

Architecture de systèmes multicapteurs

Multisensors Systems Architecture

Roger Reynaud et Samir Bouaziz

IEF, Université Paris Sud, F91405 Orsay

Manuscrit reçu le 5 octobre 2004

Résumé et mots clés

Ce papier propose une synthèse sur les architectures et modèles de fusion utilisés pour combiner et intégrer des données dans un système multicapteurs de fusion de données. Il existe différentes approches avec lesquelles un concepteur peut développer ou adapter son propre modèle de fusion issues de deux domaines dans lesquels la recherche est active, le domaine militaire de la fusion de données et le domaine de la robotique civile ou plus généralement de la conception de systèmes autonomes informatiques intelligents. Le modèle fonctionnel intitulé JDL apporte une vision systémique de la fusion de données appliquée au suivi de cibles dans un champ de bataille, des modèles différents montrent l'évolution des façons de penser en ce qui concerne les systèmes de fusion. Un certain nombre de principes fondamentaux sont ensuite décrits concernant la conception d'un système de fusion multi-capteurs tant sur le plan de son architecture fonctionnelle que matérielle.

Architecture de systèmes multicapteurs, modèle JDL, autres modèles de fusion.

Abstract and key words

This paper deals with the architectures and models of fusion used to combine and integrate data into a multisensors system. There are various approaches with which a designer can develop or adapt his own model of fusion coming from two domains of applications, the military domain of the data fusion and the domain of the civil robotics or more generally the design of intelligent computerized autonomous systems. The first model is the functional JDL model, which describes applications of target tracking applied to the battlefield, then in a second time some different models are chosen to exhibit the evolution of the manners to think the fusion systems. Some fundamental principles are then exhibited about the design of multi-sensors systems related to either functional architecture or hardware architecture.

Multisensors architecture, JDL Model, other fusion models.

1. Introduction

L'architecture d'un système multicapteurs se présente sous trois facettes : l'architecture matérielle, l'architecture système, et un troisième aspect : l'architecture fonctionnelle ou modèle de fusion. Au fur et à mesure que les systèmes de fusion se sont développés, tant au niveau théorique, matériel et opérationnel, il est apparu que ces systèmes devenaient trop complexes et qu'il était nécessaire dans un premier temps d'avoir une approche modulaire.

Une manière de juguler la combinatoire grandissante associée à cette complexité est de réaliser une découpe fonctionnelle en différents niveaux. Un groupe de travail sous l'impulsion du Département of Defence américain a alors proposé un modèle de fusion comportant plusieurs niveaux [1]. Un modèle d'architecture fonctionnelle associe alors l'ensemble de ces 6 niveaux. Ce travail de taxonomie important est basé sur la façon dont les opérationnels qui utilisent ces systèmes pensaient arriver à juguler la complexité dans ce type d'application, la description fonctionnelle doit alors permettre d'étiqueter des sous-tâches à l'intérieur d'un système et peut favoriser l'interopérabilité de ces sous-tâches dans le système complet.

D'autres modèles existent et présentent des caractéristiques différentes. Celui dénommé « DFD model » pour Données-Prémises-Décisions (Data-Features-Decision) correspond à l'implantation d'un traitement principal de type pipeline où les étages de fusion sont caractérisés par le type de leurs entrées et de leurs sorties [2]. Il s'agit alors d'une analyse fonctionnelle de type montante qui présente l'avantage de pouvoir traiter de gros flux de données en diminuant le volume de l'information au fur et à mesure que la sémantique augmente et en étiquetant le mécanisme de fusion par le type des données entrantes.

D'autres modèles ont une présentation plus symétrique comme le modèle « OMNIBUS » [3] qui fait intervenir les actionneurs et le monde réel dans une boucle décrivant le modèle fonctionnel. L'intérêt de ce modèle est de faire apparaître un flux cyclique, du bas niveau vers le haut niveau et retour au bas niveau à travers le monde réel. On précise alors les notions sur l'exemple d'un système autoguidé.

Des modèles issus des sciences cognitives commencent à être utilisés [4]. Dans ces modèles, deux flux antagonistes interagissent le long du processus de fusion. Au travers d'un exemple d'application, nous expliquons pourquoi l'utilisation de tels modèles devient incontournable lorsqu'il est question de concevoir des systèmes de complexité grandissante faisant intervenir des concepteurs et des experts issus de différentes communautés. Nous décrivons ensuite un certain nombre de principes qui influent sur le caractère opérationnel d'un modèle de fusion. La première notion tient au fait que le système de fusion en question est opérationnel dans un système multi-acteurs avec des opérateurs d'intelligence humaine et artificielle nécessitant d'identifier un certain nombre de comportements et d'implanter des raisonnements en conséquence. Le deuxième principe est induit par le fait que le modèle de fusion sera implanté sur une

architecture matérielle et logicielle avec des contraintes de temps à respecter. Latences, bandes passantes et caractère sporadique ou continue des flux d'information sont des paramètres à respecter. Les systèmes peuvent avoir aujourd'hui un grand nombre de ressources capteurs ou d'information *a priori*. Il s'agit donc de filtrer, d'extraire rapidement ou de capturer l'information à la demande non seulement pour diminuer la puissance calcul, mais surtout pour rendre plus performants et plus robustes les différents étages de fusion.

L'allocation de ressources est le point central de tout système informatique. Il en est évidemment de même dans un système de fusion de données. Nous insisterons sur une ressource particulière que sont les différents capteurs et indiqueront comment ces ressources peuvent être partagées entre les différents processus en supposant un processus par cible ou obstacle recherché.

La gestion du temps est aussi un point fondamental. Pour être combinées, les données doivent être estampillées temporellement par une horloge commune connue avec une précision donnée. La pérennité des données doit aussi être estimée car dans un fonctionnement de type pull (requête de données) et en présence de latence importante, des mécanismes de cache et de prédiction peuvent permettre de palier un retard pur important.

L'adaptation au contexte tactique et opérationnel passe par une approche horizontale du modèle de fusion (à comparer à l'approche verticale montante ou descendante). Il s'agit de pouvoir contrôler l'organisation globale entre les étages et le fonctionnement de chaque étage lui-même au moyen de modèles (Interacting Multiple Models) ou de paramétrage des traitements. Différentes approches sont possibles et nécessitent la définition *a priori* de plusieurs hypothèses concernant le monde réel et la mesure d'une distance du phénomène observé avec chacune des hypothèses. Finalement, pour des systèmes réels, la décision est alors basée sur des techniques multi-critères.

Le plan est découpé en 4 parties

1. L'introduction
2. La description des architectures de fusion de données pour lesquels une réflexion existe depuis 90.
3. Les principes sur lesquels il faut s'appuyer pour concevoir un système opérationnel.
4. La conclusion

2. Description des architectures de fusion de données

2.1. Positionnement du problème et les différentes approches

Le problème de la conception d'un système de perception ou de fusion de données est un domaine actif de la recherche depuis

une trentaine d'années. Plusieurs communautés se sont attaquées à cette question dans le cadre de quatre grandes approches.

La première approche est la théorie du contrôle ou automatique. Dans ce cadre, un système est décrit par un état (ou une union d'état lorsque ce système est décomposé de façon modulaire) et un certain nombre de perturbations. Décrire un système revient à se donner un graphe de transition d'état. Lorsque le système atteint une grande dimension, il existe un compromis entre la précision des modèles utilisés et l'utilisation de transitions approximatives, ce qui conduit à la définition d'un système approximé.

La deuxième approche est une approche systémique dans laquelle un problème est décomposé en sous-problèmes, eux-mêmes décomposés en sous-sous-problèmes jusqu'à atteindre une taille de sous-problème que l'on puisse solutionner. Cette atomisation introduit des mécanismes d'interaction entre modules qu'il faut gérer. Cela nécessite alors la mise en place de protocoles d'échanges standardisés et il est alors nécessaire de fournir une énergie pour assurer la cohérence des communications entre modules, énergie qui fait alors souvent défaut quant à l'expression d'une certaine forme d'intelligence pour ce système.

