

## La fusion de données, du capteur au raisonnement



Roger REYNAUD<sup>1</sup>

Le groupe de travail « Fusion de Données » du Groupement de Recherches Traitement du Signal et Images (GdR TDSI) a souhaité consacrer ce numéro spécial à la fusion de données en l'articulant autour des quatre rubriques suivantes :

- fusion d'images satellitaires,
- fusion de données biomédicales,
- contrôle adaptatif de capteurs et décision répartie,
- fusion de données numériques et symboliques.

### 1. Historique

Né en 1990 d'une volonté du GdR TDSI d'investir le domaine de la fusion de données, un groupe de travail s'est constitué en action transversale au signal et à l'image, soucieux de faire apparaître de nouvelles thématiques scientifiques en étroite relation avec des applications diverses. La conception et la réalisation d'un système de fusion s'appuient sur :

- La théorie statistique de la décision (souvent multi hypothèses),
- La théorie de l'estimation (souvent non-linéaire),
- La théorie des graphes et la combinatoire précisément en dénombrement d'hypothèses et recherche de chemins dans des graphes d'hypothèses ;
- La théorie du contrôle et de la commande précisément en gestion des capteurs.

Ce groupe consacre sa réflexion à une recherche transversale au travers de différents thèmes scientifiques et illustrée par cinq grands domaines d'applications.

### Thèmes scientifiques

- Détection répartie
- Estimation répartie
- Fusion de modalités
- Aspects multi-résolutions
- Techniques de l'incertain
- Information discrète
- Contrôle
- Architecture des systèmes de fusion
- Choix des capteurs
- Modélisation
- Intelligence artificielle et fusion symbolique

### Domaines d'applications

- Imagerie satellitaire et aérienne
- Imagerie médicale
- Sonar et radar
- Robotique
- Intelligence artificielle

<sup>1</sup>Roger Reynaud est professeur à l'IUT d'Orsay depuis 1994. Il mène ses recherches au sein de l'IEF dans le département « Architecture et conception de circuits intégrés et systèmes », dans le cadre de deux opérations thématiques : « Architecture pour le contrôle de processus » et « Architecture pour la fusion de données ». Ses thèmes d'intérêt concernent la vision globale des systèmes de perception, les algorithmes de combinaison de l'information, le génie informatique appliqué à ces problèmes. Il conserve une activité d'expert sur le thème Adéquation algorithme-architecture dans le domaine du micro-parallélisme et des systèmes multi-DSP.

Il est apparu clairement que cette action transversale était vaste, diversifiée, suivie par un auditoire conséquent de chercheurs et d'industriels. Un travail de vulgarisation et de mise en correspondance des vocabulaires employés par les acteurs du domaine a suscité un dialogue constructif sur chacun des thèmes abordés. Dans le même temps, en collaboration avec une action menée par la DRET, nous avons pris l'habitude de présenter les travaux des jeunes chercheurs en cours de thèse et désirant bénéficier du label « Fusion de Données » du GdR TDSI. C'est ainsi que la communauté peut revendiquer à ce jour un capital d'une vingtaine de thèses soutenues ou en cours. Nous avons sollicité la venue du Professeur Stelios Thomopoulos de l'université de Pennstate, qui a réalisé pour le compte du GdR TdSI un audit des travaux des différents laboratoires français durant le dernier trimestre 1993. Cette visite a catalysé la communauté de fusion de données et l'un des résultats est ce numéro spécial de la revue Traitement du Signal.

Les intitulés des différentes journées de travail de ce groupe traduisent la diversité des thèmes scientifiques ainsi que celle des domaines d'application abordés :

- « Fusion dans le domaine biomédical »
- « Fusion hétérogène »
- « Fusion en imagerie satellitaire »
- « Journées jeunes chercheurs en fusion »
- « Décision distribuée et contrôle adaptatif de capteurs »
- « Fusion en imagerie satellitaire et aérienne »
- « Journées Imagerie cérébrale »
- « Fusion symbolique numérique ».

