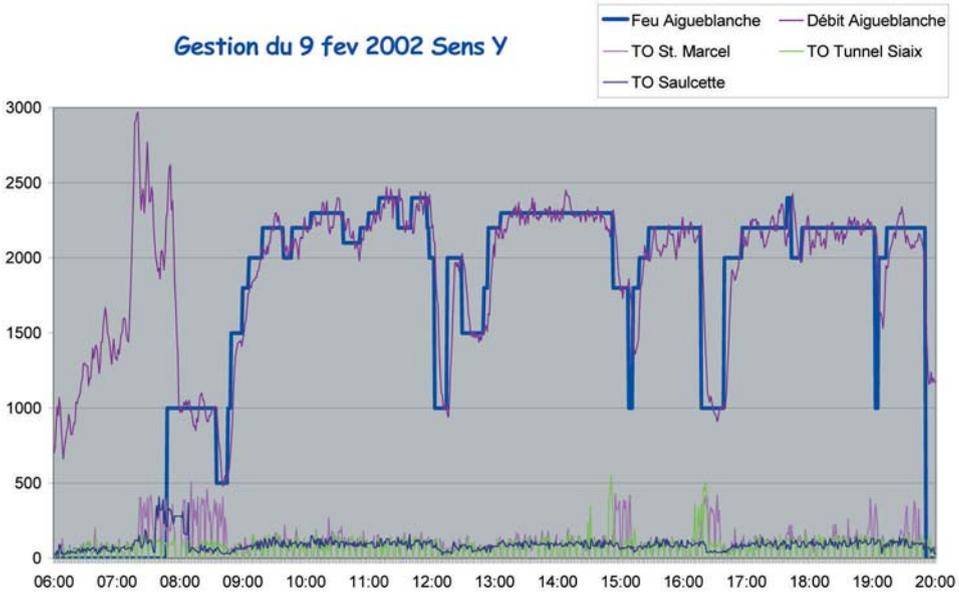
## 4.2 Pratiques de l'exploitant

Le graphique ci-dessous reconstitue la journée du 9 février 2002 dans le sens montant et permet d'apprécier les actions entreprises par l'exploitant.

Comme le montre la figure ci-dessous, la régulation est efficace, le pilotage du débit d'accès est des plus précis.

L'exploitant applique une consigne d'anti-saturation forte dès l'apparition d'une congestion – descende à 1 000 véh./h. de la consigne – de manière à purger le plus rapidement possible le ralentissement et revenir au plus vite à un niveau normal de débit.

Figure 4 : Régulation d 9 février 2002



### 4.3 Les orientations

La gestion du sens descendant suivant les mêmes dispositions est opérationnelle depuis l'hiver dernier. Aujourd'hui les applications s'orientent vers l'information des usagers en attente. Pour ce faire une vision plus large est nécessaire, vision qu'il est difficile et coûteux d'établir, car elle nécessite le déploiement d'un réseau de stations de trafic et de caméras sur un territoire plus large.

Par ailleurs, les contraintes de gestion imposées par les tunnels vont imposer des développements sur :

- La détection, avec notamment l'utilisation de la DAI vidéo
- Le traitement des évènements avec mise en œuvre d'un système d'aide à la gestion des évènements et main courante informatisée.

### Références

[1] CDES. Bilans annuels des accès aux stations de Tarentaise.  
[2] INRETS-LICIT. Analyse du système de régulation RECITA – Rapport de convention, juillet 99, septembre 99 et avril 2000.  
[3] ZELT. Evaluation du système RECITA, avril 2000.

---

# Besoin des exploitants et des opérateurs, et pratiques palliatives : Synthèse et compléments\*

**Benoît Ferry**

*DREIF/DIT*

*21-23 rue Miollis*

*75732 PARIS Cedex 15*

---

## **Résumé :**

*A la lumière des exposés des exploitants et des discussions qu'ils ont suscité, ainsi que d'éléments provenant d'une enquête réalisée en 2001 auprès de 16 centres de gestion de trafic, nous avons réalisé une synthèse des besoins des exploitants et des opérateurs en matière de recueil de données, et nous esquisserons quelques évolutions possibles ou probables.*

---

## **1. Les utilisateurs de données de trafic**

- Les exploitants :
  - en urbain,
  - en péri-urbain,
  - sur autoroute,
  - sur RN ou RD.
- Les opérateurs de services.

## **2. Enquête auprès de 16 CIGT en 2001**

- Description du système.
- Modalités de mise en place et problèmes rencontrés.
- Suggestions et questions : animation et pilotage, méthodes et outils, stratégie.

---

\* *Extrait de la présentation orale.*

- Références bibliographiques.
- Prospective nouvelles technologies.

### 3. Résultats globaux sur les besoins

- Capitalisation / échange / diffusion des connaissances et des expériences.
- Développement de nouvelles connaissances et de nouveaux outils.
- Systèmes / outils informatiques.

### 4. Les autres besoins

1. Test de notoriété : 19 documents dont 5 concernaient les données de trafic (cf. [1]).
  2. Notoriété : 75 à 100 % : 0/4.
    - a) 50 à 75 % : 2/7.
    - b) 25 à 50 % : 3/7.
    - c) 0 à 25 % : 0/1.

(total : 5/19).
- Prospective, projets de mise en œuvre les plus cités :
    - Détection Automatique d'Incident (DAI).
    - Détection Automatique de Bouchon (DAB).
    - Régulation d'accès.
    - Internet grand public.
    - RDS – TMC.

### 5. Eléments de synthèse

#### 5.1 Constat

- Surveillance de zones de + en + étendues.
- Recours à des moyens de surveillance et d'action de + en + diversifiés et performants.
- Multi-partenariats.
- Importance de plus en plus grande du temps réel :
  - pour la commande des systèmes,
  - pour l'échange avec les partenaires,
  - pour l'information routière.

## 5.2 Besoins

- Disposer de capteurs de plus en plus diversifiés et performants – dimension « temps réel » ;
- Disposer d’outils de traitement des données efficaces et faciles à mettre en œuvre.
- Disposer d’outils d’échange de données ou d’informations.
- Avoir facilement accès à la connaissance dans le domaine.

## Références

Aulard-Macler J.-L. Expression des besoins des exploitants en matière de systèmes de gestion de trafic routier : Synthèse des résultats d’une enquête menée auprès de 16 CIGT, Rapport SERTA-CERTU, octobre 2001.



---

# Chapitre 3

## Techniques de fusion de données et applications à l'exploitation du trafic

### Méthodes numériques en fusion de données\*

**Isabelle Bloch**

*Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications*

*CNRS URA 820*

*Département Traitement du Signal et des Images*

*46 rue Barrault, 75013 Paris*

*[Isabelle.Bloch@enst.fr](mailto:Isabelle.Bloch@enst.fr)*

---

#### **Résumé**

*Nous présentons dans cet article les principales méthodes de fusion numériques (probabilistes, floues et possibilistes, fonctions de croyance), en insistant sur leurs capacités à représenter les différents types d'imperfections des informations, sur les opérateurs de fusion et sur les modes de décision.*

---

## 1. Introduction

Nous adoptons dans cet article un sens large du terme « information ». En particulier, il couvre à la fois des données (par exemple des mesures, des images, des signaux, etc.) et des connaissances (sur les données, sur le domaine, sur des

---

\* Cet article s'appuie en grande partie sur [12].

La définition de la fusion d'informations que nous utiliserons tout au long de cet article est la suivante: *La fusion d'informations consiste à combiner des informations hétérogènes issues de plusieurs sources afin d'améliorer la prise de décision.*

Cette définition est suffisamment générale pour englober la diversité des problèmes de fusion que l'on peut rencontrer. Son intérêt est qu'elle est focalisée sur les étapes de combinaison et de décision, ces deux opérations pouvant prendre des formes différentes suivant les problèmes et les applications.

La difficulté de la fusion de données vient souvent de l'imperfection de ces données, qui s'expriment en termes d'incertitude, d'imprécision, d'ambiguïté, d'incomplétude, de conflit, etc. [28, 40, 12]. Schématiquement, la fusion de données vise à réduire ces imperfections en s'appuyant à la fois sur la complémentarité et sur la redondance des informations à combiner. La plupart des méthodes de fusion, en particulier les méthodes numériques, modélisent directement les imperfections pour les prendre en compte dans le processus de fusion.

Dans cet article, nous exposons les principales approches numériques, dans les parties 3 pour les approches probabilistes et bayésiennes, 4 pour la théorie des fonctions de croyance, et 5 pour les méthodes floues et possibilistes. Nous précisons d'abord le schéma général de la fusion numérique dans la section 2.

## 2. Schéma de fusion

En général, la fusion n'est pas une tâche simple. Elle peut se décomposer de manière schématique en plusieurs étapes. Nous les décrivons succinctement ici, car elles serviront de guide à la description des outils théoriques dans les parties suivantes. Considérons un problème général de fusion pour lequel on dispose de  $\ell$  sources  $S_1, S_2, \dots, S_\ell$  (par exemple des images), et pour lequel le but est de prendre une décision dans un ensemble de  $n$  décisions possibles  $d_1, d_2, \dots, d_n$ . Les principales étapes à résoudre pour construire le processus de fusion sont les suivantes :

- **Modélisation** : cette étape comporte le choix d'un formalisme, et des expressions des informations à fusionner dans ce formalisme.. Cette modélisation peut être guidée par les informations supplémentaires (sur les informations et sur le contexte ou le domaine). Supposons pour fixer les idées que chaque source  $S_j$  fournisse une information représentée par  $M_j^i$  sur la décision  $d_i$ . La forme de  $M_j^i$  dépend bien sûr du formalisme choisi. Elle peut être par exemple une distribution dans un formalisme numérique, ou une formule dans un formalisme logique.

- **Estimation** : la plupart des modélisations nécessitent une phase d'estimation (par exemple toutes les méthodes utilisant des distributions). Là encore les informations supplémentaires peuvent intervenir.
- **Combinaison** : cette étape concerne le choix d'un opérateur, compatible avec le formalisme de modélisation retenu, et guidé par les informations supplémentaires.
- **Décision** : c'est l'étape ultime de la fusion, qui permet de passer des informations fournies par les sources au choix d'une décision  $d_i$ . Nous ne donnons pas plus de détails sur ces étapes ici, car cela nécessiterait d'entrer dans les formalismes et les aspects techniques. Cela fait l'objet des parties 3, 4 et 5.

La manière dont ces étapes sont agencées définit le système de fusion et son architecture [12]. Nous nous limitons ici au modèle qui consiste à combiner par une opération  $\mathbb{F}$  tous les  $M_i^l$  relatifs à la même décision  $d_i$ , pour obtenir une forme fusionnée  $M_i = \mathbb{F}(M_i^1, M_i^2, \dots, M_i^l)$ . Puis une décision est prise sur le résultat de cette combinaison. Aucune décision intermédiaire n'est donc prise, et l'information est manipulée dans le formalisme choisi jusqu'à la dernière étape, diminuant ainsi les contradictions et les conflits.

## 3. Fusion probabiliste et bayésienne

### 3.1 Mesures d'information

Lorsqu'on dispose d'un ensemble de  $\ell$  sources d'informations  $S_j$ , une première tâche consiste souvent à le transformer en un sous-ensemble plus réduit, donc de traitement plus simple, sans perdre d'information.

Pour exprimer l'apport d'information dû à l'ajout d'une nouvelle source  $S_{k+1}$  à un ensemble déjà connu  $\{S_1, S_2, \dots, S_k\}$  on peut s'appuyer sur les notions d'information et d'entropie [43,48,49]. À partir de la probabilité jointe des  $k$  premières sources  $p(S_1, S_2, \dots, S_k)$ , on définit l'entropie (ou information moyenne) des  $k$  premières sources par :

$$H(S_1, \dots, S_k) = -\sum p(S_1, \dots, S_k) \log p(S_1, \dots, S_k), \quad (1)$$

et l'entropie apportée par la  $(k+1)$ -ème source s'exprime, soit en fonction des entropies, soit en fonction des probabilités par :

$$\begin{aligned} H(S_{k+1} | S_1, \dots, S_k) &= H(S_1, \dots, S_{k+1}) - H(S_1, \dots, S_k) \\ &= -\sum p(S_1, \dots, S_{k+1}) \log p(S_{k+1} | S_1, \dots, S_k), \end{aligned} \quad (2)$$

Pour deux sources, on définit ainsi la redondance entre elles par :

$$R(S_1, S_2) = H(S_1) + H(S_2) - H(S_1, S_2) \quad (3)$$

et la complémentarité de la source  $S_2$  par rapport à la source  $S_1$ , c'est-à-dire la quantité moyenne d'information qu'il faut ajouter à  $S_2$  pour retrouver  $S_1$  :

$$C(S_1|S_2) = H(S_1|S_2) \quad (4)$$

ce qui conduit à la relation :

$$H(S_1) = R(S_1, S_1) + C(S_1|S_2) \quad (5)$$

Des approches analogues peuvent être envisagées dans un cadre non probabiliste, en s'appuyant par exemple sur l'entropie floue [46]. Le formalisme est pour l'instant moins développé dans cette direction.

Les notions d'entropie globale ne sont pas toujours bien adaptées aux problèmes de fusion, et des notions d'entropie conditionnelle aux classes à reconnaître par exemple sont souvent préférables: elles permettent une analyse plus fine de l'information qu'apporte chaque source pour chaque classe et sont donc mieux adaptées aux problèmes pour lesquels une source est meilleure pour certaines classes et moins bonne pour d'autres. Bien que la définition formelle de tels concepts ne pose pas de difficulté particulière, ils ne sont pas encore beaucoup utilisés en fusion et c'est vraisemblablement un point qui mériterait d'être approfondi.

## 3.2 Modélisation et estimation

La théorie la plus exploitée dans la littérature est de loin la théorie des probabilités, associée à la théorie bayésienne de la décision [32]. L'information y est modélisée par une probabilité conditionnelle, par exemple en fusion d'images, la probabilité pour qu'un pixel appartienne à une classe particulière, étant données les images disponibles. Ainsi, la mesure introduite dans la partie 2 s'écrit-elle sous la forme:

$$M_i^j = p(d_i|S_j) \quad (6)$$

En traitement des images, en l'absence de modélisations fonctionnelles fortes des phénomènes observés, les probabilités  $p(S_j|d_i)$  (probabilités, conditionnelles à l'hypothèse  $d_i$ , de l'information fournie par la source  $S_j$ ), sont par exemple apprises par dénombrement sur des zones de test (ou par apprentissage sur ces zones des paramètres

d'une loi donnée) et on en déduit la probabilité de l'équation 6 par application de la règle de Bayes.

L'avantage essentiel des méthodes probabilistes vient de ce qu'elles reposent sur une base mathématique solide et ont été l'objet de nombreux travaux. Elles proposent donc un éventail d'outils très riche permettant aussi bien la modélisation (par exemple par des familles de lois paramétriques aux propriétés bien étudiées) que l'apprentissage des modèles (pour des lois paramétriques ou non paramétriques) (voir par exemple [44, 47, 14]). Elles proposent également des règles d'usage soit théoriques (bornes, valeurs asymptotiques) soit heuristiques (tests d'hypothèses, critères de validité, tables de confiance). Enfin la modélisation probabiliste, soutenue par l'interprétation fréquentiste largement répandue dans le monde de la physique et du traitement du signal, est actuellement un concept universellement partagé qui sert naturellement de base de comparaison aux autres modélisations.

Mais les méthodes probabilistes sont également l'objet de critiques. Tout d'abord, si elles représentent bien l'incertain qui entache l'information, elles ne permettent pas aisément de représenter son imprécision, et elles conduisent souvent à confondre ces deux notions. Ensuite, elles nécessitent que, lors de l'apprentissage, des contraintes très strictes soient vérifiées par les mesures (imposées par les axiomes de base des probabilités) et par l'ensemble de classes considéré (exhaustivité). Ces contraintes peuvent rendre l'apprentissage très délicat, ou, si le problème à traiter est complexe, conduire pratiquement à des incohérences car l'utilisateur ne peut alors prendre en compte tout le réseau des dépendances probabilistes (cas des boucles logiques [56]). L'apprentissage de lois de probabilités nécessite, outre les hypothèses, un nombre de données important, ce qui conduit souvent à préférer des modèles paramétriques, qui à leur tour nécessitent des hypothèses sur la forme des lois.

### 3.3 Combinaison dans un cadre bayésien

Dans le modèle bayésien, la fusion peut être effectuée de manière équivalente à deux niveaux :

- soit au niveau de la modélisation, et on calcule alors des probabilités de la forme :

$$p(d_i | S_1, \dots, S_\ell) \quad (7)$$

à l'aide de la règle de Bayes :

$$p(d_i | S_1, \dots, S_\ell) = \frac{p(S_1, \dots, S_\ell | d_i) p(d_i)}{p(S_1, \dots, S_\ell)}, \quad (8)$$

où les différents termes sont estimés par apprentissage;

- soit par la règle de Bayes elle-même, où l'information issue d'un capteur vient mettre à jour l'information estimée d'après les capteurs précédents (c'est la seule forme utilisable si les informations sont disponibles successivement et

non simultanément) :

$$p(d_i | S_1, \dots, S_\ell) = \frac{p(S_1 | d_i) p(S_2 | d_i, S_1) \cdots p(S_\ell | d_i, S_1, \dots, S_{\ell-1}) p(d_i)}{p(S_1) p(S_2 | S_1) \cdots p(S_\ell | S_1, \dots, S_{\ell-1})} \quad (9)$$

Très souvent, étant données la complexité de l'apprentissage à partir de plusieurs capteurs et la difficulté d'obtenir des statistiques suffisantes, ces équations sont simplifiées sous l'hypothèse d'indépendance. Là encore, des critères ont été proposés pour vérifier la validité de ces hypothèses. Les formules précédentes deviennent alors :

$$p(d_i | S_1, \dots, S_\ell) = \frac{\prod_{j=1}^{\ell} p(S_j | d_i) p(d_i)}{p(S_1, \dots, S_\ell)} \quad (10)$$

Cette équation fait apparaître clairement le type de combinaison des informations, sous la forme d'un produit, donc une fusion conjonctive. Il est notable que la probabilité a priori joue exactement le même rôle dans la combinaison que chacune des sources, auxquelles elle est combinée également par un produit.

L'avantage de cette théorie, du point de vue de la combinaison, est qu'elle repose sur de solides bases mathématiques, et peut être utilisée pour la mise à jour de réseaux complexes de connaissances [57, 56]. Elle permet d'introduire des informations qui s'expriment facilement sous forme de probabilités, telles que le contexte spatial dans le cadre des champs de Markov ou la qualité des informations exprimée comme la probabilité pour qu'une mesure soit fiable [37].

Cependant, elle est contrainte, comme pour la modélisation, par les axiomes des probabilités, et son utilisation en pratique nécessite souvent des hypothèses simplificatrices (comme l'indépendance) rarement vérifiées. Elle nécessite de plus l'estimation des probabilités a priori  $p(d_i)$ , qui est souvent délicate et est primordiale dans les cas où l'on a peu d'informations (distributions très plates des probabilités conditionnelles). Si, dans le cas du traitement d'images, les probabilités conditionnelles peuvent être souvent bien estimées par apprentissage à partir de fréquences d'occurrence, ce n'est en général pas le cas des probabilités a priori. Leur évaluation sort du cadre des probabilités fréquentistes et fait souvent appel à des concepts plus subjectifs. La forme conjonctive de la fusion bayésienne conduit souvent en pratique à un effondrement des probabilités des événements qui sont déduits d'une longue chaîne de déduction. Enfin, elle ne permet pas de modéliser l'ignorance pour la prendre en compte dans la combinaison.

## 3.4 Combinaison vue comme un problème d'estimation

Une autre manière de voir la fusion probabiliste consiste à considérer que chaque source donne une probabilité (d'appartenance à une classe par exemple), et que la fusion consiste à combiner ces probabilités pour trouver la probabilité globale d'appartenance à la classe. Cette vision revient à considérer la fusion comme un problème d'estimation, et permet d'utiliser des opérateurs de combinaison différents du produit. En particulier les méthodes de moyenne ou moyenne pondérée, de médiane, de consensus sont souvent employées [17, 18, 33]. Des estimateurs robustes peuvent également être employés, afin de limiter ou supprimer l'influence des valeurs aberrantes («*outliers*»). Enfin, des méthodes issues de la théorie des variables régionalisées [51], telles que le krigeage ou le krigeage universel, pourraient également être utilisées dans ce cadre.

## 3.5 Décision

La dernière étape concerne la décision donc le choix d'une hypothèse  $d_i$ , par exemple le choix de la classe à laquelle appartient un point. Cette décision binaire peut être assortie d'une mesure de la qualité de cette décision, pouvant éventuellement conduire à la rejeter. La règle la plus utilisée pour la décision probabiliste et bayésienne est le maximum a posteriori : on choisit  $d_i$  si

$$p(d_i) = \max \{ p(d_k | S_1, \dots, S_\ell), 1 \leq k \leq n \} \quad (11)$$

mais de très nombreux autres critères ont été développés par les probabilistes et les statisticiens, pour qu'ils s'adaptent au mieux aux besoins de l'utilisateur et au contexte de sa décision: maximum de vraisemblance, maximum d'entropie, marginale maximale, espérance maximale, risque minimal, etc. Cependant, la grande variété de ces critères laisse l'utilisateur à nouveau démuni devant la justification d'un choix et l'éloigne de l'objectivité recherchée initialement par ces méthodes.

## 4. Fusion dans la théorie des fonctions de croyance

La théorie des fonctions de croyance (ou théorie de Dempster-Shafer) date des années 70 mais est encore relativement peu utilisée. Pourtant les premières applications sont prometteuses, et nous montrons dans cette partie quelles sont les caractéristiques de cette théorie qui justifient que l'on s'y intéresse, aussi bien du point de vue de la représentation des connaissances et de leurs imperfections (imprécision, incertitude, ambiguïté, ignorance, conflit) que de leur combinaison.