La troisième approche est le domaine de l'intelligence artificielle. Nous entendons sous ce vocable toutes les techniques de prises de décisions par inférences qu'elles soient de type inférence logique, inférence stochastique ou à base d'heuristiques. Ces techniques, lorsqu'elles sont opérationnelles, s'appuient sur des expertises qui ne sont connues que pour des domaines applicatifs limités.

La dernière approche concerne les sciences cognitives. Il s'agit dans ce cas de reproduire des fonctionnements par analogie avec une représentation mentale, ou ce que l'on croit être un mécanisme de fonctionnement du cerveau au niveau de la capacité de l'homme à raisonner, à apprendre, à résoudre des problèmes. Cela conduit le plus souvent à la mise au point de nouvelles théories en intelligence artificielle conduisant à des techniques, opérationnelles dans quelques applications bien précises, mais le plus souvent ces techniques sont difficilement implémentables matériellement.

2.2. Modèle JDL et ses dérivés

Le premier mécanisme pour maîtriser la combinatoire liée à la complexité grandissante est de réaliser une découpe fonctionnelle. Un groupe de travail sous l'impulsion du Département of Defence américain a alors proposé un modèle de fusion comportant initialement 3 niveaux fonctionnels et aujourd'hui globalement 6 ou 7 niveaux. Un modèle d'architecture fonctionnelle associe alors l'ensemble de ces niveaux. Un tel modèle dénommé JDL user model [1] dérivé du modèle JDL original [5] est présenté figure 1. La dénomination JDL (Joint Directors of Laboratories Data Fusion Working Group) provient du fait

que ce modèle est issu d'un groupe de travail associant les directeurs de laboratoire travaillant dans le domaine de la fusion [6]. Les niveaux décrits par [5] sont les suivants :

- > Les entrée capteurs
- > **Niveau 0** : Extraction de caractéristiques ou de prémisses
- > **Niveau 1** : Définition de piste, pistage et fusion d'attributs. Fusion des prémisses pour aboutir à des objets
- > **Niveau 2** : Raisonnement pour l'évaluation de la situation courante
- > **Niveau 3** : Evaluation de la menace
- > **Niveau 4** : Supervision et contrôle du processus de fusion
- > **Niveau 5** : Raffinement introduit par l'utilisateur
- > **L'homme** dans la boucle de décision
- > **Les bases de données**

Les niveaux 1, 2, 3 furent les trois premiers définis. Ils correspondent à la façon dont les opérationnels organisent leurs raisonnements. Il est à noter que les niveaux fonctionnels deux et trois sont très ambitieux et encore aujourd'hui quasi inaccessibles à un système automatique. L'essentiel des publications concerne le niveau un et un niveau 0 a du être défini pour prendre en compte et classer tous les modules de détection, décisions partielles, reconnaissance des formes en traitements d'images et détection de cibles. Il est important de garder en mémoire le concept centré humain des fonctions de chaque niveau, car il permet aux différentes communautés de capitaliser les investissements en vue d'automatiser certaines tâches en exhibant les difficultés pour automatiser ces tâches ou pour utiliser ces tâches automatisées. Ceci est particulièrement vrai concernant l'évaluation de la situation courante et encore plus pour l'évaluation des impacts possibles auxquels la situation peut aboutir.

Le niveau 4 a été introduit plus tard et autorise des traitements successifs avec raffinement du contrôle des processus de fusion. Alors que les niveaux 0, 1, 2, 3 sont étiquetés comme des niveaux de fusion, le niveau 4 est plutôt considéré comme de la gestion de ressources, et le niveau 5 comme une part de l'interface homme machine. Ce niveau 5 *ad hoc* appelé « User Refinement » permet de décrire les adaptations a façon que l'on trouve dans tous les systèmes opérationnels orientés vers l'utilisation efficace par un opérateur. En effet, en remplaçant l'application dans un contexte d'aide à la décision, il permet d'exhiber quelles sont les sorties de ce système. Il autorise alors une paramétrisation évolutive des différents traitements présents dans les différents niveaux fonctionnels.

Le Modèle JDL ne donne aucun détail sur la façon dont une sortie globale d'un mécanisme de fusion particulier peut-être générée et contrôlée. Il s'agit d'un schéma d'organisation fonctionnelle dans lequel les flux d'information entre niveaux ne sont pas décrits. Il en est de même des mécanismes de contrôle des flux gérant le parallélisme d'exécution de tâches à différents niveaux fonctionnels, la valeur ajoutée apportée lorsqu'un niveau communique avec un autre pouvant être contrebalancée par une complexité due à une combinatoire croissante et des

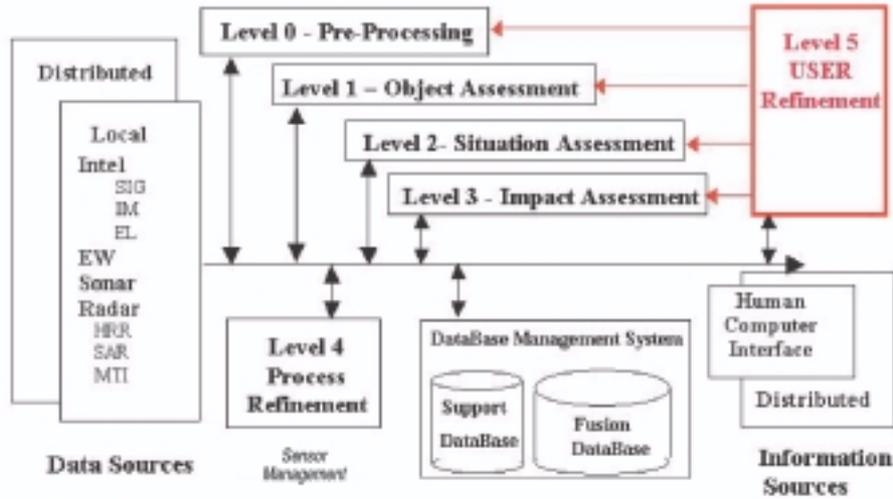


Figure 1. Extension du JDL data fusion model proposé par Blasch [5].

délais temporels pour autoriser l’usage de boucle de contre-réaction.

Une littérature abondante existe concernant les modifications et adaptation du modèle JDL pour le rendre plus expressif et donc plus opérationnel. Nous conseillons le papier de Llinas *et al.* [6] qui décrit les évolutions récentes.

2.3. Modèle Data-Feature-Decision de Dasarathy

Dasarathy suggère d’accéder aux flux de données et de contrôler suivant 3 niveaux de fusion : les données ; les prémisses et les décisions. Tous les flux ont un type comme en programmation orientée objet. Ce travail reste au niveau taxonomie, il montre la

richesse des mécanismes de fusion qui peuvent être implantés dans une application. Sur la figure 2, un mécanisme donné est représenté par une flèche et un acronyme. Par exemple DAI-FEO signifie Data In Feature Out désignant un mécanisme de fusion acceptant des données du niveau DATA en entrée et fournissant des prémisses ou FEATURE en sortie.

Cette façon de voir est largement utilisée dans le domaine du traitement d’images et de la reconnaissance des formes. Un point important est que le type des flux est clairement identifié à partir de leur sémantique, ce qui rajoute une dimension essentielle par rapport au modèle JDL. Il est alors possible de faire apparaître un mécanisme de régulation qui contrôle les niveaux inférieurs à partir de décisions partielles des niveaux supérieurs tel qu’il est représenté par les flèches descendantes sur la figure 2.

