

Hermès Editions
Titre du livre : Ingénierie des systèmes d'information
Coordinateurs : Camille Rosenthal-Sabroux et
Corine Cauvet

Chapitre 8

Des systèmes d'information coopératifs aux agents informationnels

Eric ANDONOFF^{1,2} - Bernard ESPINASSE³ -
Chihab HANACHI² - Danièle HERIN⁴

1 - IRIT, Université Toulouse I, 118 Route de Narbonne, F-31062, Toulouse, France,
tel: ++33 5 61 55 63 22, Email : ando@irit.fr

2 - UT1, UFR Informatique, Place Anatole France, F-31042, Toulouse, France, tel: ++33
5 61 63 35 00, Email : andonoff@univ-tlse1.fr / hanachi@univ-tlse1.fr

3 - DIAM-IUSPIM, Université Aix-Marseille III, Campus Scientifique de Saint Jérôme,
F-13397, Marseille, Cedex 20, France, tel: ++33 4 91 05 60 30, Email :
bernard.espinasse@iuspim.u-3mrs.fr

4 - LIRM, Université Montpellier II, 161 rue Ada, F-34392, Montpellier, Cedex 5,
France, tel: ++33 4 67 41 85 00, Email : dh@lirimm.fr

Chapitre 8

Des systèmes d'information coopératifs aux agents informationnels

8.1. Introduction

A l'aube de ce nouveau siècle, les entreprises productrices de biens ou de services sont confrontées à un marché global et à la prise en compte d'une production centrée client. Ce contexte de production se traduit par une demande de produits et de services de plus grande qualité, disponibles dans des délais minimaux, moins chers et personnalisés [VERNADAT 94] [DE TERSSAC 92]. Pour faire face à ces exigences, les entreprises adoptent de nouveaux types d'organisation leur permettant d'accroître leur flexibilité et leur réactivité ; citons notamment l'entreprise étendue (extend enterprise) [BROWNE 94], l'entreprise virtuelle (virtual enterprise) [ROLSTADAS 94], l'ingénierie concourante [MOLINA 94], les systèmes holoniques de manufacture (holonic manufacturing systems) [HERATH 94] [DEEN 94] et enfin le D-CIM (Distributed-CIM) [SKJELLAUG 90].

Ces nouveaux types d'organisation présentent de nombreuses similitudes en mettant notamment l'accent sur deux points fondamentaux [ESPINASSE 95] : (i) la distribution de responsabilités et de capacités décisionnelles de l'entreprise conduisant à la caractérisation d'unités autonomes internes ou externes à celle-ci et (ii) le développement de politiques de coopération entre ces unités. Ainsi, une entreprise, ses différents départements, ses sous-traitants, ses clients et ses fournisseurs peuvent être appréhendés comme un réseau dont les nœuds sont des "unités autonomes" qui coopèrent et constituent l'entreprise distribuée. La coopération entre ces unités autonomes nécessite la coordination de processus décisionnels eux-mêmes distribués.

Les possibilités offertes par les nouvelles techniques de traitements de l'information et des connaissances, mais aussi et surtout le développement d'Internet

et des intranets, apportent de nouveaux challenges, notamment celui de développer de nouveaux systèmes d'information permettant d'une part d'accéder à des données et connaissances multimédia de sources d'information localisées partout de par le monde et d'autre part de supporter la coordination d'activités organisationnelles humaines et/ou artificielles associées aux nouveaux types d'organisation en permanente évolution que nous venons d'évoquer.

De tels systèmes d'information sont de fait distribués soit en faisant coopérer plusieurs sources d'information soit pour prendre en compte dans l'entreprise distribuée tout fait nouveau jusqu'à la complète répercussion de l'ensemble de ses effets. Cette prise en compte nécessite l'usage d'environnements informatisés eux-mêmes distribués et coopératifs dans lesquels les échanges tiennent une place centrale au même titre que les données et connaissances mémorisées. Dans la compréhension de la complexité de ces systèmes d'informations à concevoir, formées par l'interaction entre leurs propres parties, le problème essentiel est celui de l'autonomie de leurs parties et de leur coopération. Cette coopération, essentielle dans les architectures distribuées, pose notamment la question de comment faire coopérer des sous-systèmes, des unités, des composants conçus et maintenus par des équipes indépendantes.