## 2. Définition du domaine

La fusion de données décrit les méthodes et les techniques numériques permettant de mélanger des informations provenant de sources différentes (nous parlerons aussi de modalités différentes) afin d'obtenir une décision ou une estimation. A ce titre, les différentes théories de l'information constituent au premier abord des méthodes de base des systèmes de fusion, mais elles ne sont pas spécifiques de la fusion de données. C'est pourquoi il importe de s'intéresser plus particulièrement aux méthodes mettant en jeu des modalités complémentaires, des capteurs spatialement distribués, des informations hétérogènes par exemple symboliques et numériques ainsi que des approches théoriques modélisant toutes formes d'incertitudes et d'imprécisions.

Dans ce contexte, une découpe fonctionnelle est proposée en harmonie avec l'architecture de la plupart des systèmes de fusion. Cette découpe traduit la séquentialité des différentes fonctions habituellement réalisées par un système de fusion allant de la perception à la décision et au contrôle.

- Capteurs et transducteurs : perception
- Recalage des observations dans un espace commun

- Fusion dans cet espace commun au sens d'une combinaison d'informations : décision
- Supervision et contrôle adaptatif sur la perception, le recalage et la combinaison.

### Capteurs et transducteurs

Cette première phase est évidemment primordiale quant à la qualité des résultats. Il est courant de constater qu'une faible quantité d'information potentielle est habituellement extraite à ce niveau, soit parce que notre ignorance de certaines caractéristiques du problème nous conduit à faire des hypothèses qui filtrent ou masquent l'information dès le départ, soit parce que le volume d'information à transporter n'est pas réaliste.

C'est le plus souvent à ce niveau que les améliorations sont les plus efficaces, car elles permettent de prendre en compte de façon plus précise les modélisations physiques dans le processus de formation des données. Mais, bien que consciente de l'importance de ces aspects capteurs et transducteurs, la communauté ne considère pas ce domaine comme spécifique de la thématique fusion. Chaque application apporte son lot de données associées aux différents capteurs, différentes modalités et différents traitements. La fusion n'apparaît qu'au travers des notions de coopération de méthodes dans la mesure où cette coopération fait intervenir la prise en compte de détails (en terme de volume) obtenus par modification des traitements sur les données de base (fenêtre d'intérêt et mode super-résolution, mode veille et mode actif).

Dans le domaine de l'imagerie satellitaire, des discussions animées semblent montrer que l'imagerie radar à ouverture synthétique est susceptible de tels développements. D'autres domaines d'application comme le génie biologique et médical accordent une place importante à cet aspect capteurs.

### Recalage des observations dans un espace commun

L'objectif du système de fusion est de combiner les informations disponibles et ceci passe par la recherche d'un espace dans lequel les différentes formes d'information à prendre en compte sont quantifiables. La définition de cet espace n'est pas toujours simple et on désigne sous le terme de recalage la phase consistant à transformer l'information initiale en une information équivalente dans ce nouvel espace dans lequel s'effectuera le travail de « superposition ».

Selon une analyse identique à celle effectuée dans l'étape de perception, il a été décidé de n'accorder le label fusion qu'à certaines méthodes spécifiques. En particulier, les méthodes de stéréovision, de tomographie, de reconstruction 3D ne sont pas spécifiques de la fusion de données mais plutôt d'une activité de recalage géométrique, qui constitue souvent une étape préliminaire à la fusion.

En revanche, tout ce qui concerne la prise en compte d'une imprécision ou incertitude spatiale au moment du recalage, ou d'une incertitude sur un appariement fonctionnel (atlas fonctionnel, carte, ...) ou spatial (amer, carte, ...) est du ressort de la fusion car cela traduit un raisonnement (un contrôle du déroulement de

l'algorithme) qui est fonction de la présence de données issues d'origines différentes.

## Combinaison d'informations

La combinaison d'informations nécessite de définir dans un premier temps quelles sont les mesures qui permettent de quantifier la pertinence de l'information issue des données fournies par les différents capteurs. Ensuite, il faut mettre en œuvre le ou les moyens par lesquels on combine de telles mesures pour obtenir la décision finale. Cette partie est la mieux comprise actuellement puisqu'il existe un grand nombre de travaux déclinant plusieurs approches de ce problème relevant de la théorie de l'information et de la décision.

Le domaine de la fusion étant transversal et souvent applicatif, l'évaluation de la pertinence de l'information doit tenir compte des objectifs en cours ou des objectifs de l'application les plus pressants. C'est ce qui fait la différence avec les théories classiques du traitement de l'information.