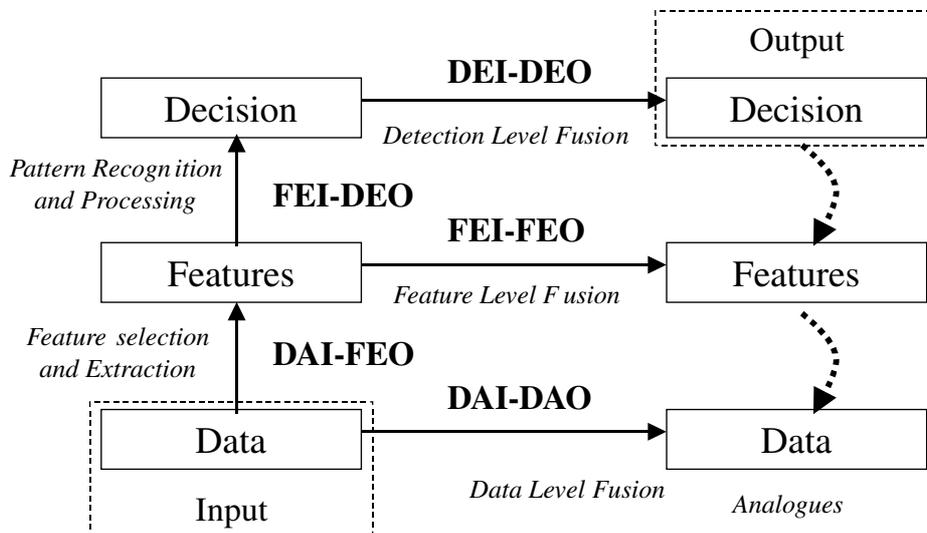


Figure 2. Data Feature Decision model proposé par Dasarathy [2].

2.4. OODA modèles (Architecture cyclique)

Les travaux de Endsley [7] ont clairement indiqué que la conscience d'une situation se base sur la perception des éléments la constituant au sein de l'environnement constitué par un volume de temps et d'espace, la compréhension de leur signification et la projection de leur devenir dans un court terme. C'est dans ce contexte qu'un étage de fusion dénommé ORIENT a été défini par Boyd au sein d'une architecture cyclique constitué de flux unidirectionnels et dont les aspects contrôle se font au travers du monde réel par un bouclage avec un délai. Ce nouveau niveau a en charge de replacer l'information dans son contexte afin d'améliorer soit la précision soit la coordination temporelle.

Cette façon de procéder met de nouveau en avant les flux circulant entre des niveaux fonctionnels. Le bouclage est réalisé au travers du monde réel ce qui amène une simplification notable au niveau de l'Operating System, mais ne conduit pas à des systèmes opérationnels dans la pratique. Le processus Orient joue un rôle particulier car il permet d'introduire un contrôle opportuniste avant le niveau décision.

Une instantiation est proposée par Bedworth [3] dans laquelle les fonctionnalités sont plus précisément décrites pour chaque niveau dans une application de traitement d'images, à savoir par exemple l'étage de décision comprend les tâches de prises de décisions à proprement parler, ainsi que des traitements contextuels.

2.5. Contrôle à boucles imbriquées

Il s'agit d'un point de vue automatique mettant en œuvre 4 boucles imbriquées présenté par Endsley [7]:

1. La perception de la situation courante (qui englobe donc un certain nombre d'étages du modèle précédent).
2. La compréhension de la situation courante. Il s'agit là d'un concept intéressant puisque l'auteur propose de séparer en

deux fonctionnalités la perception et la compréhension, le premier niveau consistant à rassembler des objets et des relations entre objets, le deuxième niveau proposant une compréhension ou au minimum une reconnaissance de la situation courante.

3. La projection de l'état futur apparaît comme un étage à part entière, c'est à ce niveau que des paris sont faits sur le comportement d'objets autonomes dans la scène permettant d'imaginer les futurs possibles, les orientations (focalisation de perception ou traitement) et des détections précoces de changements de comportement de ces objets autonomes.
4. Le dernier niveau est celui qui a en charge la résolution du problème et qui prend les décisions concernant l'enchaînement d'une chaîne d'actions simples à partir d'un sous-ensemble d'actions possibles. Dans le modèle proposé par McGuinness [10], il lui incombe non seulement de gérer la compétition des objectifs à court terme, mais aussi ceux à moyen et long terme, ce qui le différencie notablement du modèle précédent. Un point intéressant est la présence d'un module d'évaluation de la performance des actions.

On répond donc de façon imbriquée aux 4 questions suivantes :
 Quels sont les éléments factuels courants ?
 Qu'est-il en train de se passer ?
 Que se passera-t-il vraisemblablement si ... ?
 Que dois-je faire pour résoudre ce problème ?

Cette approche est centrée sur les niveaux amonts de fusion concernant la conscience ou compréhension de scène. Un travail complémentaire de Salerno [8] traite de différentes questions et présente les points à approfondir pour arriver à implanter ce modèle de façon opérationnelle.

Cette architecture de contrôle ne décrit pas les flux existant entre les différents modules constitutifs de l'architecture. Elle crée quatre niveaux de contrôle imbriqués [9]. Le dernier niveau suppose la définition d'une qualité de service relatif à un enchaînement de tâches permettant d'évaluer par avance et de comparer les performances des différents enchaînements de

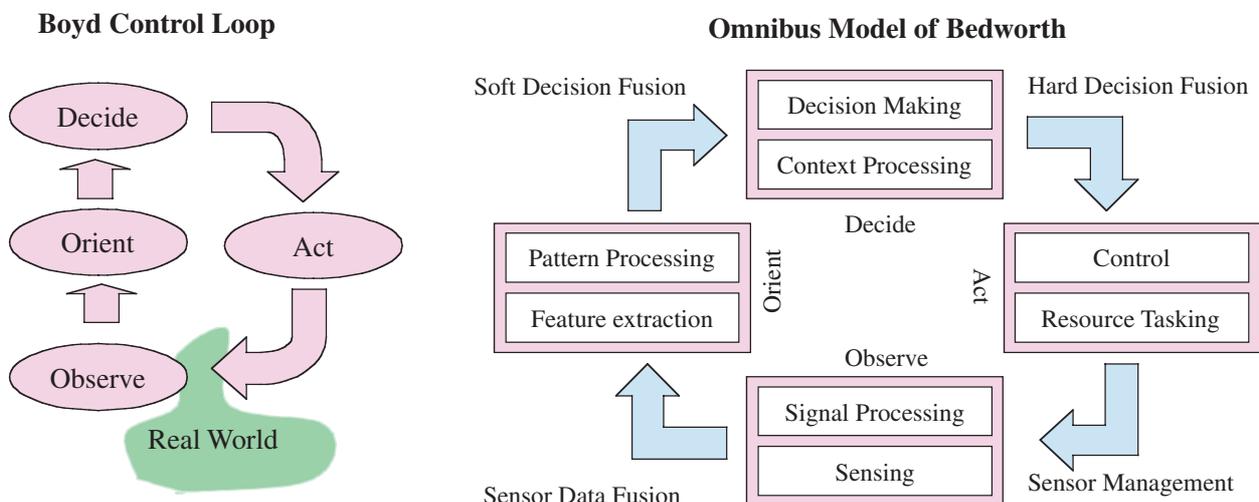


Figure 3. Le modèle OODA générique de Boyd et une instance proposée par Bedworth [3].

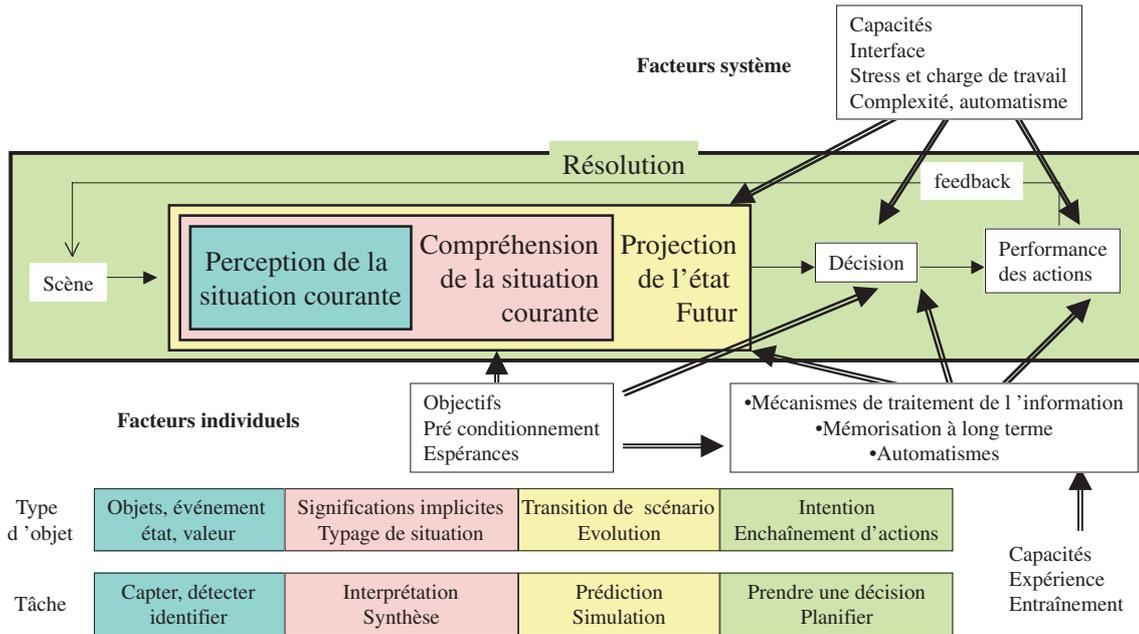


Figure 4. Architecture à boucles imbriquées de Endsley [7] et McGuinness [10].

taches en compétition. La notion de qualité de service et de mesure de performances est intéressante en soi, mais reste entièrement à définir.