Cette problématique a conduit à l'émergence récente du concept de Système d'Information Coopératif (SIC) définissant un domaine de recherche auquel sont associés des journaux, des conférences et workshops internationaux qui lui sont consacrés. Aussi, dans le cadre de cette encyclopédie, il est apparu pertinent d'aborder ce nouveau domaine, ses prémisses, ses premières recherches et ses projets.

Pour cela, nous montrons tout d'abord l'étendue du champ couvert par ce concept de SIC. Nous avons choisi de nous restreindre dans ce chapitre aux SIC centrés sur la notion d'agent, plus précisément d'agent informationnel (AI) conduisant au concept de SI orientés agents (Agent Oriented Information Systems ou AOIS) actuellement en émergence dans la communauté scientifique. Nous appréhenderons ces SIC centrés agents ou AOIS selon deux voies différentes associées à la stratégie d'introduction de cette notion d'agent dans les SI. La première consiste à "agentifier" le SI. Elle découle d'une évolution de l'ingénierie classique des SI et plus particulièrement de l'ingénierie des bases de données distribuées et fédérées ainsi que de l'usage récent de la technologie agent dans les bases de données actives et dans la coopération entre plusieurs sources d'information hétérogènes. La seconde voie nous vient de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD), plus particulièrement des Systèmes Multi-Agents (SMA). Elle appréhende le SI comme un SMA composé d'agents informationnels qui ont à coopérer afin d'exploiter ou coordonner différentes sources d'information hétérogènes. Nous montrerons ensuite en quoi ces deux voies convergent avant de conclure sur les diverses perspectives et opportunités associées à cette nouvelle génération de systèmes d'information.

8.2. Des systèmes d'information coopératifs aux agents informationnels

8.2.1. Problématique des SIC

Une première définition du concept de SIC et de son étendue peut être trouvée dans le manifeste collectif "Cooperative Information Systems : a Manifesto" [DE MICHELIS 97] qui est issue des réflexions de plusieurs chercheurs européens et canadiens. Les SIC y sont introduits comme un nouveau domaine de recherche essayant d'investiguer de façon systématique les synergies existant entre trois principaux champs de recherche qui sont : (i) la technologie des systèmes d'information, (ii) la pratique du travail collaboratif (CSCW : Computer-Supported Cooperative Work) et (iii) les théories de la modélisation et de la planification organisationnelles. Les auteurs de ce manifeste partent du fait que le changement managérial est le but ultime de ces trois champs.

Afin de cerner la contribution de ces SIC à ce changement managérial, les auteurs proposent un cadre conceptuel articulé autour de trois facettes complémentaires : (i) la facette "système", (ii) la facette "collaboration de groupe" et (iii) la facette "organisationnelle". La facette "collaboration de groupe" concerne les personnes qui travaillent sur un même processus (par exemple traitement d'une commande client) et doivent en conséquence se coordonner, gérer l'aléa et changer leur pratiques après discussion et apprentissage. Les problèmes posés par cette facette sont en partie résolus grâce à la mise en œuvre d'outils personnels ou de collecticiels. Le problème majeur posé par la facette "système", associée à la technologie de traitement de l'information, est la collaboration de groupe, qui par sa nature, nécessite un haut niveau de flexibilité et de malléabilité que peuvent en partie résoudre l'usage de modèles organisationnels. Enfin la facette "organisationnelle" concerne les objectifs et processus formels que s'est fixé la structure organisationnelle.