## 4.1 Modélisation

La théorie des fonctions de croyance permet, de manière analogue à la théorie des possibilités comme nous le verrons dans la partie suivante, de représenter à la fois l'imprécision et l'incertitude, à l'aide de fonctions de masse  $m$ , de plausibilité  $Pls$  et de croyance  $Bel$  [67, 69]. Les fonctions de masse sont définies sur tous les sous-ensembles de l'espace de discernement  $D$  (contenant par exemple les classes auxquelles on s'intéresse) et pas simplement sur les singletons comme les probabilités qui ne mesurent que la probabilité d'appartenance à une classe donnée.

Posons  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$  où chaque  $d_i$  désigne une hypothèse en faveur de laquelle une décision peut être prise (typiquement une classe dans un problème de classification multi-sources). Une fonction de masse est définie comme une fonction de  $2^D$  (ensemble des parties de  $D$ ) dans  $[0,1]$ . En général on impose  $m(\emptyset) = 0$ , et une normalisation de la forme:

$$\sum_{A \subset D} m(A) = 1, \tag{12}$$

qui garantit une sorte de commensurabilité entre plusieurs jeux de masse.

La contrainte  $m(\emptyset) = 0$  correspond à une hypothèse de monde clos, dans lequel toutes les solutions possibles sont effectivement représentées dans  $D$  (ce qui suppose que l'on est capable de les énumérer). Si l'on relâche cette contrainte et que l'on accepte d'avoir une masse strictement positive sur  $\emptyset$ , cela correspond alors à une hypothèse de monde ouvert, dans lequel des solutions hors de  $D$  sont envisageables.

Un élément focal est un sous-ensemble  $A$  de  $D$  tel que  $m(A) > 0$ . La réunion des éléments focaux est appelée noyau.

Une fonction de croyance  $Bel$  est une fonction totalement croissante définie de  $2^D$  dans  $[0,1]$  :

$$\forall A_1 \in 2^D, \dots, A_k \in 2^D, Bel\left(\bigcup_{i=1}^k A_i\right) \geq \sum_{\substack{l \subset \{1, \dots, k\} \\ l \neq \emptyset}} (-1)^{|l|+1} Bel\left(\bigcap_{i=1}^k A_i\right) \tag{13}$$

où  $|l|$  désigne le cardinal de  $l$ , et telle que  $Bel(\emptyset) = 0, Bel(D) = 1$ .

Etant donnée une fonction de masse  $m$ , la fonction  $Bel$  définie par :

$$\forall A \in 2^D, Bel(A) = \sum_{B \subset A, B \neq \emptyset} m(B) \tag{14}$$

est une fonction de croyance. Inversement, à partir d'une fonction de croyance définie comme une fonction totalement croissante (inégalité 13) telle que  $Bel(\emptyset) = 0$ ,

$Bel(D) = 1$ , on peut définir une fonction de masse par :

$$\forall A \in 2^D, m(A) = \sum_{B \subset A} (-1)^{|A-B|} Bel(B). \quad (15)$$

Cette fonction de masse vérifie alors l'équation 14.

La fonction de croyance mesure la confiance totale que l'on a dans un sous-ensemble  $A$ . Une fonction de plausibilité  $Pls$  est également une fonction de  $2^D$  dans  $[0,1]$  définie par

$$\forall A \in 2^D, Pls(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B) = 1 - Bel(A^c). \quad (16)$$

Dans l'hypothèse de monde ouvert, on a :  $Bel(D) = 1 - m(\emptyset)$ , et la plausibilité s'écrit alors plus généralement :

$$Pls(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B) = 1 - m(\emptyset) - Bel(A^c) = Bel(D) - Bel(A^c). \quad (17)$$

La plausibilité mesure la confiance maximum que l'on peut avoir dans  $A$ . Cette fonction a une interprétation naturelle dans le modèle des croyances transférables [69] où l'on considère que l'apport d'information peut permettre de transférer des croyances sur des sous-ensembles plus précis. La plausibilité représente alors la croyance maximale que l'on pourrait potentiellement affecter à un sous-ensemble  $A$  si l'on apprend par exemple que la solution se trouve dans  $A$  (toute la confiance mise dans un sous-ensemble  $B$  intersectant  $A$  est alors transférée sur  $A$  afin de mettre à 0 la confiance sur  $A^c$ ).

On a les propriétés suivantes :

$$\begin{aligned} \forall A \in 2^D, Pls(A) &\geq Bel(A) \\ \forall A \in 2^D, Bel(A) + Bel(A^c) &\leq 1 \\ \forall A \in 2^D, Pls(A) + Pls(A^c) &\leq 1 \\ \forall A \in 2^D, Bel(A) + Bel(A^c) = 1 &\Leftrightarrow Bel(A) = Pls(A) \end{aligned} \quad (18)$$

L'intervalle  $[Bel(A), Pls(A)]$  est appelé intervalle de confiance et sa longueur est une mesure de l'ignorance que l'on a sur un événement  $A$  et son complémentaire.

Si l'on affecte des masses uniquement aux hypothèses simples ( $m(A) = 0$  pour  $|A| > 1$ ), alors les trois fonctions  $m$ ,  $Bel$  et  $Pls$  sont égales et sont une probabilité. Dans les cas plus complexes, ce n'est pas le cas et il n'y a pas d'équivalence directe avec des probabilités. L'analogie des fonctions de crédibilité et de plausibilité pourrait être obtenu par exemple à partir de probabilités conditionnelles à des comportements

pessimistes et optimistes respectivement, mais leur formalisation serait beaucoup plus délicate que ce que propose la théorie des fonctions de croyance.

La possibilité d'affecter des masses aux hypothèses composées, et donc de travailler sur  $2^D$  plutôt que sur  $D$  constitue un des avantages de cette théorie. Elle permet en effet une modélisation très souple et très riche, en particulier de l'ambiguïté ou de l'hésitation entre hypothèses. Citons quelques exemples de situations dans lesquelles la fusion par la théorie des fonctions de croyance peut être employée :

- lorsqu'une source donne des informations seulement sur certaines hypothèses
- lorsqu'une source n'est pas capable de différencier deux hypothèses : la théorie des fonctions de croyance permet alors de considérer la disjonction de ces deux hypothèses, sans introduire d'information arbitraire forçant leur séparation ;
- lorsque l'on veut représenter la fiabilité globale d'une source : cela peut être réalisé en affectant une masse non nulle à  $D$  ;
- dans les cas où la fiabilité d'une source dépend des hypothèses.

## 4.2 Estimation des fonctions de masse

L'estimation des fonctions de masse est un problème difficile, qui n'a pas de solution universelle. La difficulté est augmentée ici si l'on veut affecter des masses aux hypothèses composées [35, 45].

La manière la plus simple que l'on puisse imaginer consiste à calculer les masses sur les singletons dans une source  $S_i$  par

$$m_j(\{d_i\}) = M_i^j, \quad (19)$$

où  $M_i^j$  est estimée le plus souvent comme une probabilité. Les masses sur tous les autres sous-ensembles de  $D$  sont alors nulles. Il est clair que ce modèle est très réducteur et n'exploite pas les caractéristiques intéressantes de la théorie des fonctions de croyance. Beaucoup d'approches s'appuient toutefois sur un tel modèle initial, puis répartissent les masses sur l'ensemble des hypothèses composées, ou n'utilisent que certaines hypothèses composées, dans une démarche simplificatrice et souvent très heuristique [44, 62, 73, 82]. Mais d'autres approches peuvent également être envisagées. Dans la suite) nous présentons quelques modèles de la littérature.

**Modification de modèles probabilistes.** Le modèle le plus simple et le plus souvent utilisé consiste à utiliser la technique d'affaiblissement [67]. Les nouvelles masses  $m'$  sont calculées à partir des masses initiales  $m$  de la manière suivante (l'indice  $j$  représentant la source d'information est omis ici) :

$$\begin{aligned} m'(\{d_i\}) &= \alpha \times m(\{d_i\}) \\ m'(D) &= 1 - \alpha + \alpha \times m(D) \end{aligned} \quad (20)$$

où  $\alpha \in [0, 1]$  est le coefficient d'affaiblissement. Dans le cas où les masses initiales sont apprises sur les singletons seulement, par exemple à partir de probabilités, alors  $m(D) = 0$  et  $m'(D) = 1 - \alpha$ . Cette technique est souvent utilisée pour affaiblir une source en fonction de sa fiabilité, et permet d'affecter une masse à  $D$  qui sera faible si la source est fiable et importante si la source ne l'est pas. Dans les cas extrêmes, la valeur  $\alpha = 0$  est utilisée pour une source qui n'est pas fiable du tout, et toute la masse est alors affectée à  $D$ , ce qui représente l'ignorance totale. La valeur  $\alpha = 1$  est utilisée pour une source fiable dans laquelle toute la masse est affectée aux singletons et où il n'y a aucune ambiguïté entre classes.

Ce type de modèle est très simple. L'apprentissage des masses sur les singletons peut bénéficier des techniques classiques d'apprentissage statistique. Cependant les disjonctions d'hypothèses ne sont pas modélisées, ce qui limite beaucoup la portée de ce modèle.

Deux modèles d'inspiration probabiliste ont été proposés par A. Appriou [2], et prennent en compte d'autres disjonctions que  $D$ . Ces modèles supposent une estimation initiale de probabilités conditionnelles, et permettent de prendre en compte la fiabilité de la source pour chaque hypothèse (et non plus globale comme dans le modèle précédent).

Dans [24], les disjonctions sont définies en fonction d'un critère de significativité des probabilités conditionnelles. Si une seule probabilité est significative (ce qui nécessite de définir des seuils), alors un modèle simple de masse portant sur les singletons est utilisé. Si plusieurs probabilités sont significatives, les disjonctions des hypothèses correspondantes sont également prises en compte. Si aucune probabilité n'est significative, la masse porte entièrement sur  $D$ .

**Modification de modèles de distances.** Une approche de type reconnaissance des formes est proposée dans [21]. Si chaque classe correspondant à une hypothèse  $d_i$  est représentée par un prototype (ou un centre)  $x_i$ , une fonction de masse associée à chaque classe peut-être définie, dans laquelle  $d_i$  et  $D$  sont les seuls éléments focaux :

$$\begin{cases} m^i(\{d_i\})(x) = \alpha e^{-\gamma d^2(x, x_i)} \\ m^i(D)(x) = 1 - \alpha e^{-\gamma d^2(x, x_i)} \end{cases} \quad (21)$$

où  $x$  est l'élément sur lequel on souhaite prendre une décision. Les paramètres  $\alpha$  et  $\gamma$  permettent de jouer sur la quantité d'ignorance et la forme des fonctions de masse. La distance  $d^2(x, x_i)$  permet d'affecter une masse d'autant plus importante que  $x$  « ressemble » au prototype  $x_i$ . Les  $m_i$  sont ensuite combinées selon la règle de Demspter (voir section 4.3) pour avoir une masse prenant en compte l'information sur toutes les classes.

Cette approche peut également être appliquée aux  $k$  plus proches voisins. La distance est alors la distance de  $x$  à l'un de ses voisins, et la masse est affectée selon le modèle précédent à la classe à laquelle appartient ce voisin et à  $D$ . Les fonctions calculées pour chacun des voisins de  $x$  sont ensuite combinées par la règle de Dempster.

**A priori sur les éléments focaux composés (disjonctions).** Dans de nombreuses applications, il est possible de disposer d'informations a priori qui permettent de déterminer de manière supervisée quels sont les éléments focaux à prendre en compte. Ces méthodes ont été utilisées par exemple dans [9, 72, 55, 54]. Dans [9], des images du cerveau sont combinées pour détecter des pathologies. Les fonctions de masse sont estimées à partir des niveaux de gris [11] et les classes non distinguées dans certaines images par leur niveaux de gris sont regroupées en disjonctions. Dans [72], les résultats de détecteurs de plusieurs structures sont fusionnés pour interpréter une image radar. Ce sont alors les capacités des détecteurs à différencier ou non différentes classes de structures qui permettent de définir les éléments focaux et les disjonctions de classes à prendre en compte. Dans [55, 54], des attributs extraits d'images de différents capteurs sont combinés pour différencier des mines d'objets inoffensifs, dans un programme de déminage humanitaire. Les mesures à combiner peuvent être caractéristiques d'une classe ou de l'espace de discernement complet. Par exemple, la profondeur des objets permet d'affecter une masse aux objets inoffensifs si elle est importante, mais ne permet pas de distinguer les types d'objets si elle est faible et la masse est alors affectée à  $D$ .

Ce type d'approche est très efficace si l'on dispose de telles informations, mais elle reste supervisée, et donc applicable à des problèmes où le cardinal de  $D$  reste raisonnable.

**Apprentissage des éléments focaux composés.** Les méthodes d'apprentissage des éléments focaux s'appuient souvent sur des décisions (classifications typiquement) préalables effectuées dans chaque source séparément. Par exemple, de matrices de confusion peuvent être extraites les classes confondues selon une source, dont la réunion constituera un élément focal de la fonction de masse attachée à cette source.

De manière complètement non supervisée, les intersections entre les classes détectées dans une source et celles détectées dans une autre source peuvent définir les singletons de l'espace de discernement, les classes détectées dans chaque source devenant alors des disjonctions [50].

Des mesures de dissonance et consonance sont proposées dans [52]. L'idée consiste à modifier une fonction de masse initiale portant uniquement sur les singletons en affaiblissant les masses sur les singletons en fonction du degré de consonance de ceux-ci, et en créant des masses sur des disjonctions de deux classes en fonction du degré de dissonance entre ces classes. Cette méthode a été appliquée à la fusion de plusieurs classifieurs. La consonance d'une classe est calculée d'après le nombre d'éléments affectés à cette classe par tous les classifieurs, et la dissonance d'après le nombre

d'éléments classés différemment.

Dans le cas où les éléments sont caractérisés par une mesure dans un espace à une dimension (typiquement représentés par un histogramme), les masses sur les hypothèses composées peuvent être définies dans les zones de recouvrement ou d'ambiguïté entre deux classes voisines. Une autre méthode, s'inspirant des méthodes de seuillage hiérarchique, est proposée dans [63], où chaque pic de l'histogramme correspond à un singleton. Puis l'histogramme est progressivement seuillé à des hauteurs décroissantes, et des disjonctions sont créées lorsque des maxima se regroupent. Cette méthode est à rapprocher des arbres de composantes utilisés par exemple en morphologie mathématique avec le concept de topologie des coupes, ainsi que des intervalles de confiance et de leurs liens avec les distributions de possibilité.

**Introduction de disjonctions par morphologie mathématique.** Sans se restreindre à des espaces de représentation de dimension 1, la méthode proposée dans [10] permet de calculer des masses sur des disjonctions par érosions et dilations de masses définies dans un premier temps sur des singletons. Les propriétés de ces opérations morphologiques permettent de les interpréter comme des croyances et plausibilités, dont les masses sont ensuite déduites.

### 4.3 Combinaison conjonctive

Soit  $m_j$  ( $j = 1, \dots, \ell$ ) la fonction de masse définie pour la source  $j$ . La combinaison conjonctive des fonctions de masse est effectuée selon la règle orthogonale de Dempster [67] :

$$\forall A \subset D, (m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_\ell)(A) = \sum_{B_1 \cap \dots \cap B_\ell = A} m_1(B_1)m_2(B_2)\dots m_\ell(B_\ell). \quad (22)$$

Des justifications axiomatiques de cette règle peuvent être trouvées dans [69]. Les différences entre ces axiomes et ceux de Cox [19] (qui permettent de justifier les règles des probabilités) expliquent les origines des différences entre les deux théories [7].

Dans cette équation non normalisée, la masse affectée par la combinaison à l'ensemble vide est en général non nulle. Elle s'interprète souvent comme le conflit entre les sources. Notons que cette mesure de conflit n'est pas une mesure absolue mais dépend de la modélisation effectuée (en particulier de la répartition des masses sur les différents sous-ensembles de  $D$ ). Le conflit peut avoir deux sources essentielles : soit les sources ne sont pas fiables, soit elles donnent des informations sur des phénomènes différents. Dans le premier cas, il est acceptable de combiner les sources, et une solution pour prendre en compte le conflit est d'affaiblir les sources en fonction de leur fiabilité.

Dans le deuxième cas, la combinaison n'a pas de sens. Des méthodes de regroupement des sources selon les phénomènes qu'elles observent ont été proposées, visant à combiner les sources à l'intérieur de chaque groupe uniquement. Ces groupes sont calculés de sorte à minimiser le conflit dans chaque groupe [65, 54].

Dans une hypothèse de monde ouvert, une masse non nulle sur l'ensemble vide peut également représenter une solution non prévue dans  $D$ . Sous l'hypothèse du monde fermé, où tout ce qui est possible est représenté dans  $D$ , cette interprétation n'est pas acceptable, ce qui conduit à normaliser le résultat de la combinaison sous la forme :

$$\left\{ \begin{aligned} (m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_\ell)(A) &= \frac{\sum_{B_1 \cap \dots \cap B_\ell = A} m_1(B_1)m_2(B_2)\dots m_\ell(B_\ell)}{1 - \sum_{B_1 \cap \dots \cap B_\ell = \emptyset} m_1(B_1)m_2(B_2)\dots m_\ell(B_\ell)} \\ (m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_\ell)(\emptyset) &= 0 \end{aligned} \right. \quad (23)$$

si le dénominateur de l'équation 23 est non nul, c'est-à-dire si :

$$k = \sum_{B_1 \cap \dots \cap B_\ell = \emptyset} m_1(B_1)m_2(B_2)\dots m_\ell(B_\ell) < 1 \quad (24)$$

Cette quantité (qui mesure le conflit entre les sources) est donc directement prise en compte dans la combinaison sous forme de facteur de normalisation. Elle représente la masse qui serait affectée à l'ensemble vide si l'on n'avait pas cette normalisation (équation 22). Il est important de prendre en compte cette valeur pour juger de la qualité de la combinaison : celle-ci peut ne pas avoir grand sens en cas de fort conflit et conduire à des décisions criticables.

D'autres méthodes que la normalisation ont été proposées pour éliminer la masse sur l'ensemble vide. Par exemple, cette masse est affectée à  $D$  dans [75]. Dans [29], une méthode plus fine est proposée : par exemple si les éléments focaux  $A_1$  et  $A_2$  de deux sources sont en conflit ( $A_1 \cap A_2 = \emptyset$ ), alors le produit  $m_1(A_1)m_2(A_2)$  est affecté à  $m_1(A_1 \cup A_2)$ . Cela suppose qu'au moins une des deux sources est fiable mais qu'on ne sait pas laquelle, et la forme disjonctive du résultat est l'attitude la plus prudente.

Examinons maintenant les propriétés de la règle de combinaison. Elle est commutative et associative. La fonction de masse définie par :

$$m_0(D) = 1 \text{ et } \forall A \subset D, A \neq D, m_0(A) = 0 \quad (25)$$

est élément neutre pour la combinaison. Cette masse représente une source complètement non informative, qui ne distingue aucun élément de  $D$ . Qu'elle ne joue aucun rôle dans la combinaison correspond donc bien à l'intuition. La définition de cette fonction de masse remplace le principe d'indifférence utilisé en probabilités (équité répartition des probabilités sur tous les éléments), et représente mieux l'absence d'information.

La loi  $\oplus$  n'est pas idempotente. Les valeurs les plus fortes sont renforcées et les plus faibles diminuées. Il est important également de noter que le conflit entre deux fonctions de masse identiques est non nul, et qu'il est d'autant plus fort que la masse est répartie sur les singletons.

À l'origine, cette règle de combinaison était réputée applicable seulement sous l'hypothèse d'indépendance des sources. Il a été montré [60, 61] que la règle est encore applicable sans cette hypothèse, en s'appuyant sur l'analogie avec les ensembles fermés aléatoires. De manière moins technique et plus philosophique, l'indépendance dans le cadre des fonctions de croyance ne doit pas être comprise au sens statistique, mais dans un sens plus « cognitif » [71]. Imaginons par exemple des experts dont on veut combiner les opinions. Ils ne sont vraisemblablement pas indépendants statistiquement (s'ils sont experts du même domaine), mais on peut attendre d'eux qu'ils le soit cognitivement, c'est-à-dire que chacun se forge une opinion sans consulter les autres. C'est à ce type d'indépendance que s'applique la règle de Dempster, ce qui se traduit par la non idempotence de la règle, conduisant à un renforcement des fonctions de masse identiques. Sous hypothèse de dépendance, on souhaiterait au contraire avoir une règle idempotente. Nous reviendrons sur ces considérations dans la théorie des ensembles flous.

Lorsque les fonctions  $m$ ,  $Bel$ , et  $Pls$  sont des probabilités (c'est-à-dire lorsque les seuls éléments focaux sont des singletons), la loi de combinaison de Dempster est cohérente avec les lois classiques des probabilités. Cela fait donc apparaître les probabilités comme la limite de la théorie des croyances lorsqu'il n'y a pas d'ambiguïté ni d'imprécision et que seule l'incertitude des données doit être pris en compte.

La règle de Dempster a un comportement conjonctif, puisqu'elle donne des éléments focaux qui sont les intersections des éléments focaux des fonctions de masse initiales. Elle renforce donc la focalisation, et diminue la longueur des intervalles de confiance  $[Bel(A), Pls(A)]$ .

En pratique, le calcul de la combinaison s'effectue en établissant la table d'intersection des éléments focaux. Par exemple, si  $m_1$  porte sur  $d_1 \cup d_2$  (typiquement dans le cas d'une source qui n'est pas capable de différencier ces deux hypothèses) et  $d_3$ , et  $m_2$  sur  $d_1$  et  $d_2 \cup d_3$ , les éléments focaux de  $m_1 \oplus m_2$  ne sont plus que les singletons et l'ensemble vide. Cet exemple illustre comment la combinaison conjonctive réduit l'imprécision et résout (ou diminue en général) l'ambiguïté de chaque source.