2.6. Architecture à deux flux : conceptualisation humaine

Basée sur des travaux concernant l'organisation des tâches dans un cerveau humain, cette proposition [4] reprend ces travaux en adaptant le vocabulaire partiellement aux tâches que l'on a dans un système de fusion. Sur la figure 5- gauche, un étage de traitement dans lequel deux flux circulent dans des directions opposées.

Le premier flux concerne l'acheminement des données issues des capteurs vers des centres de prises de décisions afin de contrôler des actionneurs. Ce premier flux classique est analogue à tous les architecture de fusion classique. Il est local vis-à-vis d'un laps de temps ou d'une focalisation de tâche. Il est découpé en 5 processus chaînés : la capture des données avec leur prétraitement ; la perception qui transforme en objet et en relation (permettant de constituer une scène) les stimuli issus de l'étage précédent ; la gestion de différents objectifs en compétition est effectuée en fonction des désirs permettant de dériver des buts à courts termes et leur planning ; cet étage filtre les réponses appropriées et accessibles ; les actionneurs sont commandés à ce niveau.

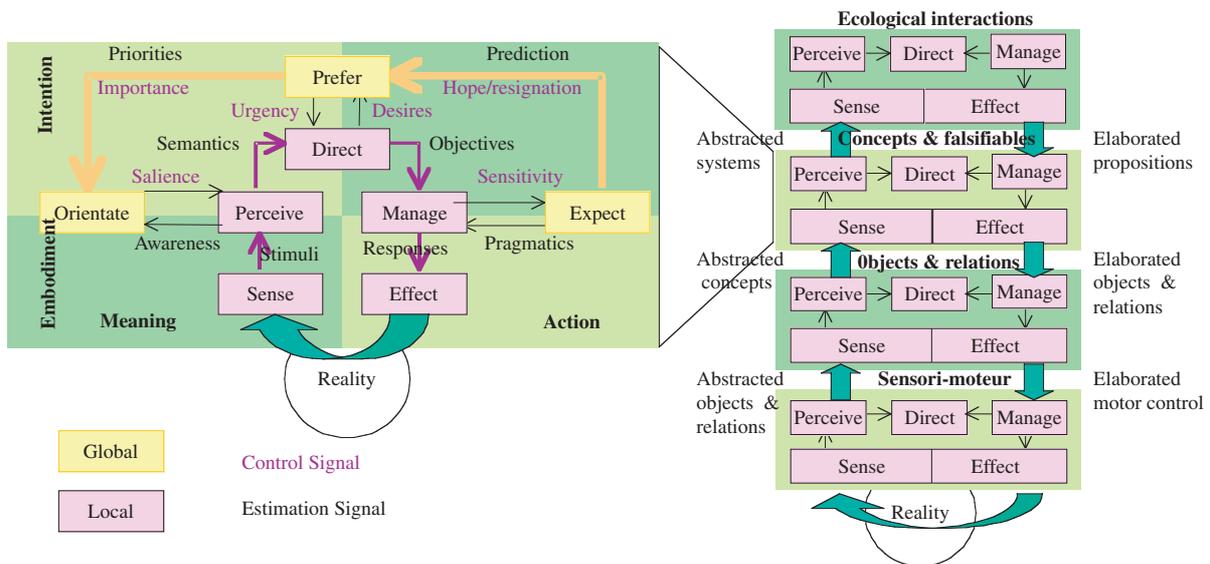


Figure 5. Architecture pour un modèle humanoïde proposée par Frankel [4]. À gauche un étage de traitement – À droite, la hiérarchie des concepts reposant sur un empilement de 4 étages.

Un deuxième flux qualifié de global fonctionne en sens inverse. Au premier niveau, des paris sont effectués sur la dynamique des objets autonomes découverts dans la scène, les futurs possibles sont analysés et permettent de prédire un certain nombre d'évolutions possibles; un superviseur gère alors l'interface entre les évolutions possibles pour contrôler les buts que doit essayer d'atteindre la boucle locale en réorientant la perception et en réorganisant les sous-objectifs; le dernier niveau est la gestion classique des ressources en particulier celles qui concernent la perception.

Un certain nombre de flux auxiliaires existent et permettent de faire interagir les boucles locale et globale. La figure 5-droite décrit qu'il est nécessaire de définir en parallèle une hiérarchie dans les concepts abstraits qui sont construits pour représenter le système. Deux couplages existent, l'un en parallèle sur le monde réel, l'autre en série en tenant compte que les constantes de temps sont croissantes d'un étage de bas niveau sémantique vers les étages de plus haut niveau sémantique.

3. Principe de conception d'un système de fusion

Plusieurs points apparaissent au regard de l'évolution concernant les architectures fonctionnelles de fusion. Le premier concerne la découpe fonctionnelle qui est l'étape numéro un. Les experts du domaine se réunissent et proposent une définition des grandes fonctions à implanter. Cette façon de procéder en elle-même conduit à des fonctions de haut niveau pour lesquelles il n'existe pas aujourd'hui de module informatique correspondant. Dans le même temps, des chercheurs se sont intéressés à des principes de plus bas niveau pour mettre au point des mécanismes de fusion. Que ce soit dans le cas des applications de vision active issues du domaine de la robotique ou de fusion de données issues du domaine militaire de la surveillance du champ de bataille, les mécanismes en question ont fait apparaître des flots de données, puis de contrôle pour mettre en place des arcs de traitement opérationnels et des boucles de réactivité sur le monde réel et sur les traitements en interne. Ceci constitue le deuxième point.

Aujourd'hui, le challenge est de combler le trou qui existe entre une littérature importante sur les mécanismes de fusion et de régulation bas niveau et un travail qui est resté délibératif sur la compréhension de la situation courante dans ce genre d'application. Devant la complexité, deux tendances restent en compétition suivant qu'elles mettent en avant plutôt l'aspect contrôle ou la gestion de flux opposés. La première se base sur des mécanismes de contrôle de boucles imbriquées, chaque boucle étant en charge d'une fonction importante, la supervision d'un tel système se base alors sur des mesures de performances, des notions

de qualité de service et de gestion des conflits. La deuxième voie consiste à exhiber des graphes fonctionnels de plus en plus raffinés comme dans l'approche de Frankel [4], tout en espérant que le contrôle de l'ensemble du graphe sera robuste.

3.1. Approche délibérative

Une première perspective de la recherche dans le domaine de la fusion de données concerne le développement de la future génération centrée sur le réseau des systèmes d'aides à la décision. Il s'agit alors d'une approche délibérative non contrainte en temps de réaction rapide qui va se baser sur une fédération de capteurs, de traitements, de bases de données reliés par une infrastructure réseau. Ces approches intègrent tout le travail de taxonomie réalisé sur la découpe fonctionnelle d'un système de fusion de données, mais elles mettent en avant surtout les mécanismes d'interaction entre les différentes tâches réparties sur le réseau en spécifiant les besoins en mécanismes d'échange d'information entre tâches et les modèles et spécifications de communication et distribution de cette information.