A partir de ces facettes, les auteurs définissent un SIC comme un ensemble "d'agents computationnels" qui partagent continuellement des objectifs avec d'autres systèmes d'information, des agents humains aussi bien qu'avec l'organisation au sein de leur environnement opérationnel. Ils mettent ensuite l'accent sur les stratégies mises en œuvre sur ces trois facettes pour accompagner le changement managérial et ils évaluent les propagations de ces stratégies d'une facette à l'autre. Afin de réduire les distorsions résultant de ces propagations, les auteurs esquissent enfin une architecture logicielle de base permettant le développement de SIC au dessus d'un existant organisationnel et technique.

La définition d'un SIC proposée dans ce manifeste illustre bien l'étendue du concept avec ses dimensions collaboration de groupe (pratiques), organisationnelles (managériale) et techniques (opérationnelle). Dans cette définition, le SIC est appréhendé au travers de la notion d'agent, les agents partageant continuellement des objectifs communs.

8.2.2. *Des SIC aux AOIS (Agents Oriented Information Systems)*

Le concept de SI orienté agent (AOIS) est bien appréhendé par Wagner [WAGNER 99] qui distingue trois stratégies différentes d'introduction de la notion d'agent dans les SI : (i) un agent peut être perçu comme une fonctionnalité complémentaire d'un SI au moyen de composants logiciels à base d'agents, (ii) une "agentification" du SI et (iii) la représentation explicite d'agents constituant le SI.

La première stratégie consiste principalement à développer des interfaces utilisateur adaptatives ou de nouveaux services de support à la coopération; elle correspond aux propositions déjà évoquées dans le paragraphe précédent par les auteurs du manifeste selon l'architecture logicielle qu'ils proposent.

Les deux dernières stratégies, qui peuvent être étroitement combinées, introduisent la notion d'agent à un niveau d'intégration plus avancé et caractérisent bien le concept d'AOIS. Aussi allons nous nous y intéresser plus particulièrement. Ces deux stratégies font référence aux travaux développés en IAD, plus particulièrement en SMA selon notamment le paradigme AOP (Agent Oriented Programming) proposé par Shoham [SHOHAM 93]. La stratégie "d'agentification" d'un SI consiste à lui adjoindre des composants d'état mentaux (connaissances-croyances-engagements) et un langage de communication (comme par exemple KQML [PATIL 92] ou ACL-FIPA [FIPA 97]) lui permettant de communiquer avec d'autres SI agentifiés. Ainsi agentifié, un SI traite ses informations comme ses connaissances ou ses croyances, dispose d'états mentaux associés à ses perceptions et aux engagements qu'il entretient, et utilise un langage de communication pour communiquer avec d'autres agents. Pour cela le schéma du SI doit être partitionné, ses croyances et ses engagements correspondent à des tables spécifiques. Wagner qualifie ce type d'agent de "KCP agent" pour Knowledge-Perception-Commitment.

Dans la troisième stratégie (la représentation explicite d'agents constituant le SI), le SI est conçu comme un véritable SMA au sens défini en IAD. Cela suppose que les méthodes actuelles d'analyse et de conception de SI orientées objet telles que OMT ou UML soient révisées et étendues au concept d'agent. Au concept d'objet maintenant familier à ces méthodes s'ajoute une modélisation agent permettant la définition du SMA support du SIC.

Dans la suite de cet article nous appréhenderons ces AOIS selon deux voies :

- L'approche "agentification du SI" (ou encapsulation du SI), est directement associée à une évolution de l'ingénierie classique des SI et plus particulièrement de l'ingénierie des bases de données.
- L'approche "représentation explicite d'agents" est issue de l'IAD, plus particulièrement des SMA et est principalement centrée sur la coopération entre unités autonomes appelés agents informationnels, chargés d'exploiter et de coordonner différentes sources d'information hétérogènes.

8.3. Des bases de données aux agents informationnels

Cette section montre comment la notion de coopération a progressivement été introduite dans les BD. Elle présente tout d'abord la mise en œuvre limitée de cette notion dans les multibases et les BD fédérées. Elle explique ensuite comment la technologie agent est utilisée dans les BD pour mettre en œuvre la notion de coopération ; ceci conduit naturellement à la notion d'Agent Informationnel.