Ces dernières sont évidemment utilisées et la combinaison la plus fréquente est celle proposée par Bayes, l'espace associé est celui des probabilités conditionnelles et les algorithmes utilisés sont habituellement récursifs et de type Kalman. Mais un certain nombre de limites empêchent actuellement leur utilisation et nous renvoyons à l'article d'Isabelle Bloch et Henri Maître et à celui de Didier Dubois et Henri Prade qui présentent des méthodes numériques différentes ou des méthodes à base de règles symboliques.

## Supervision et contrôle adaptatif

Cette dernière fonctionnalité correspond à un domaine connexe à l'automatique. Il s'agit de fournir un moyen de contrôler/superviser le déroulement de l'algorithme choisi afin de le rendre robuste à certains phénomènes de divergence ou afin de pouvoir tenir compte de la délocalisation des moyens de décision.

La première approche concerne l'étude de l'optimalité d'un système distribué de décisions, qui peut être déclinée soit sous l'aspect définition des communications (décisions partielles) permettant de conserver un niveau de performance donné, soit sous l'aspect structure du système lui-même ou encore soit sous l'aspect dual de la définition d'une configuration optimale des capteurs (paramètres de configuration et secteur d'observation). Cet aspect de dualité montre le rôle des systèmes de contrôle dynamique dans lesquels les capteurs apparaissent comme des ressources à part entière devant être gérées en tant que telles.

Le passage à l'approche de supervision se fait alors naturellement et un certain nombre de travaux applicatifs montrent l'intérêt de cette approche qui est réalisée habituellement en deux temps. Le premier temps consiste à prendre en compte un capteur autorisant une décision « précoce », ensuite cette décision permet de configurer un deuxième capteur fournissant alors des résultats autorisant une décision plus « fiable ». Il s'agit là encore d'une vision globale du système, mais il est possible d'introduire à chaque niveau un raisonnement particulier sur un sous-ensemble des données au travers du contrôle du déroulement de l'algorithme. Cette présence de raisonnement utilise souvent la

notion de programmation par objet puisqu'elle passe par un typage (caractérisation) des données locales, suivi d'un traitement adapté et complété de l'utilisation de l'héritage ou de l'historique de l'objet.

Enfin, l'approche multi-agents introduit la notion d'objets autonomes qui sont soit des objets, soit des tâches coopérant à un objectif unique, à savoir, la prise de décision globale.

## 3. La fusion fédératrice d'actions inter-communautés

### Communauté GDR CHM

L'action fusion favorise un contact régulier avec le domaine de la Communication Homme Machine et plus précisément avec le groupe de recherche du même nom dont l'une des thématiques est « le raisonnement en reconnaissance des formes ». CHM et TdSI partagent un intérêt commun aux techniques de gestion de l'incertain et de maintien de la cohérence, aux approches déclaratives ou multi-agents de combinaison d'informations hétérogènes, à la coopération de données numériques et symboliques.

### Communauté PRC IA

L'importance des techniques de l'intelligence artificielle dans les systèmes de fusion numérique-symbolique n'est plus à démontrer. Nous voyons de ce fait apparaître des travaux sur l'introduction de formes variées de raisonnement dans les algorithmes de traitement du signal et de l'image.

### Communauté Robotique

L'ensemble des thèmes scientifiques sur lesquels s'appuie la fusion de données est une base pour toutes les actions transversales ayant trait aux systèmes de perception : imagerie médicale, imagerie satellitaire, imagerie radar et sonar, robotique. Bien que la communauté TdSI s'intéresse plus particulièrement aux problèmes amonts de combinaison d'information provenant de différentes sources, il existe des interfaces avec des actions transversales. En ce qui concerne la communauté robotique, certains thèmes tels que le choix sélectif de capteurs, la structure du système de fusion, le contrôle et la supervision de ce système sont à l'interface des deux communautés.

## 4. Présentation du numéro

Il ne nous a pas paru souhaitable de réaliser ce numéro spécial comme un état de l'art du domaine de la fusion de données car ce domaine est très varié et trop jeune pour prétendre en faire le tour. C'est pourquoi nous nous sommes plutôt orientés vers un numéro ouvert avec soumission. Seuls certains thèmes sont abordés dans ce numéro. D'autres thèmes feront l'objet de publications ultérieures sous une rubrique fusion de données de la revue Traitement du Signal dans un proche avenir.