Nous présentons le travail de T. Bass [11] qui propose une architecture basée sur la publication souscription de pièces d'information dans le cadre d'une application de fusion de données multi-capteurs basée sur une infrastructure de ressources en réseau. Les concepts clés de ce type d'architecture sont de quatre types et orientés service d'information :

- Les ressources capteurs, traitements, base de données et compréhension des situations sont organisées en grappes dans le cadre d'une fédération.
- Pour échanger des informations, des services du type publication d'information, souscription d'information et d'autres services de fusion d'information doivent être mis en place et spécifiés par des protocoles ouverts.
- À l'intérieur de chaque grappe, un mécanisme de publication de données est basé sur des attributs de ces mêmes données. Au vu du volume de données à échanger, chaque grappe extrait des thesaurus suivant différents points de vue sur la même base de données pour s'adapter aux requêtes des clients de la publication.
- Des mécanismes de souscription à des éléments d'information par abonnement sont aussi spécifiés pour coller aux besoins et la disponibilité des données critiques doit être évaluée (donnée valide à telle date dans le passé, le présent ou le futur, donnée valide avec telle fréquence, donnée âgée présente en cache, ...).

Ces caractéristiques conduisent à une fédération de services distribués sur une architecture de grappe permettant la publication et la souscription d'information pertinente entre ces grappes.

Les modèles correspondant à ce type d'architecture sont adaptés au partage d'information entre grandes infrastructures autonomes, car ils sont *a priori* redimensionnables, relativement indépendants de chaque organisation (seuls les mécanismes de publication, souscription et étiquetage des bases de données

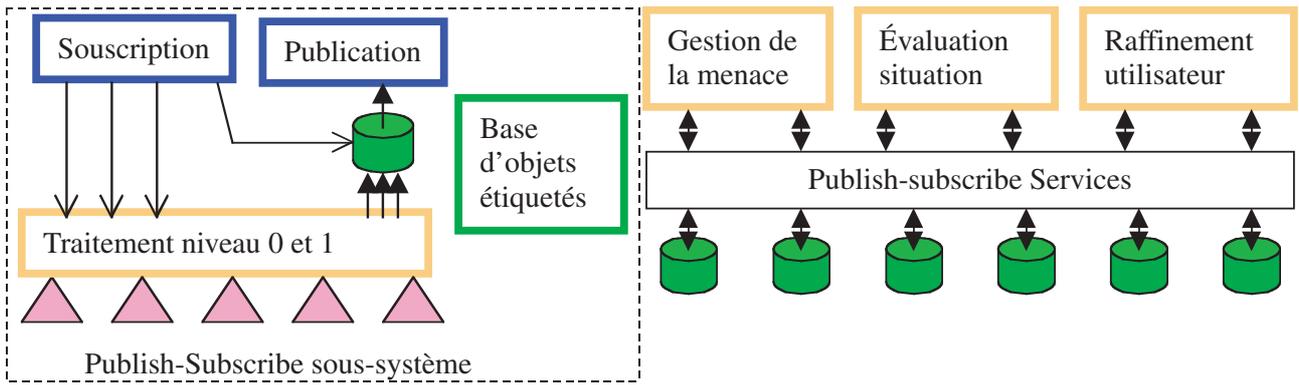


Figure 6. Architecture fédérée autour de service de type publication souscription. À gauche : un sous-système basé sur les niveaux 0 et 1 du modèle JDL. À droite : les niveaux 2, 3 et 4 interagissent avec ces sous-systèmes. Les triangles représentent des sources de données, les disques des bases de données, les rectangles des traitements ou des services.

locales sont à mettre spécifiquement en place). Ils autorisent donc la mise en place de services orientés fusion de données en faisant coopérer et en fédérant les différentes infrastructures. Toutes les architectures proposées aujourd'hui sont basées sur des systèmes à événements discrets. Dans des organisations de grandes tailles, l'asynchronisme natif impose la mise en place d'un service de notification d'événements nécessaire pour coupler les différentes organisations dans la fédération. Ce nouveau service est distribué sur des serveurs répartis en réseau qui notifient les événements, acceptent les souscriptions et les réorganisent afin d'augmenter l'efficacité de ce système distribué. Des clients accèdent à ce service par des points d'accès, souscrivent des demandes et consomment des notifications d'événements.

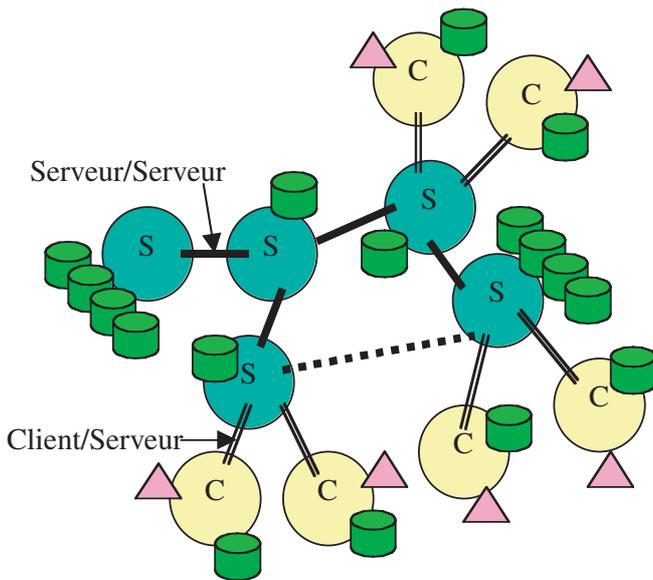


Figure 7. Architecture acyclique point à point entre serveurs S, certains servent de points d'accès aux clients C. Les sources d'information (triangles) sont réparties. Les bases de données (cylindres) sont distribuées.

Différentes topologies de réseaux ont été étudiées et des protocoles ont été mis en place pour assurer la cohérence du service de notification d'alerte.

Les langages de souscription jouent un rôle tout aussi important. Les flots d'information sont habituellement contrôlés par des champs d'adresses fixés par l'envoyeur. Dans une architecture de publication souscription, et dans l'optique de diminuer globalement le volume des transactions, les flots d'information sont régis par l'intérêt qu'un consommateur porte au contenu d'une donnée. Ils existent alors quatre types de langages [12] :

- Dans le but de simplifier les requêtes, il est possible de souscrire globalement à un canal thématique.
- Une forme plus évoluée est de souscrire à des sujets thématiques.
- Pour raffiner les demandes, les attributs de diffusion d'information peuvent être contextuels à valeur fixe,
- Ou contextuels à valeurs multiples.

Ces travaux montrent une jonction entre les besoins en infrastructure des systèmes de fusion de données et les architectures informatiques fédératives de partage d'information. La mise en place de service de publication souscription d'information est une voie importante dans laquelle s'engage une partie de la communauté. Elle fait le pari d'une maturation de ce domaine informatique plus rapide que d'autres technologies concurrentes comme les services WEB ou l'intégration de systèmes de fusion de données prenant mieux en compte des services spécifiques de fusion de données du type gestion de conflit et interface avec opérationnels.

3.2. Approche réactive

Nous présentons un système de fusion de données dans une application de missile autoguidé. Avant l'arrivée du GPS (Global Positioning System), différents contrôleurs de navigation de missile à basse altitude ont vu le jour. Ils sont réalisés

dans une approche entièrement réactive. Le caractère opérationnel réside dans la fusion de différentes données; les données proprioceptives permettant de réaliser une navigation à l'estime, des imageurs et leurs traitements associés permettant de retrouver des amers de navigation (clochers, cheminées, ponts, rivière, maison isolée, ...), une base de données qui associe un amer avec son emplacement sur la carte de navigation.

L'application consiste en début de mission à télécharger un plan de vol principal et un ou deux plans de vols alternatifs. Une phase de navigation à l'estime permet de contrôler l'engin qui circule alors d'amer reconnu en amer suivant reconnu. Entre deux amers, l'imprécision de localisation croît avec le temps. En parallèle est effectuée une recherche continue des amers à partir de différentes sources de données qui sont fusionnées pour détecter un amer. Quand un amer est détecté, alors un processus d'appariement entre l'amer détecté et les amers potentiellement présents dans un voisinage de la cible est mis en œuvre. L'événement résultat de l'appariement permet, en fonction du résultat et des consignes chargées au démarrage de la mission, de décider de la suite de la mission à savoir continuité du plan de vol et recalage sur la position de l'amer trouvé dans la base de données, modification du contrôle pour se remettre sur la trajectoire, changement de plan de vol, ...