8.3.1. Coopération dans les multibases et les bases de données fédérées

8.3.1.1 Multibases et bases de données fédérées

La notion de coopération est apparue dans le domaine des Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGBD) avec les Multibases et les BD fédérées [SHETH 90].

Un SGBD multibase est composé d'une collection de SGBD hétérogènes et coopérants. Les SGBD composants peuvent être hétérogènes en terme de modèles servant à la description des données qu'ils stockent, ou de langages servant à interroger ces données, mais également en terme d'ordinateur servant au stockage des données (aspects matériel, logiciel et support de communication) [SHETH 90], [HURSON 96].

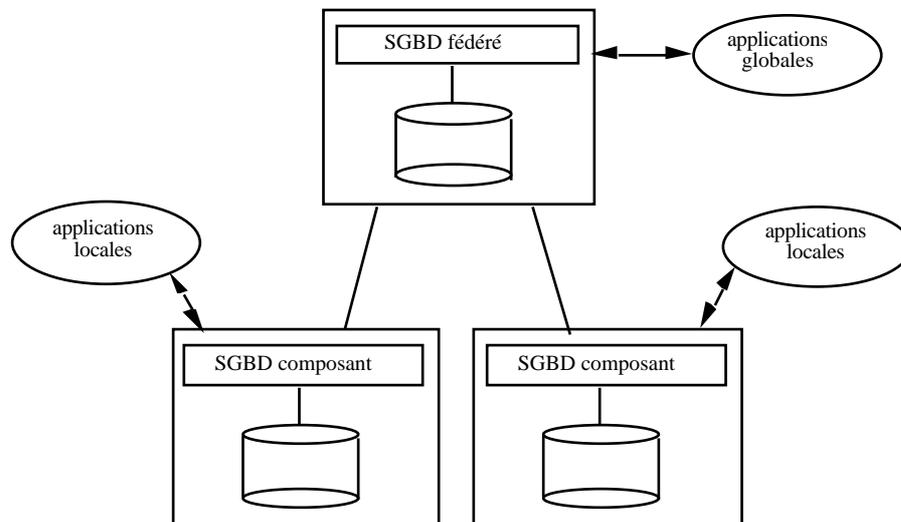


Figure 8.1. Architecture d'un SGBD fédéré

Un SGBD fédéré [BUKHRES 96a] et un SGBD multibase dont les SGBD composants sont autonomes. Chaque SGBD composant conserve le contrôle de ses

propres applications : il y a distinction entre les applications locales d'un SGBD composant qui s'exécutent sans faire référence au SGBD fédérateur et les applications globales relatives au SGBD fédérateur. L'architecture d'un SGBD fédéré est décrite dans la figure 8.1.

Le processus de spécification d'un schéma fédéré, présenté dans [SHETH 90], est décrit dans la figure 8.2. Ce processus s'articule autour de trois principales étapes. Au départ les différentes BD intervenant dans la fédération sont décrites par un schéma local. Ce schéma local définit, à l'aide du modèle du SGBD utilisé pour gérer la base, la structure (et le comportement) des données (objets) stockées dans la BD. Dans la première étape du processus, les schémas locaux sont transformés en schémas composants, c'est-à-dire en schémas décrits selon le modèle du SGBD fédéré appelé aussi modèle canonique. Dans la plupart des SGBD fédérés, c'est soit le modèle relationnel, soit le modèle objet de l'ODMG, soit encore un modèle conceptuel qui joue le rôle de modèle canonique. Dans la deuxième étape les schémas composants sont filtrés pour spécifier les schémas exportés. Ces derniers contiennent uniquement la structure (et le comportement) des données (objets) que les SGBD composants mettent à disposition du SGBD fédéré. Enfin, dans la troisième étape, les différents schémas exportés sont regroupés pour construire le schéma fédéré.