Prenons maintenant le cas particulier d'une source qui donne une information certaine sur un sous-ensemble  $B$  de  $D$ . Cette information se modélise de la manière suivante :

$$m_B(B) = 1 \text{ et } \forall A \subset D, A \neq B, m_B(A) = 0 \quad (26)$$

Toutes les sources doivent alors être « conditionnées » par  $m_B$ , afin de prendre en compte que la vérité ne peut être que dans  $B$ . Le conditionnement se fait simplement en

combinant une fonction de masse  $m$  avec  $m_B$  :

$$\forall A \subset D, (m \oplus m_B)(A) = \sum_{A=B \cap C} m(C), \quad (27)$$

qui s'écrit également :

$$\begin{aligned} \forall A \subset D, A \not\subset B, (m \oplus m_B)(A) &= 0 \\ \forall A \subset D, A \subset B, (m \oplus m_B)(A) &= \sum_{X \subset B^c} m(A \cup X) \end{aligned} \quad (28)$$

Le conditionnement correspond au modèle de croyances transférables [69] : la connaissance de  $B$  conduit à transférer toute la masse sur les sous-ensembles inclus dans  $B$ . Ainsi la croyance initialement affectée à un sous-ensemble  $A = A_1 \cup A_2$  (avec  $A_1 \subset B$  et  $A_2 \subset B^c$ ) représentait le fait que la vérité pouvait être n'importe où dans  $A$ . La connaissance de  $B$  permet maintenant de préciser l'information et de réduire  $A$  à  $A_1$ . En quelque sorte, la croyance diffuse dans  $A$  est concentrée dans la seule partie qui est incluse dans  $B$ .

Dans le cas général, ainsi que le montre la formule 22, la combinaison est de complexité exponentielle. En pratique il est rare que tous les sous-ensembles de  $D$  soient à prendre en compte, et la complexité reste souvent plus raisonnable. Une complexité linéaire est obtenue si les masses sont modélisées selon la structure de Barnett [4], c'est-à-dire où les éléments focaux de chaque source sont uniquement les singletons et les compléments des singletons. Cette structure est adaptée à des problèmes de reconnaissance des formes dans lesquels chaque source est un détecteur qui permet de distinguer une classe contre toutes les autres. Mais elle n'est pas générale et ne s'applique pas aux sources qui nécessitent des éléments focaux qui soient des disjonctions quelconques.

## 4.4 Autres modes de combinaison

D'autres modes de combinaison, tels que des modes disjonctifs ou de compromis, sont possibles, en remplaçant l'intersection dans la formule 22 par une autre opération ensembliste. Par exemple, une fusion disjonctive est obtenue en prenant la réunion [71] :

$$\forall A \subset D, (m_1 \oplus_{\cup} m_2 \oplus_{\cup} \dots \oplus_{\cup} m_\ell)(A) = \sum_{B_1 \cup \dots \cup B_\ell = A} m_1(B_1) m_2(B_2) \dots m_\ell(B_\ell). \quad (29)$$

Notons que cette combinaison ne peut pas faire apparaître de conflit. Elle élargit les éléments focaux et fournit donc une information moins précise que chacune des sources. Ce mode de fusion peut être intéressant quand on ne sait pas modéliser a priori les fiabilités des sources, leurs ambiguïtés et imprécisions. Par exemple, si une source est

focalisée sur  $A$  et une autre sur  $B$  avec  $A \cap B = \emptyset$ , une manière de ne pas lever le conflit est de conclure que la vérité est dans  $A \cup B$ , ce que permet la fusion disjonctive.

## 4.5 Décision

Une fois calculées les fonctions de masse combinées, les fonctions de croyance et de plausibilité sont déduites par les équations 14 et 16. La dernière étape est celle de la décision, donc du choix d'un sous-ensemble de  $D$  maximisant un certain critère. Dans la suite,  $m$ ,  $Bel$  et  $Pls$  désignent les fonctions de masse, de croyance et de plausibilité obtenues après combinaison.

Dans la théorie des fonctions de croyances, plusieurs règles de décision sont possibles, et la plupart est appliquée au choix d'un singleton  $d_i$  :

- **le maximum de plausibilité :**

$$d_i \text{ si } Pls(d_i) = \max \{ Pls(d_k), 1 \leq k \leq n \} \quad (30)$$

cette règle étant optimale au sens de critères d'inspiration probabiliste pour des fonctions de masse dérivées de probabilités [1] ;

- **le maximum de crédibilité :**

$$d_i \text{ si } Bel(d_i) = \max \{ Bel(d_k), 1 \leq k \leq n \} \quad (31)$$

qui est équivalent au critère du maximum de plausibilité dans le cas où le résultat de la combinaison ne porte que sur les singletons ;

- **le maximum de crédibilité sans recouvrement des intervalles de confiance (sans risque d'erreur) :**

$$d_i \text{ si } Bel(d_i) \geq \max \{ Pls(d_k), 1 \leq k \leq n, k \neq i \} \quad (32)$$

cette dernière condition étant particulièrement stricte et pouvant ne conduire à aucune décision;

- **le maximum de crédibilité avec rejet [50] :**

$$d_i \text{ si } Bel(d_i) = \max \{ Bel(d_k), 1 \leq k \leq n \} \text{ et } Bel(d_i) \geq Bel(\{d_i\}^c) \quad (33)$$

qui exprime que la décision doit être suffisamment non ambiguë puisque la condition sera vérifiée si la masse est très focalisée sur  $d_i$ .

- **le maximum de probabilité pignistique, celle-ci étant définie par [70] :**

$$d_i \text{ si } \text{Bet}P(d_i) = \sum_{d_i \in A} \frac{m(A)}{|A|(1-m(\emptyset))} \quad (34)$$

où  $|A|$  désigne le cardinal de  $A$ , qui permet de repasser à un contexte probabiliste souvent souhaité pour la prise de décision (ou le pari) ou pour associer cette décision à d'autres critères probabilistes, par exemple dans le cadre des champs de Markov pour des critères de régularisation spatiale [72].

Des règles mixtes ont également été proposées, dans lesquelles la plausibilité est utilisée pour certaines classes et la croyance pour d'autres. Cela permet de favoriser la détection des classes pour lesquelles on considère la plausibilité [54].

La décision peut également être prise en faveur d'une disjonction. Elle est alors imprécise, mais permet de prendre en compte des mélanges de classes ou des ambiguïtés subsistant après fusion [9]. La décision permet également d'indiquer les éléments pour lesquels la fusion ne suffit pas à lever les ambiguïtés et donc de suggérer l'acquisition de nouvelles informations, ainsi que l'exploite la fusion active [59, 34].

Enfin, des règles de décision avec coût ont été proposées [21]. Pour toute fonction  $f$  de  $D$  dans  $\mathbb{R}$ , les espérances inférieure et supérieure de  $f$  relativement à une fonction de croyance  $Bel$ , au sens de Dempster, sont définies par :

$$\begin{aligned} E_*(f) &= \sum_{A \subset D} m(A) \min_{d_i \in A} f(d_i) \\ E^*(f) &= \sum_{A \subset D} m(A) \max_{d_i \in A} f(d_i) \end{aligned} \quad (35)$$

Les règles de décision avec coût s'obtiennent alors en prenant pour  $f$  une fonction qui exprime le coût d'une action lorsque l'élément sur lequel porte la décision correspond à l'hypothèse  $d_i$ . Cette fonction de coût peut également être introduite dans une règle de décision avec coût probabiliste classique, en utilisant la probabilité pignistique. Ainsi la décision peut être optimiste si l'espérance inférieure est minimisée, pessimiste si l'espérance supérieure est minimisée, ou intermédiaire si la probabilité pignistique est utilisée.

## 5. Fusion floue et possibiliste

### 5.1 Modélisation

Parmi les techniques non probabilistes qui ont fait leur apparition depuis une dizaine d'années en fusion, la théorie des ensembles flous fournit un très bon outil pour représenter explicitement des informations imprécises, sous la forme de fonctions d'appartenance [79, 39,3]. La mesure  $M_i^j$  prend alors la forme :

$$M_i^j = \mu_i^j \quad (36)$$

où  $\mu_i^j$  désigne par exemple la fonction d'appartenance caractérisant l'hypothèse  $d_i$  selon la source  $S_j$ .

Ces fonctions ne souffrent pas des contraintes axiomatiques imposées aux probabilités et offrent donc une plus grande souplesse lors de la modélisation. Elles permettent de représenter des informations de types et de sémantiques variés (plausibilités, similarités, préférences...).

La théorie des possibilités [80, 28], dérivée des ensembles flous, permet de représenter à la fois l'imprécision et l'incertitude, par l'intermédiaire de distributions de possibilités  $\pi$  sur un ensemble  $S$  et de deux fonctions caractérisant les événements : la possibilité  $\Pi$  et la nécessité  $N$ , définies à partir de la distribution de possibilité pour un événement  $A \subset S$  par :

$$\begin{aligned} \Pi(A) &= \sup\{\pi(s), s \in A\} \\ N(A) &= \inf\{(1 - \pi(s)), s \notin A\} = 1 - \Pi(A^c) \end{aligned} \quad (37)$$

où  $A^c$  désigne le complémentaire de  $A$  (l'événement contraire).

On introduit parfois une contrainte de normalisation, plus faible que dans les probabilités :

$$\sup\{\pi(x), x \in S\} = 1. \quad (38)$$

Cette contrainte correspond à une hypothèse de monde clos dans lequel au moins un élément de  $S$  est complètement possible.

Une distribution de possibilité s'interprète comme une fonction donnant le degré de possibilité pour qu'une variable prenne la valeur  $s$ ,  $S$  étant le domaine des valeurs de la variable. La distribution  $\pi$  s'interprète alors comme la fonction d'appartenance au sous-ensemble flou de  $S$  des valeurs possibles pour cette variable. Dans le cadre de la fusion, une application possible de cette théorie consiste à prendre  $S = D$  (l'ensemble des hypothèses) et à définir la mesure  $M_i^j$  par :

$$M_i^j = \pi_j(d_i) \quad (39)$$

On définit ainsi une distribution de possibilité par source (et par élément sur lequel porte la décision). La possibilité et la nécessité pour une hypothèse  $d_i$  s'écrivent alors :

$$\begin{aligned} \Pi_j(\{d_i\}) &= \pi_j(d_i) \\ N_j(\{d_i\}) &= \inf\{(1 - \pi_j(d_k)), d_k \neq d_i\} \end{aligned} \quad (39)$$

Pour un sous-ensemble quelconque  $A$  de  $D$ , la possibilité et la nécessité sont calculées d'après les formules 37.

Dans des problèmes de classification multi-sources, cette modélisation suppose que

les classes sont nettes, alors que le modèle flou défini par l'équation 36 suppose que les classes sont floues.

## 5.2 Définition des fonctions d'appartenance ou des distributions de possibilité

La construction des fonctions d'appartenance ou distributions de possibilités peut être effectuée de plusieurs manières.

Dans la plupart des applications, cette construction est faite soit en s'inspirant directement des méthodes d'apprentissage probabiliste, soit par des heuristiques, soit par des méthodes neuromimétiques permettant d'apprendre les paramètres de formes particulières de fonctions d'appartenance, soit enfin par la minimisation de critères de classification [6]. Décrivons maintenant les principales méthodes.

Une première méthode consiste à définir la fonction d'appartenance en fonction de mesures de caractéristiques extraites de la source (intensité, gradient, etc.). Ces fonctions sont souvent déterminées de manière supervisée, mais elles peuvent également être apprises, par exemple à partir d'algorithmes de classification automatique tels que les C-moyennes floues [6] ou les C-moyennes possibilistes [42]. L'inconvénient principal des C-moyennes floues est que les fonctions d'appartenance ont une forme contreintuitive : les valeurs d'appartenance à une classe ne sont pas décroissantes en fonction de la distance au centre de la classe. Ce problème est évité avec les C-moyennes possibilistes.

Dans le cas de variables linguistiques, les formes des fonctions d'appartenance et leurs paramètres sont souvent définies par l'utilisateur.

La construction de distributions de possibilités peut également être effectuée à partir d'un apprentissage probabiliste, puis par une transformation de probabilité en possibilité. Plusieurs méthodes ont été proposées pour cela. L'avantage essentiel par exemple en traitement d'images est que l'on dispose souvent d'informations statistiques, en particulier d'histogrammes, qui se prêtent bien à l'emploi de méthodes d'apprentissage statistiques. On obtient alors des distributions de probabilités  $p_k$ . Leur transformation en distributions de possibilités  $\pi_k$  (les deux distributions sont supposées discrètes, et  $1 \leq k \leq K$ ) est effectuée en fonction de différents critères [26, 23, 41], tels que la préservation de l'ordre, des contraintes de normalisation, la conservation de l'incertain mesuré par l'entropie [41], la cohérence  $p - \pi$ , exprimée par [20] :

$$\forall k, \pi_k \leq p_k \tag{40}$$

qui n'est pas très satisfaisante (une hypothèse peu probable peut être possible), ou [80] :

$$\sum_{k=1}^K \pi_k p_k = c \tag{41}$$

où  $c$  est une constante dans  $[0,1]$ , ou encore une relation plus générale sur tous les sous-ensembles  $A$  [25] :

$$N(A) \leq P(A) \leq \Pi(A) \quad (42)$$

Une comparaison de ces approches peut être trouvée dans [41].

D'autres méthodes cherchent à estimer directement les fonctions d'appartenance à partir de l'histogramme, afin d'optimiser des critères d'entropie [15], ou de minimum de spécificité et de cohérence [16].

Dans tous les cas, ces méthodes cherchent une ressemblance entre l'histogramme et les fonctions d'appartenance ou les distributions de possibilité, et ne prennent pas en compte les interprétations spécifiques au flou qui invalident certaines de ces ressemblances. Par exemple, les queues des histogrammes correspondent aux classes peu représentées, donc avec des valeurs qui peuvent être très faibles, même si les points concernés appartiennent bien aux classes correspondantes. La méthode proposée dans [11] permet d'éviter ce problème grâce à un critère combinant la ressemblance des fonctions d'appartenance et de l'histogramme là où elle a un sens, et une forme a priori des fonctions correspondant à l'interprétation recherchée. Les paramètres des fonctions d'appartenance sont alors estimés pour optimiser ce critère, par une méthode de recuit simulé.

### 5.3 Combinaison

Un des intérêts de la théorie des ensembles flous et des possibilités, outre qu'elle impose peu de contraintes au niveau de la modélisation, est qu'elle offre une grande variété d'opérateurs de combinaison.

Une caractéristique importante, commune à toutes les théories, de ces opérateurs de combinaison est qu'ils fournissent un résultat de même nature que les fonctions de départ (propriété de fermeture) et qui a donc la même interprétation en termes d'imprécision et d'incertitude. Ainsi, ils permettent de ne prendre aucune décision binaire partielle avant la combinaison, ce qui pourrait conduire à des contradictions difficiles à lever. La décision n'est prise qu'en dernier lieu, sur le résultat de la combinaison.

Dans la théorie des ensembles flous et des possibilités, de multiples modes de combinaison sont possibles [27, 77]. Parmi les principaux opérateurs on trouve en particulier les  $t$ -normes, les  $t$ -conormes [53, 66], les moyennes [76, 36], les sommes symétriques, et des opérateurs prenant en compte des mesures de conflit ou encore de fiabilité des sources [30, 22]. Nous ne rappelons pas ici les définitions de ces opérateurs, mais discutons plutôt la manière de les choisir.

Le choix d'un opérateur peut se faire selon plusieurs critères pour la fusion d'images [8]. Un premier critère est le comportement de l'opérateur. Des comportements sévères, indulgents ou prudents se traduisent sous forme mathématique de conjonction, disjonction ou compromis. Soit  $x$  et  $y$  deux réels (dans  $[0,1]$ ) représentant les degrés d'appartenance ou de possibilité à combiner. La combinaison de  $x$  et  $y$  par un opérateur  $F$  est dite :

- **conjonctive** si  $F(x, y) \leq \min(x, y)$  (correspondant à un comportement sévère),
- **disjonctive** si  $F(x, y) \geq \min(x, y)$  (comportement indulgent),
- **de compromis** si  $x \leq F(x, y) \leq y$  si  $x \leq y$ , et  $y \leq F(x, y) \leq x$  sinon (comportement prudent).

Cette distinction ne suffit pas à classer les opérateurs dont le comportement n'est pas toujours le même. Ainsi, la classification définie dans [8] ne décrit pas les opérateurs seulement comme conjonctifs ou disjonctifs, mais aussi en fonction de leur comportement selon les valeurs des informations à combiner. Ainsi, les trois classes proposées correspondent :

1. aux **opérateurs autonomes à comportement constant (ACC)** : le résultat ne dépend que des valeurs à combiner (le calcul ne fait intervenir aucune autre information) et le comportement est le même quelles que soient ces valeurs ;
2. aux **opérateurs autonomes à comportement variable (ACV)** : le comportement dépend des valeurs numériques des informations à fusionner ;
3. aux **opérateurs dépendant du contexte (DC)**, par exemple d'une connaissance plus globale telle que la fiabilité des capteurs, ou encore le conflit entre les sources.

Les opérateurs de fusion floue se répartissent dans les trois classes. En effet, les  $t$ -normes, qui généralisent l'intersection ensembliste aux ensembles flous, sont des opérateurs ACC conjonctifs, puisque pour toute  $t$ -norme  $t$ , on a :

$$\forall (x, y) \in [0, 1]^2, \quad t(x, y) \leq \min(x, y)$$

À l'opposé, les  $t$ -conormes, généralisant la réunion, sont des opérateurs ACC disjonctifs, puisque pour toute  $t$ -conorme  $T$ , on a :

$$\forall (x, y) \in [0, 1]^2, \quad T(x, y) \geq \max(x, y)$$

Les opérateurs de moyenne sont également ACC et ont un comportement de compromis, puisqu'ils vérifient :

$$\forall (x, y) \in [0, 1]^2, \quad \min(x, y) \leq m(x, y) \leq \max(x, y)$$

Notons que la fusion bayésienne, où l'opérateur impliqué est un produit, et la fusion

des fonctions de croyances par la somme orthogonale de Dempster sont également conjonctives.

Dans la classe des opérateurs ACV, on trouve par exemple certaines sommes symétriques. De manière générale, toute somme symétrique associative  $\sigma$  (sauf les médianes) a le comportement suivant [28] :

- conjonctif si  $\max(x, y) < 1/2$  :  $\sigma(x, y) \leq \min(x, y)$
- disjonctif si  $\min(x, y) > 1/2$  :  $\sigma(x, y) \geq \max(x, y)$
- compromis si  $x \leq 1/2 \leq y$  :  $x \leq \sigma(x, y) \leq y$  (et l'inégalité contraire si  $y \leq 1/2 \leq x$ ).

Les sommes symétriques non associatives ont également un comportement qui varie, mais selon des règles moins simples [8].

Des exemples d'opérateurs DC se trouvent dans la théorie des possibilités. Par exemple des opérateurs dépendant d'une mesure globale de conflit entre les deux sources d'information [30] sont applicables aux cas où l'une des deux informations est fiable sans qu'on sache laquelle, de telle sorte que :

- ils sont conjonctifs si les sources sont consonantes (de faible conflit) : dans ce cas, les deux sources sont nécessairement fiables, et donc l'opérateur peut être sévère ;
- ils sont disjonctifs si les sources sont dissonantes (de fort conflit) : une disjonction favorise alors l'ensemble des possibilités données par les deux sources ;
- ils se comportent comme un compromis dans les cas de conflit partiel: ces cas posant le plus de problèmes, les opérateurs sont alors « prudents ».

L'avantage des opérateurs DC est qu'ils permettent de prendre en compte une grande variété de situations, dont plusieurs se produisent fréquemment simultanément. En voici quelques exemples :

- les sources peuvent être conflictuelles lorsqu'elles donnent des informations sur un type d'événement (une classe par exemple) et consonantes pour une autre classe,
- les sources peuvent avoir des fiabilités globales différentes,
- une source peut être fiable pour une classe et peu fiable pour une autre, etc.

Cette classification, qui regroupe tous les opérateurs classiquement utilisés, constitue un premier critère de choix d'un opérateur pour une application spécifique.

Un deuxième critère est donné par les propriétés des opérateurs et leur interprétation en termes de fusion de données incertaines, imprécises, incomplètes ou encore

ambiguës.

Les propriétés de commutativité et d'associativité expriment que le résultat de la combinaison est indépendant de l'ordre dans lequel les informations sont combinées. Si la commutativité est satisfaite par tous les opérateurs couramment utilisés, l'associativité ne l'est pas systématiquement (les moyennes et les sommes symétriques ne sont en général pas associatives). Ces deux propriétés sont souvent posées comme les propriétés minimales que les opérateurs de fusion doivent satisfaire. Pourtant, le mode de raisonnement humain ne les respecte pas toujours. Par exemple, un photo-interprète commence souvent par construire une interprétation primaire d'une scène à partir d'une seule image, puis améliore cette interprétation à l'aide des autres images, selon un processus qui n'est clairement pas commutatif.

L'existence d'un élément neutre signifie qu'une source donnant cette valeur n'aura aucune influence sur le résultat de la combinaison, et représente une sorte d'indifférence de la source par rapport à l'information recherchée, ou encore une ignorance totale de celle-ci. Un tel élément existe pour les t-normes et les t-conormes.

Autre élément particulier, un élément absorbant signifie qu'une source donnant cette valeur est complètement déterminante sur le résultat de la fusion. De tels éléments existent également pour les t-normes et les t-conormes.

La propriété de croissance est généralement imposée aux opérateurs et correspond bien à l'intuition.

Des conditions aux limites, définissant le comportement des opérateurs lorsque les informations à combiner prennent des valeurs extrêmes, permettent de garantir la compatibilité avec le cas binaire, où toutes les propositions sont soit justes soit fausses.

La propriété de continuité satisfaite par la plupart des opérateurs garantit la robustesse de la fusion. Cependant, cette propriété n'est pas toujours nécessaire, puisque les phénomènes naturels ne sont pas toujours continus.