Ce système est dit totalement réactif, car les mécanismes de contrôle des actionneurs ont été câblés dans le code source. Les flots de données sont figés. Il peut exister des alternatives au fonctionnement nominal, mais elles ont été précompilées à la conception du système.

3.3. Contrôle opportuniste

Un travail de taxonomie réalisé entre les GdR ISIS et CHM décrit les mécanismes d'interactions entre acteurs d'un système multi-acteurs, chaque acteur ayant un certain degré d'autonomie (multi-agents) ou aucune autonomie. Ce schéma bien connu de notre communauté comporte un certain nombre de branches qu'il est déjà possible d'instancier comme une partie d'un système artificiel. Que ce soit pour la fusion, la mise en compétition, la coordination planifiée ou le contrôle adaptatif, il existe de nombreux modules logiciels réalisant ces fonctions. Mais l'utilisation de ces seuls mécanismes d'interaction n'est pas suffisante pour réaliser un système intelligent capable de comprendre une situation courante. Autrement dit, les cas où l'utilisation de ces mécanismes suffit pour résoudre une application ont déjà été traités dans le passé et correspondent à des applications peu complexes.

Le point dur reste la coordination et particulièrement le contrôle opportuniste centralisé ou décentralisé qui est presque la définition de l'intelligence humaine. C'est dans ce cadre que se situent les recherches les plus amont en architecture des systèmes de fusion de données ou en vision active.

3.4. Principes

Choisir un modèle de fusion : architecture fonctionnelle

Le modèle JDL reste le modèle de base de la découpe fonctionnelle dans une application de fusion de données, mais les autres modèles du chapitre II montrent que ce modèle n'est pas suffisant en soi pour être utilisé dans une démarche de conception de systèmes. Il ne donne en particulier aucun détail sur la façon dont une sortie globale peut-être générée ou contrôlée. L'approche systémique est souvent utilisée en premier pour

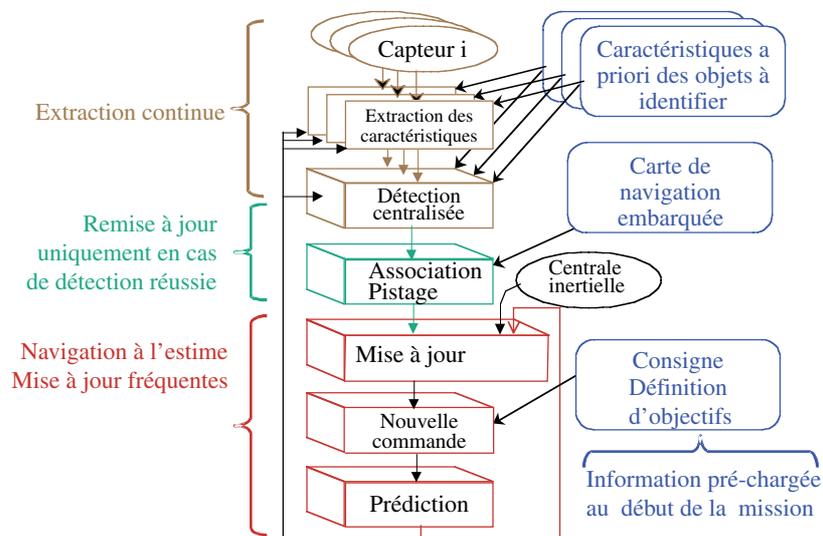


Figure 8. Système réactif pour la navigation d'un missile autoguidé.

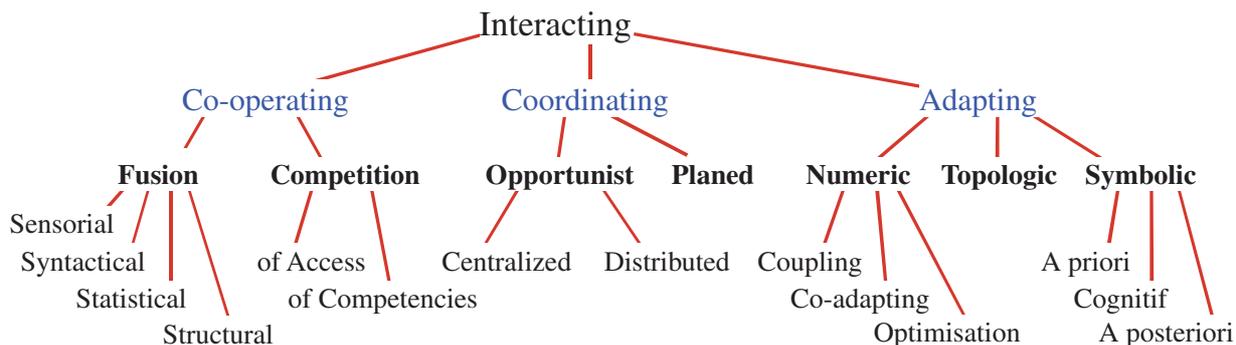


Figure 9. Mécanismes d'interaction entre acteurs dans une situation.

arriver à des briques fonctionnelles simples qui sont implantées par des techniques de prises de décision par inférence. L'ensemble est suffisant pour certaines applications suffisamment simplifiées, mais insuffisant dans le cas réel. L'approche exclusive de type contrôle ne peut exister qu'en présence d'une solution globale prenant en compte toutes les possibilités. Cela n'est jamais possible dans des systèmes de prises de décisions où, à chaque étape, on produit un nombre important de solutions possibles. Mais l'aspect contrôle est incontournable au niveau des décisions centrales, du contrôle de la perception et du contrôle de la locomotion. Les modèles s'appuyant sur les mécanismes de fonctionnement du cerveau sont les plus raffinés. Mais ils induisent une complexité qui nous paraît insurmontable aujourd'hui et qui contredit l'adage suivant : comme pour un joueur de foot, pour marquer des buts, il faut avoir un raisonnement simple, pragmatique et rapide. Cet adage ne prêche pas pour l'utilisation de ces modèles dans le cas d'un système réactif de perception active, mais cette approche reste prospective en ce qui concerne la création de machine à raisonner pour des profondeurs de raisonnement plus grandes.

Définir une architecture matérielle

Au niveau de la conception de l'architecture matérielle, on distingue essentiellement 4 types d'éléments matériels. La première famille de blocs matériels permet de traduire le monde réel en données perceptibles par le système de traitement de manière brute ou après transformation/interprétation. Il s'agit en fait des capteurs extéroceptifs ou proprioceptifs. La seconde famille représente les blocs matériels transformationnels purs. Il s'agit en fait des calculateurs nécessaires aux diverses opérations de la fusion/décision. La troisième famille permet d'agir sur l'environnement à partir des résultats des systèmes décisionnels ; il s'agit des actionneurs. Enfin, la dernière famille est tout ce qui permet les échanges entre tous ces blocs. Il s'agit des moyens d'échanges inter-blocs.

L'une des approches les plus pragmatiques consiste à regrouper les blocs par affinités fonctionnelles (capteurs/calculs/actionneurs), puis de mettre en place des mouvements de données appropriés au sein de chaque arc fonctionnel réalisé et enfin de

prévoir des commutations sur les flux de données lorsque des arcs différents utilisent des ressources communes. En ce qui concerne les capteurs et les actionneurs, des bus multiplexés dédiés ont vu le jour, par exemple les bus CAN, VAN, LIN. Les protocoles associés permettent de résoudre des problèmes liés à la robustesse des échanges de données dans un milieu physique et permettent que l'architecture capteurs/actionneurs soit extensible sans remettre en cause le système. Un capteur doit avoir une aptitude à traduire l'environnement en données échantillonnées et à remonter cette information de manière fiable. La période d'échantillonnage du monde est alors déterminante pour espérer interpréter la scène et produire une décision cohérente avec l'instant où elle s'effectue. L'approche d'augmenter la sémantique des données produite par un capteur (et donc de réduire la taille des données) implique d'augmenter son intelligence par des traitements plus complexes *in situ*, du matériel plus performant et de l'accès supplémentaire à des informations contextuelles. Cette approche dite capteur intelligent a mis en évidence la nécessité de poser des normes de conception de ces capteurs (norme IEEE 1451 [13][14] pour des capteurs intelligents en réseaux).