L'hétérogénéité et l'autonomie des SGBD stockant les BD composantes soulèvent de nombreux problèmes pouvant se situer tout au long du processus de spécification précédemment évoqué. On identifie trois principales difficultés relatives à la transformation des schémas locaux en schémas composants (étape 1), à l'intégration des schémas exportés donnant le schéma fédéré (étape 3) et à la gestion même du schéma fédéré.

a) Difficultés dans la transformation des schémas locaux en schémas composants.

Cette transformation est délicate du fait des différences existant entre les formalismes des schémas locaux et composants. Ainsi la correspondance entre les concepts des modèles relationnel et objet n'est pas facile et continue à faire l'objet de travaux de recherche. On peut notamment citer la découverte des relations d'héritage dans un schéma relationnel [LAMMARI 99]. Notons également la difficile traduction des contraintes d'intégrité (par exemple la traduction de triggers relationnels en objet).

b) Difficultés dans l'intégration des schémas composants. Cette intégration nécessite la résolution de conflits de deux types : les conflits syntaxiques et les conflits sémantiques [BUKHRES 96a]. Les conflits syntaxiques sont résolus lors de la spécification du schéma fédéré à partir des schémas exportés. Ainsi, deux attributs de même nom issus de deux schémas exportés différents et décrivant des informations différentes sont différenciés au niveau du schéma fédéré. Ces conflits peuvent également porter sur des contraintes inhérentes aux schémas exportés concernés [SHETH 92]. Les conflits sémantiques se posent lors de l'intégration des données issues des différentes BD composantes. Il peut arriver que ces données décrivent la même information (par exemple un prix) tout en ayant des sémantiques ou des ordres de grandeurs différents (par exemple, un prix hors taxe et un prix toutes taxes ou un

prix en francs et un prix en euros). La résolution de ce type de conflit peut également intervenir lors de la spécification du schéma fédéré [GARCIA-SOLACO 96].

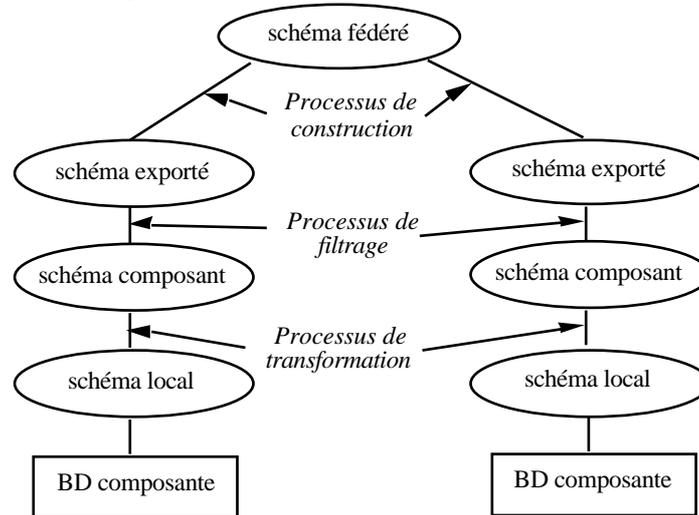


Figure 8.2. Processus de spécification d'un schéma fédéré [SHETH 90]

c) *Difficultés dans la gestion même du schéma fédéré.* Le rôle du SGBD fédéré qui doit gérer les schémas fédérés (et notamment leur évolution due à l'évolution des schémas locaux), les requêtes fédérées (une requête soumise au SGBD fédéré est décomposée en sous requêtes soumises aux SGBD composants concernés ; les différents résultats retournés par les SGBD composants sont fusionnés au niveau du SGBD fédéré), les transactions fédérées (mise en place de mécanismes permettant le contrôle de concurrence, les opérations de commit et de rollback) portant sur des SGBD autonomes et hétérogènes, la communication avec les différents SGBD hétérogènes de la fédération.

Ces problèmes sont totalement occultés à l'utilisateur qui travaille sur le SGBD fédéré et ne voit qu'un schéma global décrit selon le modèle canonique. Il interroge ce schéma à l'aide du langage du modèle sans se soucier de la localisation des données interrogées. Il ne précise par conséquent aucun chemin d'accès aux SGBD composants.