L'idempotence signifie que la donnée d'une information déjà disponible ne va pas changer le résultat de la fusion. Cette propriété n'est pas systématiquement imposée. Elle est vérifiée par les moyennes, par la t-norme min et la t-conorme max (et ce sont les seules). On peut vouloir au contraire que la combinaison de deux valeurs identiques renforce ou affaiblisse le résultat global. Prenons l'exemple de témoignages simultanés identiques. Si les témoins sont de connivence, il n'est pas surprenant qu'ils disent la même chose et on combinera donc les degrés de confiance associés de manière idempotente. Si au contraire ils sont complètement indépendants, on renforcera la crédibilité de ce qu'ils disent si on leur fait confiance, ou on l'affaiblira si on ne leur fait pas confiance. Notons que des règles de combinaison modélisant ces comportements sont connues depuis Bernoulli. De manière générale, on peut considérer que si les sources sont dépendantes (au sens cognitif, ainsi que nous l'avons vu dans la section 4), l'idempotence peut être imposée, alors que si elles sont indépendantes, des effets de renforcement peuvent être souhaitables.

Dans le même ordre d'idées, la propriété de nilpotence sera imposée par exemple pour combiner des témoignages successifs, afin de modéliser la dégradation de l'information dans une chaîne de témoins qui ne sont pas complètement fiables. Par exemple pour certaines t-conormes, la satisfaction de cette propriété permet d'aboutir à un résultat égal à 1 en combinant un certain nombre de mesures non toutes nulles. Ce type de comportement peut être utile quand les informations résultent d'une longue chaîne de traitements.

Les propriétés du tiers exclu et de non contradiction, satisfaites pour certains opérateurs seulement, ont une interprétation reconnue en termes de raisonnement, dans le domaine de l'intelligence artificielle et du raisonnement approché. En fusion, on trouve des exemples où le tiers exclu n'est pas souhaitable dès que l'on a besoin d'introduire de l'ignorance sur un événement et son complémentaire, et donc de relâcher la contrainte d'exhaustivité faite par exemple en probabilités.

La généralisation de tout ce qui précède à la combinaison de plus de deux informations ne pose pas de difficulté particulière (on retrouve en particulier les mêmes types de comportement, avec des règles un peu plus compliquées pour les opérateurs ACV), sauf pour les opérateurs non associatifs. La question principale pour de tels opérateurs est de savoir dans quel ordre combiner les informations. Plusieurs situations peuvent se produire :

- dans certaines applications, chaque information doit être combinée aux autres dès qu'elle est disponible (par exemple pour pouvoir prendre des décisions partielles à partir des données présentes à chaque instant) : l'ordre est alors fixé par l'ordre d'arrivée des informations ;
- l'ordre peut être imposé par des priorités sur les informations à prendre en compte, et des opérateurs ont été conçus pour répondre à de tels besoins (par exemple pour combiner des requêtes dans des bases de données) ;
- dans les autres situations, il faudra trouver des critères pour trouver un ordre approprié à l'application, en particulier lorsque les informations sont conflictuelles, car les résultats peuvent être très différents selon que les informations consonantes ou conflictuelles sont combinées en premier.

Enfin, l'étude du comportement des opérateurs en termes de qualité de la décision à laquelle ils conduisent, et de réaction face aux situations conflictuelles conduit à un dernier critère de choix. Un point important toutefois concerne le pouvoir discriminant des opérateurs. Les opérateurs fortement conjonctifs ou fortement disjonctifs (la t-norme et la t-conorme de Lukasiewicz par exemple) saturent très vite à 0 ou à 1 et donc sont souvent peu discriminants. Par exemple, avec la t-conorme  $F(a, b) = \min(a + b, 1)$ , on a  $F(0.5, 0.5) = 1$ ,  $F(0.1, 0.9) = 1$ , ou encore  $F(0.8, 0.8) = 1$ , alors que ces trois situations ont des interprétations bien différentes.

La capacité des opérateurs à combiner des informations quantitatives (numériques) ou qualitatives (pour lesquels seul un ordre est connu) peut être également un critère de choix. Par exemple, le *min*, le *max* et tout filtre de rang sont intéressants à ce titre puisqu'ils peuvent combiner les deux types d'informations. En effet, le calcul de  $\min(x,$

y) par exemple ne nécessite que de connaître un ordre entre  $x$  et  $y$ , mais ne nécessite pas de connaître leur valeur numérique. Les opérations ordinales sont de plus imposées si on veut qu'elles soient invariantes par une transformation croissante des degrés d'appartenance [31].

## 5.4 Décision

La règle principalement utilisée en fusion floue est le maximum des degrés d'appartenance :

$$d_i \text{ si } \mu_i = \max\{\mu_k, 1 \leq k \leq n\} \quad (42)$$

où  $\mu_k$  désigne la fonction d'appartenance résultant de la combinaison.

La qualité de la décision est mesurée essentiellement selon deux critères:

- le premier porte sur la « netteté » de la décision : le degré d'appartenance maximum (ou plus généralement celui correspondant à la décision) est comparé à un seuil, choisi selon les applications (et éventuellement selon l'opérateur de combinaison choisi) ;
- le deuxième porte sur le caractère « discriminant » de la décision, évalué par comparaison des deux valeurs les plus fortes.

Dans le cas où ces critères ne sont pas vérifiés, l'élément sur lequel porte la décision est placé dans une classe de rejet, ou reclassifié en fonction d'autres critères, spatiaux par exemple en image.

## 6. Conclusion

En fusion numérique, les efforts des dernières années ont permis d'aboutir à une meilleure compréhension des différentes théories issues de domaines variés telles que les fonctions de croyance et le flou. On sait ainsi maintenant quels sont les bons cadres d'application de ces théories, leurs atouts et limites, représenter et modéliser l'information et les données numériques, symboliques ou structurelles dans chacun des formalismes, et effectuer leur combinaison.

De nombreux développements ont vu le jour, en particulier pour les applications typiques de classification d'images multi-sources et de reconnaissance de structures ou d'objets dans les images, de robotique, de combinaison d'opinions d'experts... Les points restant encore à développer concernent :

- la gestion du conflit, qu'il est souvent difficile de différencier de la complémentarité des sources, et pour lequel il n'est pas toujours facile de savoir s'il doit être résolu ou non ;

- la prise en compte de l'origine des données et des connaissances, ainsi que des relations entre les sources (souvent effectuée de manière supervisée, elle nécessite donc un peu d'expérience) ;
- le choix des algorithmes ;
- l'évaluation des méthodes, plus ou moins facile suivant que l'on a accès à la vérité ou non<sup>1</sup>.

Des travaux sur la combinaison de méthodes sont également prometteurs puisqu'ils visent à exploiter les avantages des différentes théories pour les faire coopérer. Cette combinaison peut s'appuyer sur les liens qui existent entre les différentes approches. Par exemple une probabilité peut être interprétée comme une fonction de masse particulière, une fonction de croyance dont les éléments focaux sont emboîtés peut s'interpréter comme une distribution de possibilités, une distribution de possibilités peut être interprétée comme des intervalles de confiance ou comme une famille de probabilités (voir par exemple [31] pour le détail des liens entre possibilités et probabilités), etc. Ainsi, des travaux ont déjà été effectués pour combiner l'imprécision représentée par des ensembles flous à l'incertitude probabiliste [13, 58,64], pour combiner des probabilités et des fonctions de croyance [5, 38], ou pour raisonner avec des fonctions de croyance dont les éléments focaux sont flous [81, 68, 74, 78].

## Références

- [1] Appriou A. Probabilités et incertitude en fusion de données multi-senseurs. *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, N° 11, pp. 27-40, 1991.
- [2] Appriou A. Formulation et traitement de l'incertain en analyse multi-senseurs. In *Quatorzième Colloque GRETSI*, pp 951-954, Juan les Pins, 1993.
- [3] Banon G. Distinction entre plusieurs sous-ensembles de mesures floues. In *Colloque International sur la Théorie des Ensembles Flous*, Marseille, France, 1978.
- [4] Barnett J. A. Computational Methods for a Mathematical Theory of Evidence. In *Proc. of 7th IJCAI*, pp 868-875, Vancouver, 1981.
- [5] Bendjebbour A. et W. Pieczynski. Segmentation d'images multisenseur par fusion évidentielle dans un contexte markovien. *Traitement du Signal*, 14(5), pp 453-464, 1997.

---

<sup>1</sup> Notons à ce propos que les essais de comparaison des approches numériques de fusion ont souvent donné des résultats contradictoires, et ont donc échoué. Nous pensons que la raison essentielle est que chaque problème s'exprime plus facilement dans une théorie que dans une autre, et que sa résolution par des outils non adaptés nécessite donc des distorsions de ces techniques et n'a pas beaucoup de sens.

- [6] Bezdek J.C. *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. Plenum, New-York, 1981.
- [7] Bloch I. Fondements des probabilités et des croyances : une discussion des travaux de Cox et smets. *15ème Colloque GRETSI*, pp 909-912, Juan-les-Pins, France, Septembre 1995.
- [8] Bloch I. Information Combination Operators for Data Fusion: A Comparative Review with Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 26(1), pp 52-67, 1996.
- [9] Bloch I. Some Aspects of Dempster-Shafer Evidence Theory for Classification of Multi-Modality Medical Images Taking Partial Volume Effect into Account. *Pattern Recognition Letters*, 17(8), pp 905-919, 1996.
- [10] Bloch I. Using Fuzzy Mathematical Morphology in the Dempster-Shafer Framework for Image Fusion under Imprecision. In *IFSA '97*, pp 209-214, Prague, June 1997.
- [11] Bloch I. Aurdal, D. Bijno, et J. Müller. Estimation of Class Membership Functions for Grey-Level Based Image Fusion. In *ICIP'97*, volume III, pp 268-271, Santa Barbara, CA, October 1997.
- [12] Bloch I. et H. Maître. Fusion d'informations en traitement d'images: spécificités, modélisation et combinaison par des méthodes numériques. *Techniques de l'Ingénieur*, TE 5 230, pp 1-26, 2002.
- [13] Caillol H., A. Hillion, et W. Pieczynski. Fuzzy Random Fields and Unsupervised Image Segmentation. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 31(4), pp 801-810, 1993.
- [14] Chauvin S. *Evaluation des théories de la décision appliquées à la fusion de capteurs en imagerie satellitaire*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications et Université de Nantes, December 1995.
- [15] Cheng H. D. et J. R. Chen. Automatically Determine the Membership Function based on the Maximum Entropy Principle. In *2nd Annual Joint Conf. on Information Sciences*, pp 127-130, Wrightsville Beach, NC, 1995.
- [16] Civanlar M. R. et H. J. Trussel. Constructing Membership Functions using Statistical Data. *Fuzzy Sets and Systems*, 18, pp 1-13, 1986.
- [17] Cooke R. Uncertainty in Risk Assessment : A Probabilist's Manifesto. *Reliability in Engineering and Systems Safety*, 23, pp 277-283, 1988.
- [18] Cooke R. *Experts in Uncertainty*. Oxford University Press, Oxford, UK, 1991.
- [19] Cox R. T.. Probability, Frequency and Reasonable Expectation. *Journal of Physics*, 14(1), pp 115-137, 1946.
- [20] Delgado M. et S. Moral. On the Concept of Possibility-Probability Consistency. *Fuzzy Sets and Systems*, 21(3), pp 311-318, 1987.
- [21] Denoeux T. A k-nearest Neighbours Classification Rule based on Dempster-Shafer Theory. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 25(5), pp 804-813, 1995.
- [22] Deveughele S. et B. Dubuisson. Using Possibility Theory in Perception: An Application to Artificial Vision. In *Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pp 821-826, San Francisco, California, 1993.

- [23] Bharathi Devi B. et V. V. S. Sarma. Estimation of Fuzzy Memberships from Histograms. *Information Sciences*, 35, pp 43-59, 1985.
- [24] Dromigny-Badin A., S. Rossato, et Y. M. Zhu. Fusion de données radioscopiques et ultrasonores via la théorie de l'évidence. *Traitement du Signal*, 14(5), pp 147-160, 1997.
- [25] Dubois D. et H. Prade. *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*. Academic Press, New-York, 1980.
- [26] Dubois D. et H. Prade. Unfair Coins and Necessity Measures : Towards a Possibilistic Interpretation of Histograms. *Fuzzy Sets and Systems*, 10(1), pp 15-20, 1983.
- [27] Dubois D. et H. Prade. A Review of Fuzzy Set Aggregation Connectives. *Information Sciences*, 36, pp 85-121, 1985.
- [28] Dubois D. et H. Prade. *Possibility Theory*. Plenum Press, New-York, 1988.
- [29] Dubois D. et H. Prade. Representation and Combination of Uncertainty with Belief Functions and Possibility Measures. *Computational Intelligence*, 4, pp 244-264, 1988.
- [30] Dubois D. et H. Prade. Combination of Information in the Framework of Possibility Theory. In M. Al Abidi et al., editor, *Data Fusion in Robotics and Machine Intelligence*. Academic Press, 1992.
- [31] Dubois D., H. Prade, et R. Yager. Merging Fuzzy Information. In J.C. Bezdek, D. Dubois, and H. Prade, editors, *Handbook of Fuzzy Sets Series, Approximate Reasoning and Information Systems*, Chapter 6. Kluwer, 1999.
- [32] Duda R. et P. Hart. *Pattern Classification and Scene Analysis*. Wiley, New-York, 1973.
- [33] French S. Group Consensus Probability Distributions: A Critical Survey. In J. Bernardo et al., editor, *Bayesian Statistics*, pp 183-201. Elsevier, 1985.
- [34] Ganster H. et A. Pinz. Active Fusion using Dempster-Shafer Theory of Evidence. In A. Pinz, editor, *Proceedings of 20th OAGM / AAPR Workshop*, Schriftenreihe der OCG. Oldenbourg, 1996.
- [35] Garvey T. D. Evidential Reasoning for Land-Use Classification. In *Analytical Methods in Remote Sensing for Geographic Information Systems, International Association of Pattern Recognition, Technical Committee 7 Workshop*, Paris, October 1986.
- [36] Grabisch M. Fuzzy Integral in Multicriteria Decision Making. *Fuzzy Sets and Systems*, 69, pp 279-298, 1995.
- [37] Grandin J.-F. et M. Marques. Robust Data Fusion. In *Fusion 2000*, pp MoC3-1-9, Paris, France, 2000.
- [38] Le Hégarat-Masclé S., I. Bloch, and D. Vidai-Madjar. Introduction of Neighborhood Information in Evidenve Theory and Application to Data Fusion of Radar and Optical Images with Partial Cloud Cover. *Pattern Recognition*, 31(11), pp 1811-1823, 1998.
- [39] Kaufmann A. *Introduction to the Theory of Fuzzy Subsets*. Academic Press, New-York, 1975.
- [40] Klir G. J. et T. A. Folger. *Fuzzy Sets, Uncerlainty, and Information*. Englewood Cliffs, 1988.

- [41] Klir G. J. et B. Parviz. Probability-Possibility Transformations: A Comparison. *Int. J. General Systems*, 21, pp 291-310,1992.
- [42] Krishnapuram R. et J. M. Keller. A Possibilistic Approach to Clustering. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1(2) :98-110, 1993.
- [43] Kullback S. *Information Theory and Statistics*. Wiley, New York, 1959.
- [44] T. Lee, J. A. Richards, et P. H. Swain. Probabilistic and Evidential Approaches for Multisource Data Analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-25(3), pp 283-293, 1987.
- [45] Lowrance J. D., T. M. Strat, L. P. Wesley, T. D. Garvey, E. H. Ruspini, et D. E. Wilkins. The Theory, Implementation and Practice of Evidential Reasoning. SRI project 5701 final report, SRI, Palo Alto, June 1991.
- [46] De Luca A. et S. Termini. A Definition of Non-Probabilistic Entropy in the Setting of Fuzzy Set Theory. *Information and Control*, 20, pp 301-312, 1972.
- [47] Luo R. C. ET M. G. Kay. Multisensor Integration and Fusion in Intelligent Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 19(5), pp 901-931, 1989.
- [48] Maître H. Entropie, information (et image), Partie 1.Rapport technique 93DO09, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, France, 1993.
- [49] Maître H. Entropie, information et image, Partie II. Rapport technique 94DO06, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, France, 1994.
- [50] Mascle S., I. Bloch, and D. Vidai-Madjar. Application of Dempster-Shafer Evidence Theory to Unsupervised Classification in Multisource Remote Sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(4), pp 1018-1031, 1997.
- [51] Matheron G. La théorie des variables régionalisées et ses applications. Rapport technique 5, Ecole des Mines de Paris, Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 1970.
- [52] Ménard M., E. H. Zahzah, et A. Shahin. Mass Function Assessment : Case of Multiple Hypotheses for the Evidential Approach. In *Europto Conf. on Image and Signal Processing for Remote Sensing*, Italy, September 1996.
- [53] Menger K. Statistical Metrics. *Proc. National Academy of Sciences USA*, 28 pp 535-537, 1942.
- [54] Milisavljevic N. et I. Bloch. A Two-Level Approach for Modeling and Fusion of Humanitarian Mine Detection Sensors within the Belief Function Framework. In *Applied Stochastic Models and Data Analysis*, volume 2, pp 743-748, Compiègne, France, juin 2001.
- [55] Milisavljevic N., I. Bloch, et M. Acheroy. Characterization of Mine Detection Sensors in Terms of Belief Functions and their Fusion, First Results. In *3rd International Conference on Informatin Fusion –Fusion 2000*, volume II, pp ThC3 15-22, Paris, France, jul 2000.
- [56] Pearl J. Fusion, Propagation, and Structuring in Belief Networks. *Artificial Intelligence*, 29, pp 241-288, 1986.
- [57] Pearl J. On Evidential Reasoning in a Hierarchy of Hypotheses. *Artificial Intelligence*, 28, pp 9-15, 1986.
- [58] Pieczynski W. et J.M. Cahen. Champs de Markov cachés flous et segmentation d'images. *Rev. Statistique Appliquée*, XLII(3), pp 13-31, 1994.

- [59] Pinz A., et M. Prantl. Active Fusion for Remote Sensing Image Understanding. In *European Symposium on Satellite Remote Sensing, Paris*, volume 2579, pp 67-77. EOS/SPIE, 1995.
- [60] Quinio P. Representation and Accumulation of Uncertain Informations: A Theoretical Comparison of Probabilistic and Borne Non-Probabilistic Formalisms. Technical report, Ito Lab., Tohoku University, 1989.
- [61] Quinio P et T. Matsuyama. Random Closed Sets: A Unified Approach to the Representation of Imprecision and Uncertainty. In R. Kruse and P. Siegel, editors, *Symbolic and Quantitative Approaches to Uncertainty, ECSQARU*, pp 282-286, Marseille,. 1991. Springer Verlag.
- [62] Rasoulian H., W. E. Thompson, L. F. Kazda, and R. Parra-Loera. Application of the Mathematical Theory of Evidence to the Image Cueing and Image Segmentation Problem. In *SPIE Signal and Image Processing Systems Performance Evaluation*, volume 1310, pp 199-206, 1990.
- [63] Rombaut M. Fusion de données images segmentées à l'aide du formalisme de Dempster-Shafer. In *GRETSI '99*, pp 655-658, Vannes, France, 1999.
- [64] Salzenstein F. et W. Pieczynski. Unsupervised Bayesian Segmentation using Hidden Fuzzy Markov Fields. In *IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Detroit, Michigan, 1995.
- [65] J. Schubert. On Nonspecific Evidence. *International Journal of Intelligent Systems*, 8, pp 711-725, 1993.
- [66] Schweizer B. et A. Sklar. *Probabilistic Metric Spaces*. North Holland, Amsterdam, 1983.
- [67] Shafer G. *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press, 1976.
- [68] Smets P. The Degree of Belief in a Fuzzy Event. *Information Sciences*, 25, pp 1-19, 1981.
- [69] Smets P. The Combination of Evidence In the Transferable Belief Model. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(5), pp 447-458, 1990.
- [70] Smets P. Constructing the Pignistic Probability Function in a Context of Uncertainty. *Uncertainty in Artificial Intelligence*, 5, pp 29-39, 1990.
- [71] Smets P. Belief Functions : The Disjunctive Rule of Combination and the Generalized Bayesian Theorem. *International Journal of Approximate Reasoning*, 9, pp 1-35, 1993.
- [72] Tupin F., I. Bloch, et H. Maître. A First Step Towards Automatic Interpretation of SAR Images using Evidential Fusion of Several Structure Detectors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3), pp 1327-1343, 1999.
- [73] Van Cleynenbreugel J., S. A. Osinga, F. Fierens, P. Suetens, et A. OOSTERLINCK. Road Extraction from Multi-temporal Satellite Images by an Evidential Reasoning Approach. *Pattern Recognition Letters*, 12, pp 371-380, 1991.
- [74] Yager R. R. Generalized Probabilities of the Degree of Fuzzy Events from Fuzzy Belief Structures. *Information Sciences*, 28, pp 45-62, 1982.
- [75] Yager R. R. On the Dempster-Shafer Framework and New Combination Rules. *Information Science*, 41, pp 93-137, 1987.

- [76] Yager R. R. On Ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multi-Criteria Decision Making. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 18(1), pp 83-190, 1988.
- [77] Yager R. R. Connectives and Quantifiers in Fuzzy Sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 40, pp 39-75, 1991.
- [78] Yen J. Generalizing the Dempster-Shafer Theory to Fuzzy Sets. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 20(3), pp 559-569, 1990.
- [79] Zadeh L. A.. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8, pp 338-353, 1965.
- [80] ] Zadeh L. Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1, pp 3-28, 1978.
- [81] ] Zadeh L. A Theory of Approximate Reasoning. *Machine Intelligence*, 9, pp 149-194, 1979.
- [82] Zahzah E. *Contribution à la représentation des connaissances et à leur utilisation pour l'interprétation automatique des images satellites*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1992.