Système distribué et chemin de données

Les blocs combinatoires transforment les données en augmentant leur sémantique et en diminuant leur volume. Dans les cas simples, un pré-placement des tâches est efficace en particulier pour les traitements de bas-niveau, un bloc fonctionnel élémentaire est attaché à un bloc combinatoire matériel (un processeur ou coprocesseur) ou logique (une tranche temporelle sur un processeur). Les traitements sont alors séquentiels, parallèles ou en temps partagé. Cette organisation présente des avantages dans des applications où les flux de données montants et descendants sont parfaitement identifiés. L'inconvénient majeur réside dans le fait que les divers processeurs et calculateurs spécifiques nécessitent autant de compétences humaines pour implanter chaque traitement. L'un des choix réalistes consiste à utiliser une architecture distribuée de processeurs de même type. Beaucoup de processeurs sont candidats à cette solution (DSP C6000 de Texas). Des canaux de communications point à point

sont également implantés dans le même processeur permettant alors de créer des architectures multiprocesseurs *ad hoc*.

En général, une machine à raisonner n'est pas efficace avec un préplacement des tâches. La durée des raisonnements implantés est non prédictible. Le traitement en parallèle est alors une solution naturelle pour réduire les retards de décisions. Se pose alors le problème des échanges pour acheminer les données entre les divers co-processeurs de calculs ou pour faire migrer des tâches en répondant aux contraintes du cahier de charge. Du fait de la difficulté de prévoir avec précision ce que doit être l'architecture matérielle à partir de l'architecture fonctionnelle, cette architecture est dimensionnée au pire cas à partir d'un co-processeur de calcul organisé en grappe de calculateurs et respectant une certaine stratégie d'interconnexion. Pour diminuer le surdimensionnement résultant, certaines tâches sont affectées à un calculateur dédié, d'autres à la grappe de calculateurs.

Lorsque les mouvements de données sont importants (transfert d'images d'un module de calcul à un autre), la mise en place de coprocesseurs de transfert est incontournable. Ces processeurs sont alors pourvus de contrôleurs DMA (de 1 à 4 contrôleurs voire plus) grâce auxquels ces transferts sont effectués à la volée sans mettre en cause les performances de calcul du processeur.

Percevoir : Echantillonnage, cohérence et marquage temporel

Un bloc fonctionnel de calcul nécessite des données issues d'autres sous blocs fonctionnels et des capteurs. Il paraît évident que ces données doivent correspondre à une information perçue au même instant. L'étiquetage temporel de chaque donnée est nécessaire pour réaliser cette association temporelle. Cela implique l'existence d'une horloge unique pour dater tous les événements. Cela n'est pas réaliste dans un environnement distribué. Cela l'est encore moins dans une architecture mettant en œuvre des bus multiplexés. Des mécanismes d'étiquetage temporel existent et sont complétés par des estimateurs de retards et de dérive d'horloges entre les blocs physiques (calculateurs, capteurs, actionneurs). Un protocole tel que NTP [15] permet de corriger les datations des données marquées par un module tiers. Le principe de ce protocole repose sur un échange continu de datations entre deux partenaires dont on veut estimer la dérive temporelle. L'inconvénient majeur de ce principe est que cette liaison continue devra exister entre chaque module matériel. Un protocole de synchronisation d'horloge de précision est mis en œuvre au travers d'une norme IEEE1588 [15] pour l'étiquetage unifié du temps dans les systèmes gérés en réseau au travers de l'utilisation du multicast avec une précision de l'ordre de la microseconde.

Système à base de protocole d'échanges entre unités de traitement

Une fois admis le principe que seule une solution approximée et sous-optimale sera réalisable et opérationnelle, il faut se poser d'autres principes pour arriver à cette solution sous-optimale. Le premier principe est le suivant : à partir d'une découpe fonctionnelle en sous-blocs suffisamment élémentaires pour que des

solutions quasi-optimales puissent être exhibées, alors il faut faire l'hypothèse qu'en fonctionnement nominal chaque sous-bloc fait de son mieux et que ce « faire de son mieux » est suffisant pour assurer le bon fonctionnement de l'ensemble. Si le sous-bloc sort de son fonctionnement nominal, un indicateur de dysfonctionnement se positionne et l'ensemble du système change de mode de fonctionnement et passe dans un mode dégradé dans lequel le même principe s'applique avec des performances moindres. Dans un filtre de Kalman par exemple, la mesure de l'erreur résiduelle est un indicateur de fonctionnement nominal du filtre, lorsque sa variance devient trop importante, le filtre est en train de diverger et un changement de mode (ici la diminution du rapport signal sur bruit) permet de rester caler sur la piste avec des performances en précision moindres. Le domaine de recherche sur la prise de décision dans les systèmes distribués part du même principe : à savoir dans quelle mesure peut-on simplifier l'information correspondant à une prise de décision partielle conduisant par agrégation à une prise de décision globale et de combien on dégrade statistiquement cette prise de décision vis-à-vis d'un système centralisé de prise de décision. Une autre voie qui est actuellement explorée concerne l'identification de cibles : un sous-système infère l'identité d'une cible, il transmet à l'étage supérieur soit la cible la plus probable ; soit une liste de cibles en nombre fini, la plus probable en premier et ensuite par probabilité décroissante ; soit une liste constituée d'une cible avec une cotation associée correspondant à la certitude sur son identification. Chaque protocole d'échange conduit alors à des propriétés différentes de l'étage d'agrégation des identifications partielles, car plus l'information transmise augmente, plus la précision du jeu d'entrée de cet étage diminue alors que sa certitude augmente.

Mode d'accès au données Push || Pull – Data driven || Data request – Publication || Souscription

La recherche en fusion de données a évolué dans le sens où les données et les sources d'information sont en profusion et en volume important. Le mode d'accès qui était privilégié à ce jour est le mode PUSH. Sa fonction de base est de trier l'information, de la fusionner et d'en augmenter la sémantique. Il s'appuie sur la définition de chemins particuliers, les arcs réfléchis et les arcs réflexes qui organisent le mouvement des données du capteur, vers les traitements, puis les actionneurs.

L'évolution présentée a fait apparaître un mouvement du haut niveau vers le bas niveau qui organise le mouvement des données de contrôle nécessaire à la paramétrisation des blocs de traitement pour adapter les traitements et raffiner les raisonnements appliqués aux données. Des travaux portent aujourd'hui sur la recherche sélective en mode pull. Au niveau des traitements de validation croisée ou de mécanismes pour lever des ambiguïtés, il est souvent plus efficace de poser des questions à des capteurs particuliers sachant *a priori* que les réponses obtenues sont statistiquement plus discriminantes pour décider entre différentes hypothèses. Pour implanter ces mécanismes d'accès aux données, il peut s'agir d'un simple contrôle de la perception

à base de commutation d'arcs précompilés au moment de la conception du système, ou alors de la mise en place d'architecture de type Publication – Souscription. Ce sont souvent les contraintes temporelles qui décident de ce choix, la précompilation des arcs conduisant à des temps de réaction plus rapides face au déclenchement d'une alerte ou de la notification de la présence d'une information à laquelle on avait souscrit.