Plusieurs SGBD multibases et fédérés ont été proposés dans la littérature. Les références bibliographiques [THOMAS 90], [LITWIN 94], [RONCARIO 94] et [BUKHRES 96b] font un bilan intéressant de ces différents systèmes. En Europe, le SGBD fédéré IRO-DB [GARCIA-SOLACO 96] fait référence. Les travaux autour des SGBD fédérés demeurent nombreux car il reste encore bon nombre de problèmes à résoudre. [EFD 97] fait un bilan des axes de recherche intéressants à développer. L'axe de recherche le plus actuel est probablement l'intégration de données issues du Web. C'est l'objectif du projet MIRO-WEB [GARDARIN 99].

8.3.1.2 Insuffisance de la coopération dans les BD fédérées

Un SGBD fédéré se définit donc comme une collection de SGBD composants autonomes, hétérogènes, et qui coopèrent entre eux [SHETH 90][BUKHRES 96a]. Le terme coopération traduit ici la présence de communication et de collaboration qui existe entre le SGBD fédéré et ses SGBD composants. La communication se résume à un échange d'informations. Par exemple, le SGBD fédéré sollicite un SGBD composant en lui demandant d'exécuter une requête ; en réponse, le SGBD composant retourne le résultat de la requête. Il y a également collaboration car les SGBD composants contribuent à la résolution d'une requête globale.

Cette communication et cette collaboration ont cependant toujours lieu entre le SGBD fédéré et ses SGBD composants (matérialisées dans la figure 8.3 par les flèches épaisses). Le SGBD fédéré centralise la fédération. Il connaît les différents schémas composants de la fédération et sait s'adresser aux SGBD correspondants pour récupérer des données.

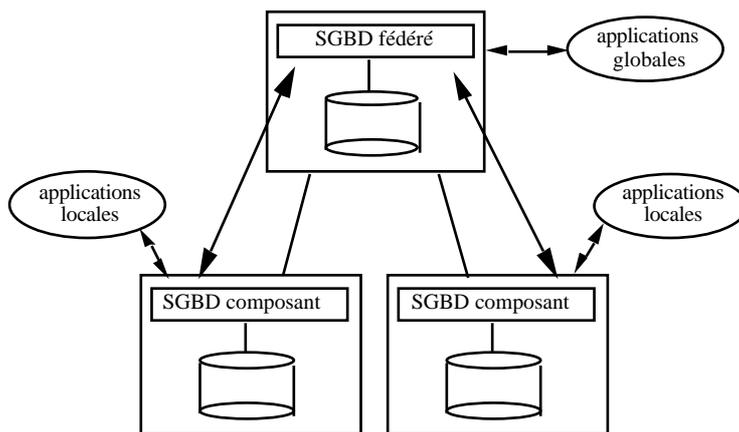


Figure 8.3. Communication et collaboration dans un SGBD fédéré

Cependant, il est clair que les notions clés de coopération et d'autonomie qui existent dans les SGBD fédérés sont moins riches que dans l'approche agent.

La collaboration mise en œuvre dans les BD Fédérées est une collaboration simple (une addition de compétences, au sens de [FERBER 95]) dans la mesure où le travail de coordination se résume à une simple répartition des tâches par le SGBD fédéré. Par ailleurs, et du fait de l'indépendance de sous-problèmes à traiter par chaque BD composante, il n'y a pas de communication entre elles.