---

# Estimation multisource des temps de parcours : panorama et premiers résultats

**Nour-Eddin El Faouzi**

*Laboratoire d'Ingénierie Circulation-Transports (LICIT)*

*INRETS-ENTPE*

*25, avenue François Mitterrand*

*69675 Bron Cedex.*

*[nour-eddin.elfaouzi@inrets.fr](mailto:nour-eddin.elfaouzi@inrets.fr)*

---

## **Résumé**

*Les travaux menés dans le cadre de la fusion de données pour les temps de parcours ont été abordés à trois niveaux complémentaires :*

- a. A un niveau simple, la fusion consiste à utiliser des données des TP issus de véhicules traceurs pour la réalisation de l'identification en ligne ou tout au moins de mise à jour des paramètres structuraux des algorithmes d'estimation des TP.*
- b. A un niveau intermédiaire, chaque source en présence fournit un estimateur du TP et le problème revient alors à élaborer des schémas permettant la combinaison de ces estimateurs.*
- c. Au niveau le plus complet, consiste à fusionner les données issues de chacune des sources. Cette fusion, dite fusion de données, permet de gérer une multitude d'informations, complémentaires et redondantes, issues de sources hétérogènes, afin d'obtenir la meilleure estimation des TP.*

*La mise en œuvre opérationnelle de ces différents schémas de fusion a montré que la fusion surclasse, dans chacun des cas, les méthodes fondées sur une seule source d'information et que l'amélioration de la qualité de l'estimation est d'autant plus importante que le niveau de précision exigée de l'estimation augmente.*

---

# 1. Introduction

L'émergence de nouvelles technologies de l'information et la mutation qu'a connue l'exploitation routière n'ont fait qu'accentuer le besoin fort des usagers en information routière. Le temps de parcours constitue un élément clef de cette information, comme le montrent les différents systèmes fondés sur la diffusion du temps de parcours. Dans ce contexte, cet indicateur est associé à la notion d'impédance (ou coûts) liée aux itinéraires du réseau ou/et à un indicateur de congestion. Se pose alors la question d'une estimation du temps de parcours avec une précision acceptable, problème particulièrement ardu en milieu urbain où l'on doit faire face à un certain nombre de difficultés théoriques, techniques et méthodologiques.

Ainsi, pour connaître l'état du trafic sur un axe urbain, les capteurs classiques utilisés pour mesurer les conditions de circulation s'avèrent inefficaces dans certaines circonstances. Du fait de l'apparition de nouveaux moyens de mesure (caméras, recueil multiforme, véhicules traceurs ...), on recourt de plus en plus à d'autres sources de données visant à compléter l'information fournie par les moyens de mesure classiques et par conséquent à améliorer la qualité de l'estimation du temps de parcours. Le problème de l'estimation du temps de parcours devient alors un problème typique de fusion de données. Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une estimation multi-sources du temps de parcours et a pour objectif de fournir un cadre d'ensemble à l'utilisation d'informations multiples et de démontrer la faisabilité d'un système d'estimation des temps de parcours fondé sur la fusion de plusieurs types de données.

Notons que dans le cadre de la modélisation du trafic et plus particulièrement en ingénierie du trafic, il existe peu de travaux dans lesquels ce problème de fusion a été abordé même ci dans certains, la fusion est identifiée comme un module à développer (cf. [7, 10, 24]).

# 2. Contexte opérationnel

Le domaine des transports et plus singulièrement la circulation routière est l'objet d'innovations constantes, tant sur le plan de la conception de modèles que sur le plan technologique. C'est ainsi que les moyens de recueil de données du trafic ont bénéficié de ce dynamisme favorisant l'amélioration des moyens techniques existants et parfois l'apparition de nouveaux capteurs ou de nouvelles architectures (cf [11]). Cependant, dans le cas du temps de parcours, un système de recueil de données, aussi perfectionné soit-il, ne peut à lui seul fournir des temps de parcours à l'échelle d'un réseau et l'on s'oriente vers la coexistence de systèmes hétérogènes de mesure, qui peuvent être complémentaires et parfois redondants.

En effet, si l'on considère un réseau de capteurs au sol, compte tenu de sa couverture spatiale limitée d'une part, de sa résolution d'autre part, les données fournies par ce réseau de capteurs ne suffisent pas toujours au déploiement de technologies de calcul des temps de parcours basées sur ces données. Par contre, il existe une complémentarité entre ces données et celles mesurées par des véhicules traceurs. Cette collecte est de plus en plus accessible, notamment avec le développement récent de l'usage de la téléphonie mobile et plus généralement celui des réseaux UMTS (cf. [30]).

Ainsi, les données fournies par des capteurs au sol sont des mesures quasi exhaustives, c'est-à-dire couvrant l'ensemble des véhicules ayant empruntés le tronçon, avec un échantillonnage et une résolution temporelle excellentes. Cependant, ces mesures sont très imprécises (principalement le taux d'occupation qui est très bruité...) avec un échantillonnage spatial qui dépend de la densité et de l'emplacement des capteurs. En effet, ces mesures ne représentent l'état du trafic qu'à l'endroit où le capteur est placé et non sur l'ensemble du tronçon.

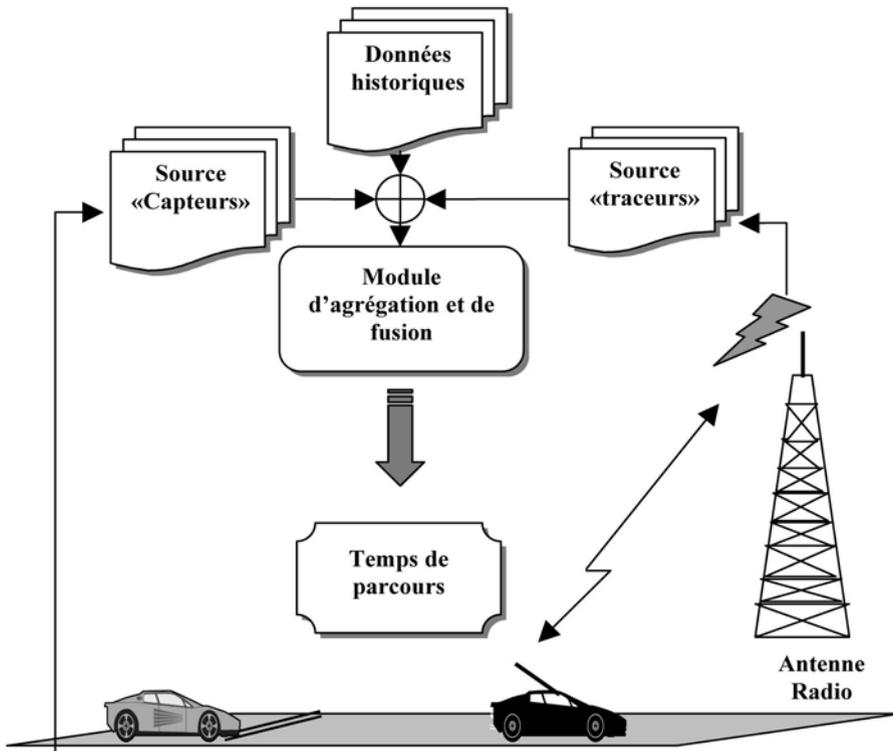
À l'inverse, les données fournies par des véhicules munis de capteurs embarqués (véhicules traceurs), sont quant à elles, des mesures très précises avec une excellente couverture spatiale. Elles expriment l'état du trafic sur l'ensemble du tronçon. Cependant, elles sont non exhaustives, car ne couvrant qu'une partie de véhicules ayant emprunté le réseau pendant une période temporelle donnée.

Dans cette étude, les données utilisées ont été recueillies à l'issue d'une campagne de mesures qui a consisté en un recueil de données issues de trois sources (cf. figure 1) :

- **Source 1** : Données macroscopiques de trafic fournies par le des capteurs à boucles électromagnétiques (principalement le débit et le taux d'occupation).
- **Source 2** : Un échantillon des temps de parcours réalisés par des véhicules équipés de capteurs embarqués (véhicules traceurs).
- **Source 3** : Les temps de parcours recueillis sur le principe d'enquête minéralogique entre les entrées-sorties de l'axe étudié.

Dans un souci d'application opérationnelle, nous avons décidé de fusionner les informations issues des deux premières sources, nommées «capteurs» et «traceurs» respectivement alors que l'information sur les temps de parcours obtenue par enquêtes minéralogiques (la troisième source) est considérée comme la référence à reconstituer. En effet, dans un système de recueil de données de trafic opérationnel, seules les informations issues des deux premières sources peuvent être accessibles, puisque les données issues d'enquêtes minéralogiques ne peuvent l'être que par le biais de campagne de mesures relativement coûteuses.

Figure 1. Recueil et fusion de données pour l'estimation des temps de parcours.



Préalablement à toute fusion ou agrégation, les données capteurs ont été converties en temps de parcours via un algorithme de conversion proposé dans [5].

### 3. Techniques d'agrégation et de fusion explorées

Un grand nombre de méthodologies mathématiques a été proposé comme solution potentielle au problème de fusion de données multi-sources. Parmi les plus abouties, on peut citer les techniques d'agrégation d'estimateurs, la théorie des probabilités, principalement l'approche bayésienne et les réseaux du même nom, la théorie des crédibilités, la théorie des possibilités et ensembles flous et les méthodes d'agrégations multicritères.

Parallèlement à ces cadres mathématiques, d'autres techniques relevant de l'informatique avancée ont été utilisées. C'est le cas par exemple des réseaux

neuromimétiques<sup>1</sup> et de la cognition artificielle : intelligence artificielle, systèmes experts, systèmes hybrides, etc.

Dans le cas de données multi-sources, la fusion peut être abordée à trois niveaux complémentaires :

Dans les applications opérationnelles, on trouve deux paradigmes aux extrema du spectre des méthodes de fusion de données :

1. **fusion comme problème** : la fusion est spécifiée explicitement dans le problème à résoudre. C'est le cas par exemple d'applications dans lesquelles un réseau de capteurs de même type est notoirement insuffisant pour fournir toutes les informations nécessaires à la modélisation du système étudié : une solution multicapteurs s'impose alors naturellement.
2. **fusion comme solution** : dans ce cas, un nombre de solutions différentes du problème étudié existent déjà. Souvent, ces solutions peuvent être combinées pour former des solutions surclassant les solutions individuelles.

Le premier paradigme consiste à fusionner les données issues de chacune des sources. Ce type de fusion permet de gérer une multitude d'informations, complémentaires, redondantes,... issues de sources hétérogènes, afin d'obtenir la meilleure connaissance possible de la situation ou du système étudié. Cette fusion est certainement la plus intéressante car il permet l'exploitation au mieux la complémentarité et les redondances des sources. Cependant, cette synergie n'est possible que si l'on est capable d'évaluer finement la connaissance contenue dans chacune des sources de données.

Dans deuxième paradigme, la fusion peut être abordée à deux niveaux, correspondant à la disponibilité et à la temporalité des données au moment de la fusion. Le premier niveau constitue une fusion asymétrique dans laquelle les données de diverses sources ne sont pas disponibles simultanément (sources asynchrones conduisant à une incohérence des échantillonnages temporels). Le plus souvent, une des sources est considérée comme principale et les autres comme des sources d'appoint. Cette situation peut s'apparenter à une fusion temporelle. Dans le second niveau, chaque source en présence possède des traitements propres (méthodes, modèles) et délivrant sa propre solution au problème étudié. Il s'agit alors d'élaborer des schémas méthodologiques permettant la combinaison de divers estimateurs. Ce problème, connu sous le nom d'*agrégation d'estimateurs*, fait partie du problème général d'estimation distribué [23].

Dans la présente étude, deux cadres de modélisation ont été explorés. Il s'agit d'une part de techniques statistiques d'agrégation d'estimateurs et d'autre part, celui de la théorie des croyances, proposée par Dempster et Shafer, qui présente l'avantage de tenir

---

<sup>1</sup> Néologisme comprenant, entre autres, les systèmes de calcul et les modèles informatiques : neurones formels, algorithmes génétiques, etc.

compte à la fois de l'imprécision et de l'incertitude de l'information contenue dans les données.

### 3.1 Agrégation d'estimateurs

L'idée de combiner des modèles ou des estimateurs au lieu de la sélection d'un seul, obtenu par optimisation d'un critère, est une pratique bien connue en statistique et a engendré une abondante littérature depuis l'article précurseur de Bates et Granger en 1969 (cf. [3]). On trouve des applications d'une telle approche dans divers domaines comme par exemple la prévision météorologique [21] ; la prévision de la consommation électrique [27] ; dans des problèmes de macroéconomie [8]. Pour une revue exhaustive sur le domaine, on renvoie le lecteur intéressé à l'article de Granger [22].

Plus récemment, plusieurs contributions ont montré qu'en présence de plusieurs estimateurs ou modèles il est presque toujours souhaitable de les combiner au lieu d'en sélectionner un et un seul. On consultera à titre d'exemple [6, 29] dans le cas d'une seule source de données [15, 16, 18, 19] dans le cas de sources multiples.

Le problème générique se traduit par la présence de  $\ell$  modèles ou estimateurs  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_\ell$  d'un paramètre ou d'une fonction  $f$ . On supposera par ailleurs que chaque modèle ou estimateur  $k$  est construit sur la base d'un échantillon  $\{y^{(k)}, \mathbf{X}^{(k)}\}$  où  $y^{(k)}$  sont les réalisations de  $f$  (la réponse ou la sortie) et  $\mathbf{X}^{(k)}$  le vecteur des variables explicatives (vecteur des entrées). On notera par la suite  $\hat{f}_k = \varphi_k(\mathbf{X}^{(k)})$ .

Le problème que l'on se propose de résoudre consiste donc à construire un opérateur permettant de combiner les différents estimateurs disponibles pour améliorer les performances globales de l'estimation. Le résultat d'une telle opération sera un nouvel estimateur obtenu par combinaison des estimateurs multiples, dont la qualité (au sens de l'erreur d'estimation) est améliorée.

D'un point de vue probabiliste, si l'on note  $y = [y^{(1)}, y^{(2)}, \dots, y^{(\ell)}]'$ , le problème est équivalent à l'estimation de  $\mathbb{E}\langle y | \mathbf{X}^{(1)}, \mathbf{X}^{(2)}, \dots, \mathbf{X}^{(\ell)} \rangle$  sur la base de variables aléatoires  $\mathbb{E}\langle y | \mathcal{F} \rangle$  où  $\mathcal{F}$  est une  $\sigma$ -algèbre, non vide, générée à partir de l'ensemble  $\{\mathbf{X}^{(1)}, \mathbf{X}^{(2)}, \dots, \mathbf{X}^{(\ell)}\}$ .

Les techniques communément utilisées pour l'agrégation des estimateurs est la moyenne pondérée des estimateurs individuels. Les poids sont généralement fixés ou sont calculés par optimisation d'un critère, éventuellement sous contraintes. Les opérateurs de ce type se justifient si l'on considère les différentes sources comme une seule source aléatoire dont les informations à agréger en sont des réalisations.

Dans ce cas, l'estimateur agrégé est donné par une moyenne pondérée de la forme :

$$\pi = \sum_{k=1}^{\ell} w_k \hat{f}_k \tag{1}$$

Plusieurs stratégies sont potentiellement utilisables pour l'estimation des pondérations. La plupart d'entre elles se fondent sur l'emploi des heuristiques dont l'intérêt pratique se heurte à l'absence de justification théorique permettant d'évaluer leur degré de légitimité. Une des plus intéressantes est celle exploitant les propriétés statistiques des estimateurs individuelles, principalement la variance [14, 15, 16].

Lorsque tous les estimateurs ou modèles utilisés fournissent des estimations non-biaisées, afin de s'assurer que l'estimateur agrégé donné par (1) est lui aussi non-biaisé, on doit imposer une contrainte de normalisation aux pondérations.

$$\sum_{k=1}^{\ell} w_k = 1 \tag{2}$$

Ainsi, l'estimateur agrégé est formé par une combinaison convexe des estimateurs individuels. Dans ce cas, les pondérations optimales sont solutions du problème suivant :

$$\begin{cases} \min_w \left\| y - \sum_{k=1}^{\ell} w_k \hat{f}_k \right\|^2 \\ \sum_{k=1}^{\ell} w_k = 1 \end{cases} \tag{3}$$

avec  $\|x\| = \mathbb{E}\langle x \rangle$ .

La solution de ce problème est donnée par le vecteur suivant :

$$w^* = (\mathbb{I}_{\ell} \Omega^{-1} \mathbb{I}_{\ell}')^{-1} \mathbb{I}_{\ell}' \Omega^{-1} \tag{4}$$

où  $\mathbb{I}_{\ell}$  est le vecteur unité de dimension  $\ell$  et  $\Omega$  est la matrice de variance-covariance des résidus (erreurs des estimateurs individuels).

Si les résidus sont normalement distribués, l'estimateur résultant de l'équation (1) avec les pondérations données par (4) est optimal au sens de la variance minimale des erreurs parmi les estimateurs non-biaisés de  $f$ .

Le cas particulier intéressant est obtenu lorsque l'on suppose que les estimateurs  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{\ell}$  sont indépendants au sens statistique (et donc aucune corrélation entre eux). Dans ce cas, la matrice de variance-covariance est diagonale  $\Omega = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_{\ell}^2)$  où  $\sigma_k^2$  est la variance des erreurs du  $k^{\text{ème}}$  estimateur et l'équation (4) devient :

$$w_k^* = \sigma_k^{-2} / \sum_{j=1}^{\ell} \sigma_j^{-2} \quad ; \quad k = 1, \dots, \ell \tag{5}$$

En conséquence, dans le cas d'estimateurs indépendants, la pondération optimale affectée à chaque estimateur est proportionnelle à la fiabilité de ce dernier, quantifiée ici par l'inverse de la variance des erreurs.

Notons que, dans ce dernier cas et contrairement au cas général, toutes les pondérations sont positives ou nulles. En effet, on montre (cf. [16]) que lorsque les estimateurs sont corrélés positivement, les pondérations sont négatives. Ceci pose la question de l'interprétation de contributions négatives dans l'élaboration de l'estimateur synthétique  $\pi$ .

Afin de s'assurer de la positivité des pondérations, il convient de résoudre le problème (3) sous contraintes de positivité des poids, à savoir, on cherche les solutions du problème suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_w \left\| y - \sum_{k=1}^{\ell} w_k \hat{f}_k \right\|^2 \\ \sum_{k=1}^{\ell} w_k = 1 \quad \text{et} \quad w_k \geq 0 \end{array} \right. \quad (6)$$

Nous ne détaillerons pas ici les aspects algorithmiques et les difficultés pratiques de mise en œuvre de ces techniques. Nous renvoyons le lecteur intéressé aux références [17, 19, 20].

Les résultats de la mise en œuvre pratique de ces techniques dans le cadre des temps de parcours sont donnés par la figure 2.

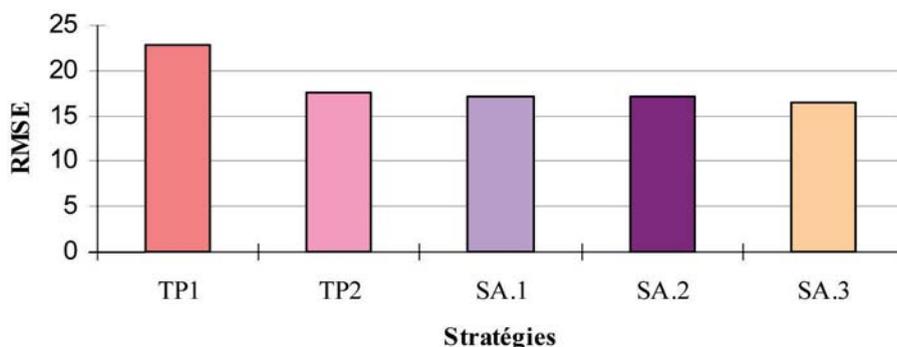
Dans cette application, chacune des deux premières sources (« capteurs » et « traceurs ») fournit un estimateur de temps de parcours ; ces deux estimateurs, notés TP1 et TP2, sont ensuite agrégés en utilisant les deux schémas exposés ci-dessus, à savoir :

- schéma d'agrégation de type variance minimum en distinguant le cas reposant sur l'hypothèse d'indépendance des estimateurs (SA.1) et le cas général (SA.2)
- schéma d'agrégation avec contraintes de positivité des pondérations (SA.3).

L'évaluation des performances des deux estimateurs repose sur une procédure apparentée à la validation croisée. Cette procédure consiste à estimer l'erreur d'estimation (erreur moyenne quadratique RMSE) avec un échantillon test.

Les résultats montrent la propension des estimateurs résultants de la fusion à l'amélioration de la qualité globale de l'estimation, puisque globalement on obtient de meilleures performances que les estimateurs individuels. L'amélioration est davantage marquée dans le cas de la stratégie SA.3.

Figure 2 : Performances des schémas d'agrégation d'estimateurs



Il est à noter que les résultats donnés par les stratégies (SA.1) et (SA.2), bien que comparables, montrent un léger avantage à l'agrégation supposant l'indépendance des deux estimateurs. On peut avancer deux explications possibles à ce fait : la première est la légitimité de l'hypothèse d'indépendance. Cette dernière peut être acceptée, en première approximation, lorsque les estimateurs proviennent de sources multiples. La seconde est la grande sensibilité des performances de la stratégie (SA.2) à la qualité d'estimation de la matrice de variances-covariances des erreurs  $\Omega$ .

### 3.2 Fusion de données

Initialement développée dans un cadre militaire, la fusion de données est de plus en plus utilisée dans une multitude d'applications issues de multiples domaines. A titre d'exemple, citons l'intelligence artificielle [1], la surveillance de systèmes complexes [2, 28] et le traitement d'images [4].

La fusion de données, terme générique d'un ensemble de techniques, peut être définie comme *un processus permettant de combiner au mieux un ensemble de données multi-sources, éventuellement hétérogènes, pour une information résultante de meilleure qualité*. Dans le cas d'une aide à la décision, cette dernière se doit d'être la meilleure possible compte tenu des informations disponibles. Les sens précis de « meilleure » et de « qualité » dépendront de l'application considérée.

Le but de la fusion de données est de gérer une multitude d'informations, complémentaires, redondantes et incomplètes, issues de sources hétérogènes afin d'obtenir la meilleure connaissance possible de l'environnement décisionnel étudié. Cette synergie n'est possible que si l'on parvient à évaluer la connaissance ou l'information contenue au sein de chacune des sources de données.