Modes de traitement : mode de départ || mode nominal || modes raffinés || modes dégradés

En partant du principe que pour un système complexe, un fonctionnement global opérationnel ne peut être obtenu que si chacun des sous-blocs fait de son mieux, il faut que chaque sous-bloc indique l'état dans lequel il se trouve vis-à-vis de ce concept « faire de son mieux ». C'est pourquoi il est nécessaire de découper chaque traitement suivant différents modes. Le découpage classique est mode de départ ou initialisation et mode nominal correspondant à un fonctionnement standard. Il est possible de raffiner cette notion en rajoutant différents modes dégradés dans lesquels la précision des résultats fournis diminue, mais leur certitude augmente et des modes raffinés pour lesquels la précision augmente peut-être au détriment de la certitude, mais cela permet de tester des hypothèses exclusives. Ces raisonnements basés sur des choix concernant la probabilité de détection et la probabilité de fausse alarme n'est pas nouveau en théorie de la décision [16], mais il reste d'actualité à chaque étage précédant un étage de prise de décision, d'autant plus que les compromis communément admis dans le passé évoluent face à la profusion des sources d'information. De plus, le niveau de sûreté de fonctionnement exigé aujourd'hui impose des spécifications élevées sur la certitude des résultats et donc favorise des mécanismes de fusion basés sur la redondance.

4. Conclusion

En ce qui concerne le modèle JDL, un travail important a été réalisé sur les deux premiers niveaux du modèle. Le travail de taxonomie a eu un impact important en mettant en exergue l'importance fonctionnelle des niveaux de tenue de situation et d'évaluation de l'impact et de la menace. Mais aujourd'hui encore, la tenue de situation et la compréhension de la scène restent problématiques. En premier lieu se pose le problème de la représentation et du codage d'une scène qu'elle soit issue de l'observation ou stockée sous forme de scénarios à l'intérieur de bases de données. Il en résulte l'apparition de travaux sur les ontologies des domaines militaires qui aboutissent à des standards de classification des objets qui peuvent être présents dans ce genre de scène. Si l'on cherche de plus à identifier et reconnaître des scènes ou des comportements d'objets isolés ou en groupe dans une scène, il faut définir une mesure de similitude dans l'espace du codage des scènes ou dans un espace projeté représentant une vision de cette scène. Les difficultés sont les

mêmes pour l'évaluation de la menace. Le raffinement utilisateur du modèle JDL correspond à l'ensemble des mécanismes *ad hoc* qui permet aux concepteurs de l'architecture de fusion d'implanter des mécanismes de contrôle adaptatif rendant le système opérationnel.

Ce modèle a fait la preuve qu'il était incomplet. Il a suscité de nombreux travaux d'adaptation, et la communauté a bénéficié dans le même temps des travaux réalisés par d'autres communautés, essentiellement celle de la vision active, et celle systématique de l'échange de données entre grandes organisations indépendantes. Chacune de ces approches comporte en elles-mêmes des limitations dues soit à la caractéristique d'approche réactive d'un côté, soit d'approche délibérative de l'autre.

Pour mettre en œuvre une solution intermédiaire à base de contrôle opportuniste, il faut être en mesure de définir une qualité de service correspondant à un objectif global (par exemple, la survie plus le respect du code de la route) et des objectifs locaux tel qu'un enchaînement de tâches permettant de franchir un croisement par exemple. C'est cette notion de qualité de service (un vecteur composé de 3 ou 4 paramètres) qui autorise un contrôle opportuniste des différentes actions en compétition de ressources sur le système.

Une autre piste reste l'approche sciences cognitives et la proposition d'architecture telle que celle proposée par Frankel. Un travail important reste à faire pour rendre opérationnel une proposition de ce type. Notre avis est que cette proposition correspond plus à une approche réactive et qu'il faudra encore un certain temps avant que les mécanismes de contrôle opportuniste qui entrent en jeu soient compris et élucidés.

Le défi reste donc aujourd'hui de combler le fossé entre l'agencement des traitements bas niveaux réalisé par les techniques actuelles de fusion association tri des données et une représentation haut niveau du système exogène observé (scène, champ de bataille) de façon à améliorer la compréhension instantanée (ou presque) de la situation. Un mélange de travail de type taxonomie, de création d'arc de type OODA, de contrôle opportuniste et de gestion des flux complexes semble être les éléments de base d'un modèle opérationnel de fusion de données.

Références

- [1] A. STEINBERG, C. BOWMAN, F. WHITE, "Revision to the JDL Data fusion Model". *Proc. of AeroSense Conference*, SPIE vol. 3719, pp. 430,441, 1999.
- [2] B. DASARATHY, "Optimal Features-In Feature-Out (FEIFE) Fusion for Decisions in Multisensor Environments", *Proc. Sensor Fusion: Architectures, Algorithms and Applications II*, SPIE vol 3376, 1998.
- [3] M. BEDWORTH, J. O'BRIEN, "The Omnibus Model: A New Model for Data Fusion?". *Proc. of FUSION'99*, Sunyvale, USA, 1999.
- [4] C.B. FRANKEL, M. BEDWORTH, "Control, Estimation and Abstraction in Fusion Architectures: Lessons from Human Information Processing". *Proc. of FUSION'00*, Paris, 2000.

- [5] E. BLASCH, S. PLANO, "Level5: User refinement to aid the fusion process", *Proc of Multisensors, Multisource Information Fusion: Architecture, Algorithms and Applications*, SPIE vol. 5099, 2003.
- [6] J. LLINAS, C. BOWMAN, G. ROGOVA, A. STEINBERG, E. WALTZ, F. WHITE, "Revisions and Extensions to the JDL Data Fusion Model II", *Proc. of FUSION'04*, Stockholm, 2004.
- [7] M. ENDSLEY, "Towards a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems". *Human Factors Journal*, vol. 37, pp. 32-64, 1995.
- [8] J. SALERNO, "Information Fusion: a High-Level Architecture Overview", *Proc. of FUSION'00*, Paris, 2000.
- [9] J. GAINEY, E. BLASCH, "Development of Emergent Processing Loops as a System of Systems Concept". *Proc. of AeroSense Conference*, SPIE vol 3179, pp 186-195, 1999.
- [10] B. MCGUINNESS, J. FOY, "A subjective measure of situation awareness: the Crew Awareness Rating Scale (CARS)", *Proc of the first Human Performance Situation Awareness, and Automation Conference*, Savannah, Georgia, 2000.
- [11] T. BASS, "The federation of critical infrastructure information via Publish-Subscribe Enabled Multisensor data fusion", *Proc. of FUSION'02*, Toronto, 2002.
- [12] A. CARZANIGA, D. ROSENBLUM, A. WOLF, "Design and evaluation of a Wide Area Event Notification Service", *ACM trans. on Computer Systems*, vol. 19, N°3, 2002, pp. 262-272.
- [13] "IEEE1451.2 A Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators-Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats", *IEEE Standards Department*, 445 Hoes Lane, PostOffice Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331.
- [14] R.N. JOHSON, "Proposed IEEE standard P1451.0, Defining the Core Features of Smart Sensors to Facilitate Broader Adoption", *Telemonitor, Inc, Sensors Expo*, June 2003.
- [15] "Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems", *Proc. Workshop on IEEE-1588 sponsored by NIST and the I&M Society of the IEEE*, publication NISTIR 7070, September 2003.
- [16] P.K. VARSHNEY, "Distributed detection and data fusion", *Springer ed.*, New York, 1997.



Roger Reynaud

Roger Reynaud est professeur à l'Université de Paris Sud, dans le département de Mesures Physiques de l'IUT d'Orsay. Il dirige le département de Recherche AXIS (Architecture et Conception de Circuits Intégrés et de Systèmes) de l'Institut d'Electronique Fondamentale qui regroupe 50 personnes. Ses domaines de recherche concernent la fusion de données, les problématiques de gestion de l'incertain, les mécanismes de gestions du temps dans les systèmes autonomes à base de capteurs, l'ingénierie des systèmes complexes autonomes, le contrôle des véhicules intelligents.



Samir Bouaziz

Samir Bouaziz est Maître de Conférence à l'Université de Paris Sud, dans la filière EEA de la faculté d'Orsay. Il dirige l'opération de Recherche « véhicule Intelligent » au sein du département AXIS (Architecture et Conception de Circuits Intégrés et de Systèmes) de l'Institut d'Electronique Fondamentale, opération qui regroupe une dizaine de personnes. Ses domaines de recherche concernent la problématique des systèmes autonomes temps réels, les mécanismes de gestions du temps au travers des bus de communication jusqu'aux capteurs, l'ingénierie des systèmes complexes autonomes, l'architecture des systèmes numériques, la cryptographie, le contrôle des véhicules intelligents.

S