Chacune des BD composant le système ne peut pas être considérée comme un agent si l'on se réfère aux quatre propriétés d'un agent [WOOLDRIDGE 95] : autonomie, réactivité, pro-activité et aptitude sociale. La majorité de ces aptitudes

supposent d'avoir des objectifs que les BD ne possèdent pas. Examinons de manière plus précise chacune de ces propriétés :

- L'autonomie existe partiellement car chaque SGBD composant a le contrôle de ses propres données. Il y a tout d'abord une autonomie de conception car les schémas locaux des SGBD composants sont gérés par un administrateur qui leur est propre. Il y a ensuite une autonomie d'exécution car les applications locales aux SGBD composants, qu'elles soient déclenchées par une application locale ou globale, s'exécutent sous contrôle total du SGBD concerné. Il y a également une autonomie de communication en ce sens que les SGBD composants décident de quand et de comment ils répondent à une sollicitation du SGBD fédéré. Enfin, il existe une autonomie d'association puisque les SGBD composants décident de leur participation ou de leur non participation à la fédération [HURSON 96]. En revanche, une BD ne prend pas de décision individuelle (sans sollicitation extérieure) pour déterminer son activité en fonction de son état.

- La réactivité est la seule propriété que possèdent véritablement les BD dans la mesure où elles savent réagir aux événements qui se produisant dans leur environnement : utilisateur, autres systèmes et dans notre cas le système fédéré.

- La pro-activité, qui définit la capacité d'un agent à prendre des initiatives, est complètement absente dans la mesure où une BD n'a pas d'objectif et ne prend donc pas d'initiative pour les atteindre. Dans notre cas, les BD composantes ne prennent aucune initiative pour concourir à la réalisation de l'objectif global, qu'elles ignorent par ailleurs. De plus, elles n'ont aucune connaissance de la fédération à laquelle elles appartiennent. Il n'y a donc pas de communication et de collaboration directe entre les BD composantes.

- Les BD ne possèdent aucune aptitude sociale puisqu'elles ne sont pas capables de mener des conversations et des négociations à l'aide de langages et protocoles de communication de haut niveau.

8.3.2. La technologie agent dans les BD et les SI

L'introduction de la technologie agent dans les BD et les SI est motivée par différentes possibilités d'applications :

- La mise en œuvre de la notion de coopération entre BD, afin d'avoir un support efficace pour implanter des SI coopératifs c'est-à-dire supportant la communication, la collaboration, la coordination et la négociation entre les différentes BD stockant les données des SI [DE MICHELIS 97].

- La coopération entre SI, pour permettre la mise en place d'entreprises virtuelles ou pour le commerce électronique [ROLSTADAS 94].

- La mise en œuvre de systèmes permettant non plus de répondre à des requêtes mais plutôt à des problèmes (Information Gathering) [OATES 94], la formulation d'un problème ne fixant pas a priori le format des réponses, contrairement aux requêtes dans les bases de données.

- La résolution de problèmes spécifiques aux BD, tels que la résolution de conflits lors de l'intégration de sources de données, la propagation des modifications des sources de données vers un schéma intégré (par exemple pour la maintenance d'un entrepôt de données ou d'un schéma fédéré) [MOTZ 98].
- L'adaptation des BD à des environnements ouverts, réactifs et autonomes, tel que le Web (par exemple pour permettre l'intégration de documents issus du Web dans une BD [GARDARIN 97]).

L'intégration de l'approche agent dans les SI et les BD donne lieu actuellement à de nombreux travaux. Ces travaux sont notamment liés à (i) la modélisation des concepts de l'approche agent dans les BD et les SI, (ii) l'introduction du concept d'agent dans les BD actives et (iii) l'utilisation de la technologie agent dans les BD fédérées. Les paragraphes suivants font le point sur ces trois types de travaux.

8.3.2.1 *Modélisation des concepts de l'approche agent dans les BD et les SI*

Des travaux de modélisation des concepts de l'approche agent dans les BD et les SI sont actuellement menés par Wagner [WAGNER 99]. Pour conduire cette modélisation, Wagner propose de représenter les concepts de l'approche agent dans une BD et de prendre en compte la notion d'agent dès la phase de conception d'un SI.