Dans un processus de fusion, quatre phases principales s'enchaînent successivement. Chacune correspond à un ou plusieurs traitements des données à fusionner [17].

- *Représentation homogène avec recalage des informations pertinentes* : cette étape, consiste à rechercher un espace de représentation commun, dans lequel les différentes données à fusionner renseignent sur une même entité. La fusion s'effectuera dans cet espace commun.
- *Modélisation des connaissances* : cette seconde étape essentielle au processus de fusion, consiste à modéliser et à évaluer la connaissance apportée par chaque source. Elle est couplée au choix d'un cadre théorique adapté.
- *Fusion* : c'est à ce niveau du processus que l'opération de fusion proprement dite est réalisée. Les informations recalées et modélisées sont combinées selon un opérateur propre au cadre théorique retenu.
- *Décision par choix d'une stratégie* : la fusion doit permettre de choisir l'information la plus vraisemblable, au sens d'un certain critère, parmi toutes les alternatives possibles. En ce sens, la fusion de données aboutit bien souvent à une classification. Le critère de décision dépend du cadre théorique et de l'objectif visé.

La difficulté majeure de la fusion de données consiste à modéliser et évaluer la connaissance apportée par chaque source, afin de tirer le meilleur parti des informations disponibles. En fusionnant des données de sources hétérogènes, nous souhaitons obtenir une information améliorée sur l'état d'un système, c'est-à-dire moins imparfaite que chacune des informations issue des sources multiples. Cette notion d'imperfection s'exprime sous la forme de l'incomplétude des données (données non observables, données manquantes,...) et de deux notions : l'incertitude et l'imprécision<sup>1</sup>.

Le formalisme théorique exploré dans le cadre de cette partie est la théorie des croyances, dite aussi théorie de l'évidence ou théorie des crédibilités, et introduite par Dempster en 1967 (cf. [12]) et étendue par Shafer en 1976 (cf. [25]). Cette théorie est considérée comme une extension de la théorie des probabilités aux situations d'ignorance [13].

Dans cette théorie, on représente les caractéristiques ou les états du système étudié sous forme d'un ensemble fini de propositions ou d'hypothèses *mutuellement exclusives*, appelé *cadre de discernement*  $\mathfrak{X} = \{u_1, u_2, \dots, u_r\}$ ,  $r \geq 1$ . On suppose que  $\mathfrak{X}$  est exhaustif de telle sorte que la vérité se trouve obligatoirement dans  $\mathfrak{X}$  (principe du monde fermé).

On définit sur l'ensemble des parties de  $\mathfrak{X}$ , noté  $\mathfrak{P}(\mathfrak{X})$ , une mesure de croyance notée  $m$  et appelée *masse de croyance*. Cette mesure associée à chaque  $A \in \mathfrak{P}(\mathfrak{X})$ ,  $m(A) \in [0;1]$  avec  $m(\emptyset) \neq 0$  et  $\sum_{A \in \mathfrak{P}(\mathfrak{X})} m(A) = 1$ , représente la croyance associée à la

---

<sup>1</sup> Une donnée incertaine fournit une information dont on n'est pas sûr qu'elle soit vraie, alors qu'une donnée imprécise fournit une information vague. Ainsi, une donnée incertaine peut être précise et inversement.

réalisation de  $A$  sans pour autant être capable de partager sa valeur sur les éléments de  $\mathfrak{X}$  formant  $A$ . Les éléments  $A \in \mathfrak{P}(\mathfrak{X})$  dont  $m(A) \neq 0$  sont appelés *éléments focaux*.

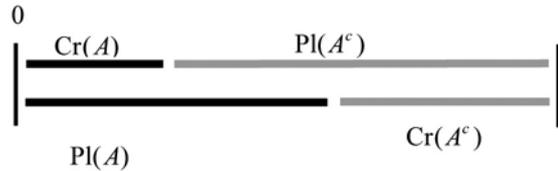
La principale caractéristique qui différencie cette théorie du cadre probabiliste classique est sa capacité d'affecter une masse (probabilité) non seulement à chaque hypothèse simple (élément de  $\mathfrak{X}$ ), mais également à des réunions d'hypothèses (hypothèses composées), sans faire appel aux axiomes de probabilités. C'est là que réside tout l'intérêt de cette théorie par rapport au cadre bayésien.

Deux autres mesures sont associées à chaque  $A \in \mathfrak{P}(\mathfrak{X})$  : la *crédibilité* et la *plausibilité*. Si  $A^c$  désigne le complémentaire de  $A$  dans  $\mathfrak{X}$ , elles sont définies respectivement par :

$$\text{Cr}(A) = \sum_{B: B \subset A} m(B) \quad (7)$$

$$\text{Pl}(A) = \sum_{B: B \cap A \neq \emptyset} m(B) = 1 - \text{Cr}(A^c) \quad (8)$$

Figure 3. Crédibilité et plausibilité dans le cadre de la théorie des croyances.



Lorsque tous les éléments focaux sont des singletons (éléments de  $\mathfrak{X}$ ), ces deux fonctions coïncident et sont égales à la masse, *i.e.*  $\text{Cr}(A) = \text{Pl}(A) = m(A)$ . On retrouve ainsi le cadre bayésien classique. Autrement, on a les inégalités suivantes :

$$\text{Cr}(A) \leq m(A) \leq \text{Pl}(A) \quad (9)$$

Dans la situation de données et d'informations multisources, chaque source  $k ; k = 1, \dots, \ell$  fournit un vecteur de masse  $m_k ; k = 1, \dots, \ell$  qu'elle associe aux éléments  $A \in \mathfrak{P}(\mathfrak{X})$ . La fusion de données via la théorie de croyances revient à combiner ces vecteurs de masse  $m_k ; k = 1, \dots, \ell$  en utilisant la règle dite *orthogonale* de Dempster :

$$m(A) = (m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_\ell)(A) \propto \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_\ell = A} m_1(A_1) m_2(A_2) \dots m_\ell(A_\ell) \quad (10)$$

Si les éléments focaux  $A_1, A_2, \dots, A_\ell$  ont des intersections non vides, les deux expressions de part et d'autre du signe de proportionnalité  $\propto$  dans (10) sont égales. Dans le cas contraire, i.e.  $A_1, A_2, \dots, A_\ell$  sont mutuellement disjoints, il existe des conflits ou des contradictions entre sources, car  $m(\emptyset) \neq 0$ . La masse affectée à l'ensemble vide constitue une mesure de conflits entre sources et donne une indication sur l'exhaustivité du cadre de discernement  $\mathfrak{X}$ . Cette quantité est donnée par :

$$\kappa = \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_\ell = \emptyset} m_1(A_1)m_2(A_2) \cdots m_\ell(A_\ell) \quad (11)$$

Afin de préserver le principe de monde fermé, la masse associée à l'ensemble vide est ensuite répartie sur les éléments focaux non vides via la normalisation de la règle de Dempster (10) :

$$m(A) = (m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_\ell)(A) = \frac{1}{(1-\kappa)} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_\ell = A} m_1(A_1)m_2(A_2) \cdots m_\ell(A_\ell) \quad (12)$$

Une fois les masses combinées, la décision finale, i.e. l'alternative à retenir, est obtenue comme étant celle qui maximise la crédibilité (7), la plausibilité (8) ou la probabilité pignistique introduite par Smets [26]. Ce dernier critère consiste à répartir la masse placée sur chaque proposition composée sur les propositions élémentaires qui la composent. Elle est définie de la manière suivante :

$$P_G(A) = \sum_{\substack{A \subseteq B \\ B \in \mathfrak{P}(\mathfrak{X})}} \frac{m(B)}{\text{Card}(A)} \quad (13)$$

REMARQUE. — Dans les applications pratiques, la valeur de  $\kappa \in [0,1]$  définie par (11) permet de fournir la qualité de la combinaison. Ainsi, lorsque cette valeur est trop grande, l'utilisation de la règle de combinaison normalisée (12) est sujette à caution. De par le fort conflit entre les sources, on peut décider de ne pas combiner les informations des sources disponibles, sauf à disposer d'indications sur la fiabilité de ces dernières.

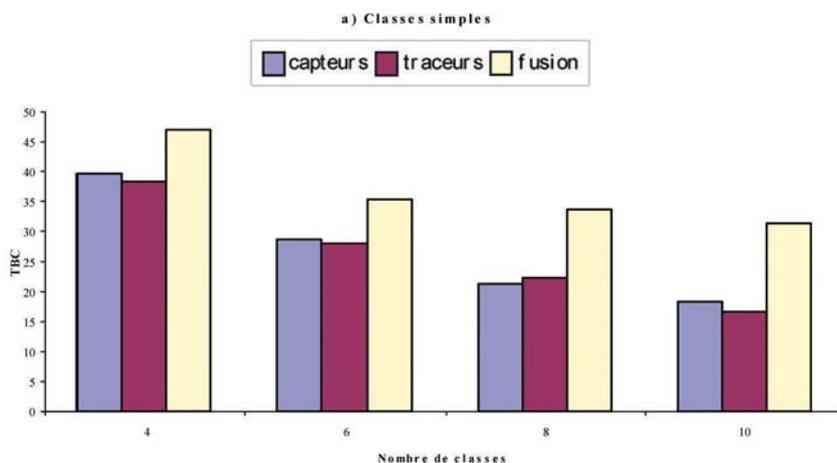
La reformulation de l'estimation du temps de parcours comme un problème de fusion pouvant être traité par la théorie des croyances impose une discrétisation des temps de parcours. Pour cela, nous avons procédé à un découpage préalable en classes de valeurs de temps de parcours. La définition du cadre de discernant est obtenu par découpage en  $K$  classes  $\mathfrak{X} = \{h_1, h_2, \dots, h_k\}$  des temps de parcours de référence.

Afin de tester les performances de la fusion selon le nombre de classes, nous l'avons fait varier en considérant  $K \in \{4, 6, 8, 10\}$ , i.e. en augmentant la précision requise pour l'estimation des temps de parcours.

La modélisation des connaissances, via les jeux de masses de croyance, est fondée sur l'apprentissage statistique. Plus précisément, elle repose sur l'exploitation des matrices de confusion associées aux deux sources disponibles et le critère de performance retenu est le taux de bien classés (TBC).

Lorsque l'on affecte des masses non nulles aux seules classes simples, ce qui revient à dire que l'on modélise l'incertitude mais non l'imprécision, la seule stratégie de décision consiste à choisir la classe de masse maximale. Les performances de la fusion sont synthétisées par le graphique suivant :

**Figure 4. Performances de la fusion dans le cas de classes simples  
– concordances strictes -**



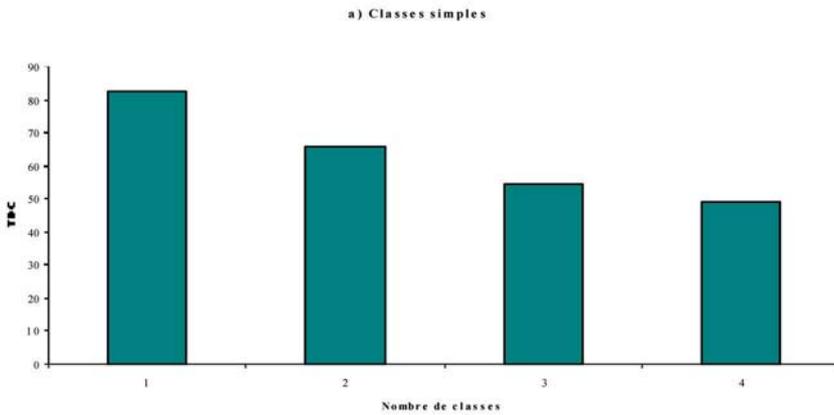
On constate clairement que la méthode de fusion proposée surclasse, dans chacun des cas, les méthodes d'estimation basées sur une seule source. L'amélioration de la qualité de l'estimation, en terme de taux de bien classés, varie de 6 % à 13,6 % et celle-ci est d'autant plus importante quand le nombre de classes augmente, c'est-à-dire lorsque le niveau de précision exigée de l'estimation augmente, même si globalement, le taux de bien classés diminue.

Les performances précédentes ont été calculées sur la base d'une concordance exacte ou stricte entre les classes reconstituées et les classes de référence. Si l'on relaxe cette concordance exacte en s'autorisant la confusion entre les classes adjacentes, *i.e.* une mesure de temps de parcours sera considérée comme bien classée si sa classe restituée coïncide avec sa classe de référence ou si elle correspond aux deux classes encadrant cette dernière), on obtient les résultats de la figure 5.

On observe alors une nette amélioration des taux de bien classés. Cette amélioration trouve son explication dans le fait que la plupart des erreurs de classement proviennent de la confusion des classes adjacentes. Ceci souligne une certaine sensibilité des performances de la méthode de fusion étudiée aux situations peu ou pas discernables. En effet, l'utilisation exclusive des classes élémentaires (simples) oblige à décider d'une classe et une seule du temps de parcours, en dernière phase du processus de fusion,

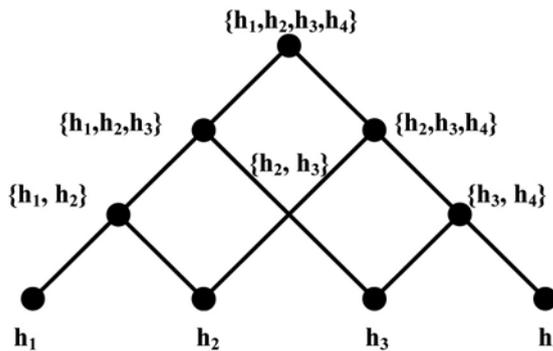
même si la réalisation de cette hypothèse est peu sûre (masse faible), ou même si elle n'est pas beaucoup plus sûre que celle d'un autre (masses de deux ou plusieurs hypothèses très proches)

**Figure 5. Performances de la fusion dans le cas de classes simples  
- concordances larges -**



Afin de pallier cette limitation on doit prendre en compte l'imprécision dans le processus de décision : les masses non nulles doivent être affectées non seulement aux seuls éléments de  $\mathcal{X}$  mais aussi à toute jonction de ces derniers. L'imprécision dont il est question peut provenir soit d'un manque d'information, soit lorsque l'on veut éviter le choix arbitraire entre deux classes de masses très proches. Ainsi, comme les classes  $\{h_1, h_2, \dots, h_k\}$  sont ordonnées, les seules unions que l'on s'autorise sont celles formées entre classes contiguës.

**Figure 6. Représentation du cadre de discernement contigu, composé de 4 classes.**



Connaissant les masses des classes simples, la masse associée à une classe composée (union de deux classes simples) est calculée par :

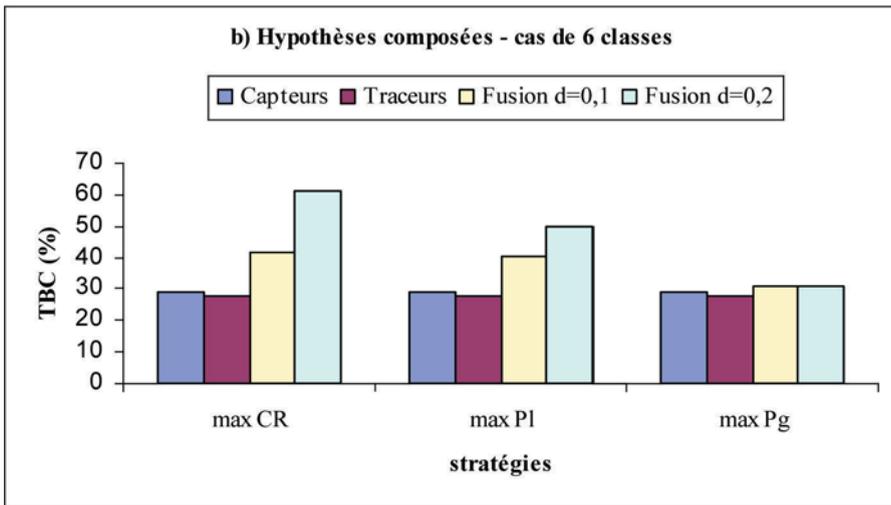
$$m(h_i \cup h_j) = \begin{cases} \max(m(h_i), m(h_j)) + \frac{1}{2}|m(h_i) - m(h_j)| & \text{si } |m(h_i) - m(h_j)| < d \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (14)$$

Ceci revient à dire que l'on affecte une masse à une classe composée lorsque les deux classes la composant possèdent des masses très similaires (à  $d$  près). Ce qui sous-entend que dans cette situation, on n'a aucune raison de choisir l'une ou l'autre du fait de la similitude des croyances que l'on a sur la véracité de chacune d'elles.

Nous donnons, ci-dessous, les résultats de la fusion uniquement dans le cas de six classes avec deux valeurs possibles du paramètre  $d=0,1$  et  $0,2$  et pour les trois stratégies de décision : maximum de crédibilité, maximum de plausibilité et maximum de probabilité pignistique.

Rappelons que les deux premières stratégies peuvent retenir des classes composées alors que la règle pignistique fournie, quant à elle, des classes simples. Dans les résultats ci-dessous, nous considérons que le résultat est correct dès lors que la classe obtenue par fusion intersecte la classe de référence.

Figure 7. Performances de la fusion dans le cas de classes contiguës



On remarque une fois encore que la fusion permet d'obtenir de meilleurs taux de bien classés. En comparaison avec le cas précédent, cas de classes simples, les taux de

bien classés sont meilleurs. De plus, les taux les meilleurs sont obtenus avec la crédibilité et la plausibilité.

Il est à noter que la contrepartie à ces bons résultats, c'est une perte de précision. En effet, retenir une classe composée revient à augmenter l'amplitude des classes finales ce qui revient à privilégier la certitude par rapport à la précision. C'est ainsi que les résultats de la figure 7 sont obtenus en retenant la plupart du temps des hypothèses composées : à 68 % pour la crédibilité et à 88 % pour la plausibilité.

Notons par ailleurs les résultats décevants obtenus avec la règle pignistique. Bien qu'elle ne retient que des classes simples dans sa phase de décision, les taux de bien classés obtenus sont inférieurs à ceux obtenus par la fusion sur les classes simples. Ce fait peut trouver son explication dans le principe même de cette règle qui procède à une réallocation uniforme des masses associées aux classes composées au bénéfice de classes simples les composant. Ceci induit un accroissement artificiel des masses associées aux classes simples aboutissant à des classifications erronées.

## 4. Conclusions et perspectives

Dans ce travail, nous avons abordé successivement le problème complexe de l'agrégation d'estimateurs et de données issus de sources multiples. Bien que cette étude ait porté sur une classe très restreinte de schéma d'agrégation d'estimateurs (schémas linéaires), elle a permis de donner quelques éléments de réponse au problème d'extraction de connaissances dans un contexte de données multiformes, issues de sources hétérogènes. Ces résultats indiquent la propension de ces schémas à améliorer la qualité de l'estimation. **Intuitivement, il est facile de voir que l'agrégation d'estimateurs peut améliorer la qualité de l'estimation lorsque les estimateurs individuels sont uniformément distribués autour de la vraie valeur.** Hormis cette situation, il est bien difficile d'avoir une réponse définitive quant à l'apport de l'agrégation. De plus, cette approche n'exploite pas les structures locales des estimateurs. En effet, certains estimateurs, bien que possédant des erreurs d'estimation importante, peuvent fournir de faibles erreurs dans certaines régions de l'espace. Dans ce cas, il convient alors d'adopter des schémas projectifs au lieu de schémas agrégatifs que nous avons présenté ici (cf. [19]).

Les techniques de fusion de données forment une alternative à la fusion d'estimateurs et plus particulièrement la théorie des crédibilités. L'utilisation de cette théorie pour traiter un problème de fusion de données exige une bonne connaissance du système étudié, car elle ne propose aucune méthodologie, ni pour constituer les hypothèses, ni pour modéliser les jeux de masses. Or ces deux étapes s'avèrent déterminantes pour le bon déroulement du processus de fusion. Ceci vient de son caractère très souple qui, paradoxalement, constitue en même temps un avantage non négligeable : tout problème de gestion d'informations issues de sources hétérogènes peut être abordé par cette théorie. Ce type de problème est aujourd'hui rencontré dans de nombreux domaines, et il serait sans doute intéressant de se pencher davantage sur

**l'élaboration d'un cadre méthodologique général de modélisation des jeux de masses basé par exemple sur les techniques de mélanges de lois.** Ceci constitue un axe de nos travaux de recherches actuels.

**Une autre direction de recherche s'attachera de développer d'une part, un cadre de modélisation capable d'opérer et la fusion des temps de parcours sans discrétisation préalable (fusion continue) et qui soit cohérent avec la théorie des croyances et d'autre part, d'explorer d'autres schémas de fusion adaptatifs prenant en compte le régime de trafic, l'origine des données utilisées, leur niveau de précision, etc...**

Parallèlement à ces travaux théoriques, les résultats encourageants des algorithmes développés, obtenus par une validation laboratoire, nécessitent d'être soumis à une validation terrain sur un site réel.