L'ensemble des articles est organisé suivant le schéma ci-dessous.

## Présentation des théories

L'article de Isabelle BLOCH et Henri MAÎTRE présente un panorama des méthodes utilisées en *Fusion de données en traitement d'images* en insistant sur les points cruciaux de modélisation de l'incertain et de l'imprécis.

L'article de Didier DUBOIS et Henri PRADE présente la théorie des possibilités qui prend tout son intérêt quand il s'agit de fusionner des informations imprécises et peu nombreuses car elle s'avère plus souple que la théorie des probabilités pour décrire des modes d'agrégation qui ne correspondent pas à des moyennes. Ce papier décrit dans quelles conditions elle peut être utilisée pour la fusion multi-capteurs.

## Présentation des besoins

L'article de Christian ROUCHOUZE présente les points durs et différents axes de recherche sur lesquels la DRET envisage de faire porter ses efforts dans le domaine de la fusion de données au travers d'exemples Défense.

## Contrôle distribué

L'article de Christian OLIVIER intitulé *Coopération optimale de capteurs frustes* présente une approche originale d'affectation optimale de secteurs d'observation pour une série de capteurs se rapprochant des concepts d'optimisation d'expériences.

L'article de Frédéric BALDIT et Jean-Pierre LE CADRE présente une revue des résultats acquis en *Détection décentralisée au sens des critères de Neyman-Pearson sur des architectures arborescentes*. Il s'agit de définir des règles de décision optimales dans un système distribué dans lequel tout le monde ne peut être informé de tout.

L'article de Jason D. PAPASTAVROU présente une solution efficace concernant l'approximation d'un décideur parmi  $M$  en le remplaçant par  $N$  décideurs binaires distribués suivant une structure à deux niveaux.

## Imagerie

Cette partie concerne l'utilisation de techniques de fusion en imagerie dans divers secteurs d'applications.

L'article de Robert AZENCOTT, B. CHALMOND et J.P. WANG présente un problème de *restauration-fusion d'images à partir de films de sensibilités différentes*. L'algorithme est fondé sur une estimation robuste en présence de valeurs aberrantes nombreuses et

corrélées, puis une restauration dans un cadre Markovien-Bayésien.

L'article de Christian BARILLOT, J.C. LEE, L. LE BRIQUER, G. LE GOUALHER propose une approche globale de la fusion en imagerie médicale selon deux formes, une fusion multi-capteurs d'informations anatomiques et fonctionnelles intra-individu et une fusion inter-individus soit venant de connaissances et modèles a priori, soit provenant de l'identification de structures symboliques. Pour résoudre ce problème dans le cas de l'imagerie cérébrale, l'utilisation de modèles d'anamorphose, la conception d'atlas et l'association de fusion élastique et de segmentation d'images semblent prometteurs.

L'article de Francisco SUREDA, Isabelle BLOCH, Claire PELLOTT, et Alain HERMENT présente une application de reconstruction 3D de vaisseaux sanguins par fusion de données à partir d'images angiographiques et échographiques. L'originalité de ce travail réside autant dans l'aspect complémentaire des capteurs que dans la méthode qui permet d'évaluer le flou obtenu après reconstruction.

L'article de Grégoire MALANDAIN, Sara FERNANDEZ-VIDAL et Jean-Marie ROCCHISANI présente une *mise en correspondance d'objets 3D rigides par une approche mécanique*. Bien que plus classique, cette étude qui fait partie de la fonction recalage dans un espace commun montre l'importance de cet aspect dans la fusion d'images médicales multimodales.

## Symbolique Numérique

L'article de Stéphane DEVEUGHELE et Bernard DUBUISSON présente une étude comportementale d'une règle de combinaison adaptative suivant le degré de conflit présent dans les données. Des propriétés sont établies concernant la sensibilité vis-à-vis de données aberrantes.

## 5. La suite à venir

Certains thèmes ne sont pas présents dans ce numéro ou ont été peu développés. Nous espérons avoir une réaction des lecteurs soit au travers d'un débat d'idées, soit au travers de propositions d'article sous la rubrique fusion de données du journal *Traitement du Signal*.

Je remercie Isabelle Bloch, Marie-Paule Boyer, Line Garnero, Odile Macchi, Henri Maître et Stelios Thomopoulos pour leur participation à la rédaction de cet éditorial.