## Références

- [1] Abidi M. A. et Gonzalez R. C. (Eds.), *Data Fusion in Robotics and Machine Intelligence*, New York, Academic Press, 1992.
- [2] Barshalom Y. et W. D. Blair (Eds). *Multitarget Multisensor Tracking: Applications and Advances*, vol. III, Artech House, 2000.
- [3] Bates M. et Granger W. J. The combination of forecasts. *Operational Research Quarterly*, vol. 20, 1969, pp 451-468.
- [4] Bloch I. et Maître H. Fusion d'informations en traitement d'images : spécificités, modélisation et combinaison par des méthodes numériques. *Technique de l'ingénieur*, Vol. 5, n° 230, pp 1-26, 2002.
- [5] Bonvalet F. et Robin-Prevallee Y. Mise au point d'un indicateur permanent des conditions de circulation en Île-de-France. *T.E.C.*, n° 84-85, Septembre-décembre 1987.
- [6] Breiman L. Stacked regressions., *Machine Learning*, vol. 24(3), 1996, pp 49-64.
- [7] Ciccarelli A. et al. Innovative Traffic Data Collection: An Analysis of Potential Uses in Florida, *Florida DoT, Technical Memorandum*, n°1, December, 2001
- [8] Clemen T. et Guerard J. Econometric GNP forecasts: Incremental Information Relative to Naïve Extrapolation. *International Journal of Forecasting*, vol. 5,<sup>1</sup> 1989, pp 417-426.
- [9] Craven P. et Wahba G. Smoothing noisy data with spline function, *Numerische Mathematik*, vol. 31, 1979, pp 277-403.
- [10] Daily D., P. Harn et P.-J. Lin. ITS Data Fusion. *Washington State D.O.T-US. DoT & FHA*, Technical Report WA-RD 410.1, September 1996.
- [11] David Y. Capteurs et techniques de recueil : analyse prospective. In: *Recueil multiforme et fusion de données en circulation routière*, Actes INRETS N° 87 (présent volume), pp 13- 22.

- [12] Dempster A. P. Upper and lower probabilities induced by multivalued mapping, *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 38, 1967, pp 325-339.
- [13] Dempster A. P. A generalization of Bayesian inference. *J.R.S.S., B*, vol. 30, 1968, pp 205-247.
- [14] El Faouzi N.-E., Fusion linéaire d'estimateurs multiples. Rapport technique n° 265, septembre 1997, LICIT, INRETS-ENTPE.
- [15] El Faouzi N.-E. Heterogeneous data source fusion for impedance indicators, *IFAC Symposium on Transportation Systems*, Chania, Greece, Volume 3, pp 1375-1380, 1997.
- [16] El Faouzi N.-E., Combining Predictive Schemes in Short-Term Traffic Forecasting., *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Symposium on Transportation and Traffic theory (ISTTT)*, Jerusalem, 26-28 July 1999, A. Ceder (Ed.), Pergamon, Elsevier, pp 471-487.
- [17] El Faouzi N.-E., Fusion de données : Concepts et méthodes. Rapport technique n° 265, septembre 2000, LICIT, INRETS-ENTPE.
- [18] El Faouzi N.-E., Fusion de données pour l'estimation des temps de parcours via la théorie de l'évidence. *Revue Transport Sécurité*, n° 68, 2000, pp 15-30.
- [19] El Faouzi N.-E., Aggregative and projective schemes for decentralized estimation problems. Note technique 2003, LICIT, INRETS-ENTPE.
- [20] El Faouzi N.-E. Fusion numérique d'informations multi-sources et extraction de connaissances : Application à l'ingénierie du trafic. XXXV<sup>èmes</sup> *Journées de Statistiques*, à paraître dans sa version longue dans un numéro spécial d'une revue disciplinaire, 2003.
- [21] Fraedrich K. et Leslie M. Real-times short-term forecasting of precipitation at an Australian tropical station. *Weather and Forecasting*, vol. 3, 1988, pp 104-114.
- [22] Granger W. J. Combining forecasts – twenty years later. *Journal of Forecasting*, vol. 8, 1989, pp 167-173.
- [23] Liggins M. E et al. Distributed fusion architectures and algorithms for target tracking. *Proceedings of IEEE, 1997, N° 83*, pp 95-107.
- [24] SUMNER R. Data Fusion in PathFinder and TravTek. *Proceedings of the Vehicle Navigation and Information Systems Conference:VNIS'91*, 1991, pp 71-75.
- [25] Shafer G. *Mathematical theory of Evidence*, Princeton, vol. 2702, Princeton University Press, 1976.
- [26] Smets Ph. Constructing the pignistic probability function in a context of uncertainty. *5<sup>th</sup> Workshop on Uncertainty in AI*, Canada, 1989, pp 319-326.
- [27] Smith D. Combination of forecasts in electricity demand prediction. *Int. Journal of Forecasting*, vol. 8, 1989, pp 349-356.
- [28] Waltz E. et Llinas J., *Multisensor Data fusion*, Artech House, Boston, 1990.
- [29] Wolpert D. H. Stacked Generalization. *Neural Networks*, n° 5, 1992, pp 241-259.
- [30] Ygnace J.-L. et al. Travel Time/Speed Estimates on the French Rhone Corridor Network Using Cellular Phones as Probes: STRIP Project. Final Report, *SERTI V*, December 2001.

---

# Une fusion d'algorithmes de détection automatique des incidents routiers

**Simon Cohen**

INRETS-GRETIA

2, avenue Général Malleret-Joinville

94114 Arcueil Cedex

[simon.cohen@inrets.fr](mailto:simon.cohen@inrets.fr)

---

## **Résumé**

*Cette communication aborde la question de la fusion des algorithmes de détection automatique des incidents. Elle repose sur un constat, issu d'expériences réelles, révélant la forte disparité des performances des techniques mises en œuvre sur les réseaux autoroutiers. Pour répondre aux exigences d'exploitation, le recours à une méthode intégrant les avantages de plusieurs techniques semble prometteur. Une méthode de fusion permettant de traiter plusieurs algorithmes à seuils – largement répandus dans les systèmes opérationnels – est proposée. Une validation expérimentale est ensuite étayée sur un cas concret en Île-de-France.*

---

## 1. L'importance de l'intégration

Les systèmes de détection automatique des incidents (DAI) jouent un rôle clef pour la surveillance du trafic. En situation opérationnelle, ces systèmes révèlent des gammes de performances très variables. De facteurs divers comme l'intensité du trafic, les conditions de visibilité, les caractéristiques géométriques ont un impact sur leurs performances. Chaque technologie de détection – radar, caméra vidéo, ou boucle magnétique par exemple – possède naturellement ses points forts tout comme ses limites d'utilisation.

En pratique, l'emploi de plusieurs approches peut s'avérer nécessaire afin d'assurer, de manière exhaustive et dans des conditions de coût et de fiabilité satisfaisantes, la surveillance du trafic sur l'ensemble d'un réseau. Dans ce cas, l'exploitant se trouve alors confronté une difficulté inédite : comment tirer simultanément parti de plusieurs méthodes pour traiter une même problématique de détection des incidents ?

Des éléments de réponse à cette interrogation sont esquissés dans cette communication qui illustre la problématique à travers un cas concret. L'exemple traité est celui de la fusion d'algorithmes de détection des incidents. Après un panorama soulignant la problématique de la détection des incidents, l'article se focalise sur le cas des algorithmes à seuils, encore largement répandus dans les systèmes opérationnels. Des tests expérimentaux réalisés sur une section d'autoroute francilienne soulignent les potentialités de la fusion algorithmique ainsi mise en œuvre.

## 2. L'évolution des technologies de DAI

Les méthodes traditionnelles de détection des incidents reposent sur un traitement des données issues des capteurs à boucles électromagnétiques. Ces capteurs équipent encore la quasi-totalité des systèmes d'exploitation actuels. Les incidents sont détectés par leurs conséquences sur les flux de circulation. Dans sa forme la plus simple, un algorithme de détection compare une fonction des données à un ou plusieurs seuils, judicieusement calibrés. Un incident est déclaré si – par exemple – la valeur de la fonction est supérieure à un seuil choisi. De nouvelles théories sont aujourd'hui explorées avec plus ou moins de succès pour améliorer les performances encore limitées des algorithmes de détection. Citons par exemple l'introduction de la théorie des catastrophes, des méthodes de filtrage neuronales, de réseaux de neurones [4]. Les performances de ces systèmes varient selon le niveau de circulation, la nature de l'algorithme, la qualité de la phase de calibrage,...

Depuis quelques années, des technologies nouvelles de détection ont fait leur apparition. Parmi elles, le capteur vidéo représente l'alternative opérationnelle la plus réussie. En règle générale, les systèmes vidéo détectent directement les incidents et identifient leur nature. Leur avantage principal réside dans un temps de détection particulièrement court, de quelques dizaines de secondes environ contre plusieurs minutes pour les systèmes à boucles. Ils permettent en outre de repérer des situations à risque : véhicules arrêtés sur bande d'arrêt d'urgence, obstacles quelconques sur les voies, contresens, ... Plusieurs dispositifs utilisant le traitement d'image en temps réel sont aujourd'hui disponibles et opérationnels. Ces systèmes se révèlent néanmoins sensibles aux conditions météorologiques, d'éclairage et de visibilité et à de multiples caractéristiques de positionnement des caméras.

Encore assez peu répandues, d'autres pistes technologiques font néanmoins l'objet de travaux de développement importants. Ainsi en est-il de systèmes de détection par capteurs à ultra-sons, par barrières laser, par radar Doppler ou encore par radar à synthèse d'ouverture (RSO) crédités de performances prometteuses.

Une évolution marquante de la télématique routière concerne le domaine des dispositifs embarqués. Les progrès des communications bi-directionnelles entre la route et le véhicule laissent entrevoir des modes de détection des incidents radicalement différents, par exemple par couplage d'informations embarquée avec des bornes de transmission ou encore par identification des véhicules et par usage du téléphone cellulaire [9].

### 3. Des performances variables

Les performances des systèmes de détection sont traditionnellement appréhendées à partir des trois critères :

- le taux de détection, défini par la fraction du nombre d'incidents détectés sur le nombre d'incidents effectifs ;
- le nombre de fausses alarmes par station de mesure et par unité de temps. Il y a fausse alarme lorsqu'à l'issue d'un test, le système diagnostique un incident qui ne s'est pas produit ;
- le délai moyen de détection.

Testées dans des conditions opérationnelles, les approches mentionnées révèlent une étonnante variabilité des performances. De multiples facteurs ont un impact sur la qualité de la détection. Ainsi en est-il des conditions telles que :

- l'intensité du trafic : en situation fluide, la détection par traitement d'images révèle des qualités remarquables. Sur des autoroutes de liaison, à trafic réduit, les taux de détection constatés dépassent souvent les 90 % pour 0.25 fausse alarme par caméra et par jour et un temps de détection de 15 s [3]. A l'inverse, les algorithmes de détection par boucles magnétiques apparaissent peu efficaces en fluidité. Une investigation approfondie réalisée récemment sur l'autoroute I4 en Floride souligne, à taux de fausses alarmes égal, une diminution du taux de détection passant de 75 % durant les heures de pointe à 50 % aux heures creuses [1].
- les conditions météorologiques, d'éclairage ou de visibilité : a priori peu influentes pour la détection par radar ou par boucle, elles peuvent dégrader notablement les potentialités des systèmes vidéo. Une expérimentation réalisée sur l'autoroute A43 près de Lyon a montré, par vent fort, une réduction du taux de détection de 84 à 70 % et un quasi-doublement du taux de fausses alarmes. Avec une pluie soutenue, le niveau de détection a chuté de 84 à 58 % tandis que le taux de fausses alarmes était multiplié par 6 [3].
- les caractéristiques géométriques des aménagements : la présence de certains points singuliers comme les rampes d'accès, les échangeurs autoroutiers ou les bretelles de sortie peut dégrader les performances habituellement observées sur les sections homogènes. Les observations faites sur l'autoroute I4 en Floride soulignent, à taux de fausses alarmes identiques, des taux de détection pratiquement réduits de moitié sur des sections en courbe et sur des rampes de sortie par rapport aux sections homogènes.

Pour faire face aux exigences de sécurité et de confort des usagers, le gestionnaire de réseau doit tenir compte de toutes ces situations et de la variété de ces modalités dans les actions de surveillance mises en œuvre.

### 4. Le calibrage optimal des algorithmes

Taux de détection et taux de fausses alarmes ne sont pas indépendants. Ainsi, plus le taux de détection d'un algorithme est élevé, plus le nombre de fausses alarmes croît.

Inversement, toute réduction du taux de fausses alarmes pénalise la qualité de la détection. En pratique, il faut donc pour un niveau de détection fixé, déterminer les seuils de l'algorithme conduisant à un taux de fausses alarmes minimal. Formellement, le problème revient, pour tout algorithme, à résoudre un programme d'optimisation sous contrainte du type suivant :

$$\min_{S} \{ TFA/TD > y \} \quad (1)$$

où TFA désigne le taux de fausses alarmes, TD le taux de détection, S l'ensemble des seuils de l'algorithme et y désigne un niveau de détection préalablement fixé (par exemple 80 %). La résolution numérique fournit les valeurs des seuils recherchés. Cette opération cruciale au niveau opérationnel porte le nom de calibrage. Commune à toutes les technologies, elle conditionne étroitement les performances de la méthode mise en œuvre en temps réel.

La fonction TFA, correspondant aux taux de fausses alarmes, n'est pas définie de manière analytique. Elle n'est déterminée que point par point, c'est-à-dire pour un algorithme donné et pour un vecteur de seuils fixé. Le programme mathématique représenté par la formulation (1) est donc non linéaire. La fonction objectif TFA étant quelconque, on ne peut appliquer des méthodes de résolution classiques, par exemple de type gradient ou gradient conjugué. On est alors limité à des approches comme les heuristiques « essai-erreur », la méthode de Box, le « recuit simulé rapide » ou l'optimisation génétique [7].

Quand le nombre de seuils de l'algorithme de DAI est élevé, c'est-à-dire en pratique supérieur à 2, la méthode « essais-erreur » s'avère nettement moins performante que les techniques génétiques ou de recuit simulé [5]. Ainsi par exemple, pour un algorithme de détection à 3 seuils et pour un taux de détection de 80 %, le taux de fausses alarmes minimisé sur une base de 177 incidents est de 2.4 % avec l'heuristique essai-erreur et de 1,3 % avec les 2 autres approches recuit simulé et optimisation génétique. Le gain est encore plus important avec 5 seuils à calibrer. Sur la même base de données et pour un niveau de détection de 85 %, on passe d'un taux de fausses alarmes de 3 % avec la méthode essai-erreur à seulement 0,8 % avec les deux autres [5]. Ces deux dernières méthodes s'avèrent donc, par expérience, les plus recommandables, dès lors que le nombre de seuils à calibrer est élevé, ce qui est bien le cas ici.

## 5. Des essais de fusion d'algorithmes

L'aspect de la fusion traité est celui de la combinaison d'algorithmes fonctionnant à partir des mêmes données fournies par les capteurs à boucles magnétiques. Un nouveau diagnostic est recherché en utilisant simultanément les différents sous-systèmes, reconnus pour leurs performances dans certaines configurations de fonctionnement. Le problème consiste alors à réaliser au mieux cette combinaison et ce, pour un large spectre de situations de trafic.

### 5.1 Un essai neuronal

Une première approche neuronale a été entreprise [2]. Le principe consistait à soumettre à un réseau de neurones les décisions de plusieurs algorithmes tout comme les

conditions d'environnement associées : taux d'occupation et débit mesurés à l'instant courant, en amont et en aval de chaque station de mesure. Les conclusions des divers tests entrepris n'esquissent aucune amélioration du système global par rapport au meilleur des sous-systèmes [2].

## 5.2 Une procédure de vote par veto

La combinaison est traitée pour des algorithmes de DAI indépendants à partir de la procédure suivante, conçue par Papageorgiou [10].

- a. On choisit un premier algorithme  $A_1$  avec un vecteur de seuils ( $p_1^*$ ) issu du calibrage optimal.
- b. On choisit un second algorithme  $A_2$ . On réalise un calibrage particulier de manière à assurer un niveau de détection  $\alpha$  égal à 100 % ou proche de 100 %, et ce quel que soit le niveau des fausses alarmes. On désigne par ( $p_2^\alpha$ ) le vecteur de paramètres associé.
- c. On choisit un troisième algorithme  $A_3$ . On réalise un calibrage particulier de manière à assurer un niveau de fausses alarmes  $\beta$  égal à 0 % ou proche de 0 %, et ce quel que soit le niveau de détection. On désigne par ( $p_3^\beta$ ) le paramétrage correspondant.

Munis de leur seuils respectifs, les algorithmes sont alors exécutés simultanément en temps réel. A chaque incrément de temps, chacun d'entre eux fournit une décision binaire  $d_i$  correspondant au codage 1 pour une décision d'incident et 0 pour une décision d'absence d'incident.

La fusion des 3 algorithmes s'opère alors à partir de la procédure de vote suivante :

- Si  $d_1 = 0$  et  $d_2 = 1$ , on adopte la décision globale  $d = 1$ . La décision du système résulte dans ce cas d'un veto imposé par l'algorithme  $A_2$ . Il s'agit de la détection par veto.
- Si  $d_1 = 1$  et  $d_3 = 0$ , alors  $d = 0$ . Le veto est imposé par  $A_3$  ; il s'agit de la non détection par veto.
- S'il n'y a pas de circonstance de veto, la décision du système est alors celle  $d_1$  de l'algorithme  $A_1$  muni de son paramétrage optimal ( $p_1^*$ ).

La procédure de vote par veto est actuellement en cours de test avec divers algorithmes.

## 5.3 Un couplage logique

La combinaison des algorithmes est maintenant traitée au niveau logique pour deux algorithmes de DAI indépendants. La majorité de ces algorithmes reposent sur des arbres de décision dans lesquels on réalise plusieurs tests successifs de plus en plus précis jusqu'à un test ultime déclarant « alarme » ou « pas d'alarme ». Dans la branche de ce test final, on insère alors la logique d'un deuxième algorithme. Cette fusion donne lieu

ainsi à un nouvel algorithme fournissant un diagnostic à partir de deux traitements. Nous la désignons sous le vocable de « couplage logique ». Cette programmation correspond à un « ET » logique entre les diagnostics de détection de chacun des algorithmes, codés 1 pour incident et 0 sinon. On réalise ainsi la fusion de deux techniques dont l'efficacité respective a été prouvée dans des situations identifiées. Il importe de souligner que le nouvel algorithme ainsi défini fait ensuite l'objet d'un calibrage optimal.

## 6. Une application sur un site francilien

### 6.1 Le calibrage

Le site d'analyse correspond au point de convergence de l'autoroute A6 à 3 voies sur une section à 2 voies du Boulevard Périphérique Intérieur de Paris. Des campagnes d'observations réalisées avec le concours des exploitants ont permis l'établissement d'une base de données comportant 22 incidents.

Tirant les conclusions d'investigations antérieures, on a choisi de tester, sur chaque site, les algorithmes de Payne à 5 seuils, McMaster à 5 seuils et le couplage logique associé à 10 seuils. Dans chaque cas, les performances comparatives s'apprécient au moyen des « courbes caractéristiques », croisant, pour un algorithme donné, son taux de fausses alarmes et son niveau de détection [Cohen, 1994c]. Cette courbe caractéristique est obtenue point par point en résolvant le programme [1] pour différentes valeurs du taux de détection. Pour une base d'incidents donnée, on détermine séparément par optimisation :

- les 5 seuils de l'algorithme #8 ;
- les 5 seuils de l'algorithme McMaster ;
- et les 10 seuils pour le couplage logique.

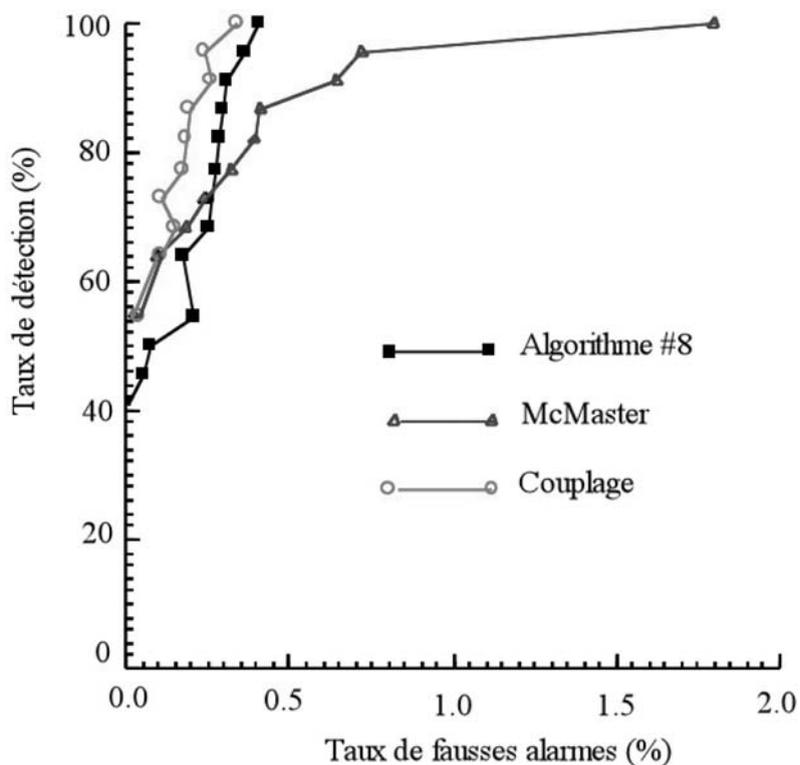
On est alors à même de comparer les 3 courbes caractéristiques ainsi obtenues.

En toute rigueur, lorsque la taille de la base de données incidents est suffisante, il convient d'effectuer le calibrage sur une partie des données de la base et de déduire les performances des algorithmes sur la fraction des données restantes (ou sur des données différentes inhérentes au même site). Dans le cas présent, le nombre limité d'incidents disponibles n'autorise pas un tel partage, pourtant souhaitable. Les comparaisons portent donc sur les courbes potentielles.

### 6.2 Les performances de la fusion par couplage

Les courbes caractéristiques des deux méthodes s'entrecroisent pour des niveaux de détection proches de 70 % comme le montre la figure 1. Chaque algorithme possède une plage de fonctionnement dans laquelle il se révèle meilleur que son concurrent.

Figure 1 : Courbes caractéristiques potentielles sur le convergent A6-BPI



L'apport du couplage devient particulièrement intéressant à des niveaux de détection élevés, supérieurs à 75 %.

Table 1 : Performances comparées des différents algorithmes

Performances	<i>TD (%)</i>	<i>TFA (%)</i>	<i>Total FA</i>	<i>FA/station/jour</i>
McMaster	86,30	0,41	69	5,9
Algorithme #8	86,30	0,3	50	4,3
Couplage	86,30	0,2	34	2,9

TD : Taux de détection.

TFA : Taux de fausses alarmes.

Ainsi, la Table 1 fournit les performances des différentes approches et quantifie la contribution du couplage pour un même niveau de détection de 86 %. On constate, sur l'exemple traité, que l'ensemble des seuils obtenus après optimisation du couplage correspond pour chaque algorithme, considéré individuellement, à un point qui n'est pas optimal.

Les 3 méthodes détectent toutes 19 incidents sur les 22 observés. Les taux de fausses alarmes correspondants sont de 0,41 % avec la méthode McMaster, de 0,3 % avec l'algorithme#8 et de 0,2 % avec le couplage logique. Le total des fausses alarmes porte sur une période d'observations de 11.725 jours. En nombre journalier de fausses alarmes, le résultat est alors éloquent : on passe en effet de 5.9 et 4.3 fausses alarmes par jour à moins de 3 fausses alarmes par jour sur ce site pourtant complexe et singulier. Ce niveau de performance laisse donc augurer de potentialités réelles de la fusion dès lors que des choix adaptés et des calibrages adéquats sont préalablement effectués.

## 7. Une perspective pour l'exploitation

**La fusion des données représente pour la gestion du trafic routier une voie d'investigation prometteuse..** L'exemple d'analyse traité dans cette communication consiste à fusionner les décisions de plusieurs algorithmes. Les résultats expérimentaux obtenus se révèlent encourageants. L'approche est aisée à mettre en œuvre et permet sous certaines conditions d'améliorer les performances des méthodes initiales considérées séparément. **Elle présente un intérêt pratique immédiat pour les systèmes opérationnels en exploitation. Elle permet, par exemple, d'envisager un fonctionnement pour un large spectre de situations de trafic par la fusion de méthodes adaptées à des configurations bien identifiées comme la fluidité ou la congestion. La fusion ainsi réalisée augmente les potentialités du système global de surveillance et tire parti des qualités inhérentes à chaque algorithme initial.**

Ces investigations ne constituent qu'un éclairage partiel du domaine complexe et prometteur de l'intégration des systèmes et des méthodes d'exploitation. Cette voie de recherche dessine les contours des futurs systèmes de gestion du trafic qui exploiteront tout particulièrement les informations issues de sources multiples.

## Références

- [1] Al-Deek H.M., Ishak S. et Khan A. A Impact of freeway geometric and incident characteristics on incident detection, *Journal of Transportation Engineering*, November-December, pp. 440-446, 1996.
- [2] Bettiol S. (1994) Intégration d'algorithmes de détection automatique des incidents, Rapport de stage ENPC-INRETS sous la direction de S. Cohen.
- [3] Blossville J.-M. et al. Results of the TRISTAR AID System Obtained form 3 Field Experimentation, 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Road Traffic Monitoring and Control, London, 1994.
- [4] Cohen S. Comparative assessment of conventional and new incident detection algorithms, *Road Traffic Monitoring and Control*, April 1994, Conference publication n° 391 IEE, pp. 156-159, 1994.

- [5] Cohen S. Optimisation methods for the calibration of automatic incident detection algorithms, Proceedings of the first ERASMUS Conference on Transportation and Traffic Engineering, Kerkrade, The Netherlands, 1994.
- [6] El Faouzi N.-E. Heterogeneous data source fusion for impedance indicators, IFAC Symposium on Transportation Systems, Chania, Greece, Volume 3, pp. 1375-1380, 1997.
- [7] Holland J. Les algorithmes génétiques, Revue Pour la Science n° 179, septembre 1992, pp. 44-51, 1992.
- [8] Hall F. L. et al. On-line testing of the McMaster incident detection algorithm under recurrent congestion, Transportation Research Record, n° 1394, 1993, pp. 1-7, 1993.
- [9] Ivan J.N. et Chen S.R. Incident detection using vehicle-based and fixed location surveillance, Journal of Transportation Engineering, May-June 1997, pp. 209-215, 1997.
- [10] Papageorgiou M. A veto procedure for improved fault detection performance, International Journal of Systems Science, London, UK (to be published).
- [11] Payne H.J. et al. Development and testing of incident detection algorithms, Vol. 2, 3 and 4, Report n° FHWA-RD 76-20, prepared for the Federal Highway Administration, Offices of Research and Development, Washington, DC, 1976.



---

# Applications de la fusion de données à la surveillance du trafic et à l'information des usagers

**Laurent Breheret**

*SODIT*

*2, avenue Edouard Belin*

*31400 Toulouse*

*[laurent.breheret@onecert.fr](mailto:laurent.breheret@onecert.fr)*

---

## **Résumé**

*Pour toutes les études de trafic, mais également pour les actions de surveillance ou de régulation de la circulation ainsi que pour mettre en place des systèmes d'information aux usagers, il est indispensable de connaître l'état du trafic sur l'ensemble du réseau routier. Or les données disponibles sur un réseau de voiries urbaines sont souvent très hétérogènes, car provenant de différents capteurs. De plus, le taux d'équipement en moyens de mesure est toujours trop insuffisant pour couvrir la globalité du réseau. Pour pallier ces difficultés nous montrons la nécessité de mettre en œuvre des méthodes de fusion de données pour la surveillance temps réel de la circulation sur un réseau routier ou urbain, et ainsi de connaître ou estimer la situation de trafic sur l'ensemble d'une agglomération.*

---

## **1.Introduction**

Pour toutes les études de trafic, mais également pour les actions de surveillance ou de régulation de la circulation ainsi que pour mettre en place des systèmes d'information aux usagers, il est indispensable de connaître l'état du trafic sur l'ensemble du réseau routier. Or les données disponibles sur un réseau de voiries urbaines sont souvent très hétérogènes, car provenant de différents capteurs.

De plus, le taux d'équipement en moyens de mesure est toujours trop insuffisant pour couvrir la globalité du réseau. C'est pour pallier ces difficultés qu'il est nécessaire de mettre en œuvre des méthodes de fusion de données qui permettent par exemple de réaliser une surveillance temps réel de la circulation sur un réseau routier ou urbain, et ainsi de connaître ou estimer la situation de trafic sur l'ensemble d'une agglomération.

La fusion de données consiste en un ensemble de fonctions, visant à :

- collecter des mesures de nature différente ou à des instants différents ;
- utiliser des modèles physiques ou statistiques pour établir des liens entre ces valeurs ;
- enrichir les données existantes par de nouvelles informations, qualitatives ou quantitatives ;
- enfin, transformer les valeurs obtenues plus ou moins abstraites, en données compréhensibles par les utilisateurs, telles que l'état de la circulation (code couleur), les temps de parcours, les taux de saturation,...

## 2. Les données utilisables

Sans revenir sur les moyens de mesure applicables au trafic, largement décrit dans le rapport [4], nous pouvons nous intéresser aux données mesurées. De manière classique, ces données peuvent être rangées en deux catégories : les données statiques et les données dynamiques.

On appellera « **données statiques** » l'ensemble des données qui sont recueillies à des intervalles relativement grands par rapport aux phénomènes de trafic, c'est à dire sur des intervalles au-delà de la semaine ou du mois. Ce sont par exemple la description topologique et fonctionnelle du réseau, matrices Origine/Destination (OD), les plans de circulation, les temps de parcours mesurés par véhicule flottant (tel que le système MI-TEMPS), les pourcentages directionnels et flux mesurés par enquêtes, les données historiques de comptages etc.

A contrario, on appellera « **données dynamiques** » celles qui sont mesurées à des intervalles courts (journaliers, horaires), voire en temps réel. Ce sont les informations relatives aux événements (planifiés ou *impromptus*), les mesures de débit, les taux d'occupation et les vitesses relevés par les capteurs en chaussée (type boucles électromagnétiques, les données vidéo si elles sont traitées numériquement, les mesures de temps de parcours de véhicules équipés, le suivi des mobiles etc.

Comme on le constate dans ces exemples, les bases de temps (ou périodes d'échantillonnages) pour ces données sont très différentes. De même, la nature de l'objet physique observé et donc la nature de la mesure sont très différentes (OD, temps de parcours, flux,...) d'une données à l'autre.

## 3. Les modèles applicables

La relation fondamentale du trafic est à la base de tout modèle macroscopique. Cette relation lie les trois variables élémentaires qui sont : le débit ( $q$ ), la vitesse du flux ( $v$ ) et la concentration des véhicules ( $k$ ), par la formule  $q = v.k$ . Cette formule permet de décrire l'écoulement de la circulation avec un modèle de flux.

Il existe également une série de modèles, largement décrits dans la littérature (cf. [3]) qui relie le taux d'occupation (et le débit  $q$ ). A titre d'exemple, on rappellera les modèles suivants :

- **Puissance généralisée** :  $q/\tau = a + b \cdot \tau^\alpha$ .
- **Exponentielle généralisée** :  $q/q/\tau = a \exp(-b \cdot \tau^\alpha)$ .

où  $a$ ,  $b$  et  $\alpha$  sont des paramètres réels.

De nombreuses études ont été réalisées pour développer une relation entre le temps de parcours (TP) et les variables de trafic ci-dessus. Une revue menée par Schettini ([5]) sur 8 modèles utilisant le taux d'occupation, le débit ou les deux, a permis d'estimer des taux d'erreur de l'ordre de 8 à 25 % selon les configurations, et surtout a démontré l'importance du calibrage des paramètres internes à ces modèles en fonction de chaque tronçon de route.

En ce qui concerne l'utilisation des matrices Origine-Destination, il faut garder à l'esprit l'obsolescence de ces données et l'interprétation qui peut en être faite. En effet, ces données proviennent pour l'essentiel d'enquêtes (ménages ou cordons) qui sont coûteuses et donc menées à des intervalles de temps très long (5 à 8 ans). Pour utiliser correctement ces données, il faudra en permanence les recalculer en fonction de l'évolution de l'urbanisme, du réseau routier, des modes de vie. Pour cela, il existe quelques outils logiciels dans le commerce (type modèle 4 étapes). On pourra aussi judicieusement utiliser des données récentes de comptages de véhicules pour un recalage itératif : affectation (correction).

Une méthode intéressante pour utiliser les informations d'une matrice O/D a été développée par l'université de Newcastle [1] qui est fondée sur la notion de flux élémentaires sur un trajet (Path Flow). La somme des flux élémentaires des trajets possibles entre une origine et une destination constitue la demande (OD) et la somme des flux élémentaires passant par un chaînon donné représente le débit observé sur ce chaînon.

L'utilisation de l'information O/D (par affectation de la matrice ou par estimation des flux élémentaires) présente le grand intérêt de permettre une estimation des variables de trafic sur des chaînons non équipés de capteurs.

Enfin des modèles spécifiques à l'utilisation de données provenant du suivi de téléphones mobiles ont été conçus et testés, en particulier dans le cadre du projet SERTI ou par De Lacvivier [4]. Ces modèles sont basés sur des traitements statistiques, et incluent beaucoup d'heuristiques !

Outre le fait que les données de suivi GSM sont forcément recueillies avec du retard (on a une mesure du temps parcouru et non du temps à parcourir), l'incertitude sur ces données est encore grande (lié à la précision de la localisation ou à l'anonymat de l'identification). Cette source de données semble prometteuse mais demande encore beaucoup de travaux d'investigation pour être pratiquement applicable.

## 4. Les étapes dans la fusion de données

On l'a vu, pour obtenir la « meilleure image » possible de la situation de trafic sur un réseau routier et alimenter un système de surveillance ou un service d'information en temps réel, il est nécessaire de passer par les étapes successives suivantes :

*Le recueil de données* : il est directement lié à la technologie de captation et au moyen de rapatriement de la donnée (entre autre le réseau de communication).

*La qualification des données* : La maîtrise de la disponibilité et de la qualité des données dynamiques dans la base de données locale est un problème important dans les systèmes de traitement de données du trafic. La qualification des données dynamiques précède les autres fonctions du système pour s'assurer que des données erronées ne sont pas utilisées dans les fonctions d'estimation et de prédiction des niveaux de circulation. En pratique, les problèmes proviennent soit d'un mauvais fonctionnement des postes de mesure, soit d'une erreur de transmission ou d'une situation de trafic incongrue (stationnement illicite d'un véhicule sur une boucle, travaux, voie fermée, etc.). A ce jour, peu de méthodes se sont intéressées à la mesure de la qualité des données de comptage du trafic. Les quelques techniques décrites dans la littérature, utilisent des algorithmes basés sur la vérification de la cohérence des mesures et proposent une méthode de correction en cas d'anomalie.

*La fonction de filtrage et d'estimation des états du trafic* : Deux types d'informations sont attendus à la fois par les exploitants des réseaux et les usagers de la route. Il s'agit de l'état courant de la circulation (temps de parcours et niveaux de saturation des chaînons composant le réseau) mais aussi des données sur les débits de véhicules, les longueurs de files d'attente et la vitesse. Les algorithmes de filtrage et d'estimation des états du trafic cherchent à déterminer des indicateurs du trafic non observables. Il s'agit, avant tout, du temps de parcours entre points importants du réseau. En effet, le temps de parcours est un indicateur assez révélateur de l'état de la circulation et constitue un enjeu important en matière d'information routière notamment en période de congestion et d'incident. Il permet notamment de détecter les niveaux de trafic en comparant les temps de parcours estimés à des situations de référence. Bien qu'il existe de nombreux modèles analytiques d'estimation du temps de parcours, ces modèles sont souvent peu satisfaisants soit parce qu'ils représentent mal la réalité, soit parce qu'ils sont mal utilisés.

*La fonction de prédiction* : Cette fonction sert à prédire l'évolution des principaux indicateurs du trafic dans le futur proche. Elle a pour objet de calculer les valeurs des variables du trafic (débit de véhicules, taux d'occupation, files d'attente, vitesse, temps de parcours) dans le futur. La plupart des méthodes relatives à la prédiction du trafic sont basées sur l'analyse des séries temporelles que forment les observations du trafic. En s'appuyant sur les études passées et grâce aux nouvelles techniques numériques, un modèle adapté aux phénomènes du trafic routier urbain et périurbain, donnera l'évolution du trafic pour les instants futurs à partir des observations jusqu'à l'instant courant.

## 5. Le système de fusion de données étudié

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des données qui sont requises en entrée de chaque module ainsi que les données de sortie qu'ils produisent. Ce tableau montre également la méthode de calcul envisagée pour la réalisation de chaque fonction.

**Table 2 : Récapitulatif des fonctions en ligne du système de traitement de données**

Fonctions	Données d'entrée	Données de sortie	Méthodes étudiées
<b>Qualification des données</b>	Données géographiques Données dynamiques : <ul style="list-style-type: none"> <li>• débit, taux d'occupation et vitesse pour l'ensemble des PM de <math>t-H_f</math> à <math>t</math>,</li> <li>• temps de parcours des véhicules traceurs.</li> </ul> Données statiques : <ul style="list-style-type: none"> <li>• profils historiques par PM</li> </ul>	Données dynamiques corrigées à $t$ : <ul style="list-style-type: none"> <li>• débit, taux d'occupation et vitesse pour l'ensemble des PM,</li> <li>• temps de parcours des véhicules traceurs</li> </ul>	Procédure heuristique qui reconstitue les données manquantes ou détecte et corrige les données erronées.
<b>Filtrage et Estimation par fusion de données</b>	Données géographiques Données dynamiques corrigées : <ul style="list-style-type: none"> <li>• débit, taux d'occupation et vitesse pour l'ensemble des PM de <math>t-H_f</math> à <math>t</math>,</li> <li>• temps de parcours des véhicules traceurs.</li> </ul>	Données estimées à $t$ : <ul style="list-style-type: none"> <li>• longueur des files d'attente, débit de véhicule, temps de parcours pour les chaînons équipés de PM,</li> <li>• temps de parcours pour l'ensemble des chaînons,</li> <li>• temps de parcours et niveau de trafic estimés pour l'ensemble des trajets du réseau.</li> </ul>	Méthode d'optimisation basée sur des modèles analytiques.
<b>Prédiction</b>	Données géographiques Données dynamiques : <ul style="list-style-type: none"> <li>• débit et taux d'occupation, vitesse filtrés/estimés pour l'ensemble des PM de <math>t-H_f</math> à <math>t</math>,</li> <li>• temps de parcours filtrés/estimés ou corrigés pour les tous les chaînons du réseau de <math>t-H_f</math> à <math>t</math>.</li> </ul> Données statiques <ul style="list-style-type: none"> <li>• profils historiques par PM,</li> <li>• profils historiques des temps de parcours des chaînons.</li> </ul>	Données prédites de $t$ à $H_p$ l'horizon de prédiction : <ul style="list-style-type: none"> <li>• longueur des files d'attente, débit de véhicule, temps de parcours pour les chaînons équipés de PM,</li> <li>• temps de parcours pour l'ensemble des chaînons,</li> <li>• temps de parcours et niveau de circulation pour l'ensemble des trajets du réseau.</li> </ul>	Analyse et prédiction de séries temporelles à partir de : <ul style="list-style-type: none"> <li>• méthode basée sur le filtre de Kalman,</li> <li>• méthode basée sur l'intelligence artificielle (optimisation par réseau de neurone).</li> </ul>

## 6. Conclusion

Les modèles, fonctions et méthodes présentés ont été étudiés en vue d'une mise en œuvre dans un ensemble logiciel qui a été testé en simulation, puis sur site réel. L'évaluation a été faite sur l'agglomération toulousaine, dans le cadre de projets régionaux (SITTI et WAPITI) et européens (ITS WAP), en couplant cette partie « traitement de données » avec des serveurs de diffusion vers les usagers par Internet et par WAP. Il en ressort que, de la qualité des données recueillies en temps réel, dépend la précision des

temps de parcours estimés. Le travail préalable de calibrage des paramètres du réseau ne doit pas être négligé car il est essentiel pour renforcer la fiabilité des résultats.

La quantité de postes de mesure influe fortement sur la qualité de l'estimation, l'inférence devenant de plus en plus pauvre quand on s'éloigne des zones richement équipées en capteurs. D'où l'importance de moyens de mesure de trafic exogènes tels que le suivi des flottes de véhicules (véhicules traceurs) ou le suivi de téléphones cellulaires.

Dans le domaine de l'exploitation du trafic et des transports et de l'information aux usagers de la route, la multiplicité des acteurs (gestionnaires ou exploitants de réseaux) doit être vue comme un moyen de diversifier les sources d'information et ainsi d'améliorer la qualité du service aux usagers. La fusion de données peut alors apporter des éléments de réponses techniques aux autorités organisatrices.

## Références

- [1] Bell M., Shield C.M. et Breheret L. A path flow estimator for the DEDALE/LEADER ATT database. World Congress on ATT and IVHS, Paris – Novembre/Décembre 1994.
- [2] Breheret L., Schettini F., Bernauer E. et Barbier M. Traitement des données de trafic, Rapport PREDIT, Collections CERTU, février 2000.
- [3] Cohen S. Ingénierie du trafic routier, Eléments de théorie du trafic et applications. Editions des Ponts et Chaussées, 1990.
- [4] David Y., Breheret L., Henry J.-J. et Care-Colin S. DATA-PLUS : études prospectives dans le domaine du recueil de données de trafic. Rapport PREDIT, Collections CERTU, décembre 1999.
- [5] Schettini F. Fusion de données pour la surveillance du trafic et l'information aux usagers, juin 1998.

---

# Conclusion générale

Le domaine des transports, et plus singulièrement celui de la circulation routière, est l'objet d'innovations permanentes, tant sur le plan de la conception de modèles que sur le plan technologique. Les moyens de recueil de données du trafic ont ainsi bénéficié de cette dynamique favorisant l'amélioration des moyens techniques existants avec parfois l'apparition de nouveaux capteurs ou de nouvelles architectures. Cependant, dans le cadre de l'exploitation du trafic, un système de recueil de données, aussi évolué soit-il, ne permet pas de fournir les indicateurs nécessaires aux missions d'exploitation et d'information des usagers.

Il apparaît que la diversification des collectes des données, donc de sources d'information, favorisée par la multiplicité des acteurs (gestionnaires, exploitants de réseaux et opérateurs) et par la technologie (véhicules traceurs) permet de fournir une meilleure image (globale et complète) de l'état du trafic et, par là même, de faire face aux imperfections des mesures (données manquantes, aberrantes...). L'accessibilité de ces nouvelles sources, notamment avec le développement récent de l'usage de la téléphonie mobile et plus généralement celui des réseaux UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), laisse entrevoir la mise en place de systèmes de gestion de trafic à faible coût, utilisant conjointement des données collectées par des véhicules traceurs et des données issues de capteurs au sol traditionnels.

Dans ce contexte, la fusion des données est perçue, à juste titre, comme une réponse adaptée aux besoins opérationnels des exploitants et des opérateurs pour mieux remplir les fonctions dont ils ont la charge.

Cette journée a permis d'appréhender les besoins des exploitants en matière de recueil de données, d'outils d'aide à l'exploitation (élaboration d'indicateurs de qualité de circulation, DAI, etc...) et la nécessité de diversifier les sources de données. Les besoins exprimés et les tendances observées en matière d'exploitation suggèrent un certain nombre d'applications possibles des techniques de fusion de données :

- mise à profit de la multiplication des installations de recueil d'une technologie donnée (p.ex. capteurs à boucle) pour affiner les données recueillies, assurer un contrôle mutuel des stations de recueil, et éventuellement permettre une reconstitution de données manquantes ;
- combinaison de données fournies par des capteurs « ponctuels » (boucles) et des capteurs de surveillance de zones étendues (vidéo, radars) ;
- combinaison de données fournies par des capteurs au sol et par des véhicules traceurs (badges, données de télépéages,...) ;
- traitement de données fournies par des capteurs redondants avec pour objectif de garantir un certain objectif de sécurité ;

- questions liées aux itinéraires et à l'affectation : réactions des usagers aux informations et taux d'obéissance ;
- l'estimation de matrices OD par badges, véhicules traceurs,...

Côté application, les approches utilisées et les résultats présentés confirment que la fusion de données constitue un domaine de recherche très prometteur et présente un intérêt pratique immédiat pour les systèmes opérationnels en exploitation.