Dans un premier temps, Wagner suggère "d'agentifier" les SI, c'est-à-dire de considérer les SI comme des agents. Il indique une solution qui consiste à implanter dans une BD les propriétés des agents (croyances et connaissances, perceptions, capacités, engagements) et à utiliser le langage SQL pour mettre en œuvre un langage de communication entre agents. Cette solution étend le SGBD en introduisant un gestionnaire d'événements et d'actions à réaliser, et augmente SQL et PL-SQL pour permettre le stockage des perceptions, capacités et engagements des agents. Ainsi :

- Les croyances et connaissances des agents sont modélisées comme des instances de tables dans une BD.
- Les perceptions des agents sont des événements de communication (par exemple, la commande d'un produit suite à la baisse d'un stock) ou des événements provenant de l'environnement (par exemple, l'achat d'un produit par un client). Des commandes SQL sont ainsi proposées pour le stockage et la gestion de ces événements.
- Les capacités correspondent à des actes de communication (par exemple, la réception d'un bon de commande de produits) ou à des actions physiques (par exemple, la sortie d'un produit du stock). D'autres commandes SQL permettent la création et la gestion des actes de communication et des actions.
- Les engagements sont pris entre plusieurs agents. On distingue les engagements qu'un agent a pris, des engagements que d'autres agents ont pris avec lui. Les engagements peuvent déclencher des actions à réaliser ou des vérifications de condition. Les engagements de type action sont représentés dans des tables et sont couplés avec des actions ou des événements.

- Les engagements de type vérification de conditions sont spécifiés à l'aide de règles de réaction [WAGNER 99]. Ces règles sont composées d'un événement, d'une condition, d'une action à déclencher, de croyances à stocker et d'engagements à prendre.

L'implantation de la communication entre agents est faite à l'aide du langage SQL. [WAGNER 99] dresse un tableau de correspondance entre quelques actes de communication d'un langage de communication (tel que KQML) et des ordres SQL. Notons que Wagner ne donne que quelques correspondances ACL/SQL.

Dans un second temps, Wagner souligne l'importance de la prise en compte de la notion d'agent lors de la phase de conception d'un SI. Il préconise d'étendre les méthodes et modèles de conception de SI afin de distinguer les objets (passifs) des agents. L'objectif est de décrire la sémantique de la dynamique des SI. [WAGNER 99] propose un modèle de conception de SI orienté agent, appelé AORM (Object-Agent-Relationship Model), dans un état trop embryonnaire pour faire l'objet d'une présentation détaillée.

8.3.2.2 *La technologie agent et les BD actives*

Les BD actives [WIDOM 95] sont une extension des bases de données permettant la modélisation de comportement en réaction à des événements se produisant sur les objets d'une BD ou dans l'environnement. Le comportement est exprimé à l'aide de règles de production dont la syntaxe la plus fréquente est la suivante : Quand <Événement> Si <Condition> Alors <Action>.

Quand un événement E se produit, si la condition C est vérifiée, l'action A doit être exécutée. Plus précisément, les événements, qui n'exigent pas une intervention de l'utilisateur, peuvent être des opérations classiques sur la BD (ajout, suppression, mise à jour), des événements temporels (date absolue ou relative) ou des signaux provenant d'autres applications. La partie condition exprime une situation qui doit être satisfaite par les objets de la base de données. L'action est un programme qui peut inclure des opérations aussi diverses que la notification d'utilisateurs, des opérations sur la base de données ou l'invocation d'autres outils.

Les BD actives ont de nombreuses applications [KAPPEL 96] parmi lesquelles nous pouvons citer la synchronisation des étapes d'un processus tel qu'un workflow, l'expression de la permission ou de l'obligation d'agir, la vérification automatique de contrainte d'intégrité, la maintenance de vues concrètes, la résolution coopérative de problèmes [BERDTSSON 96].

Les BD actives offrent donc à la fois les fonctions classiques des BD, et un langage d'expression de comportement. Aussi, si l'on souhaite implémenter un agent capable de coopérer avec un SGBD, il est naturel de songer à une implémentation à l'aide de règles actives. Ainsi, [BAILEY 95] présente une étude approfondie comparant les concepts des BD actives à ceux de l'architecture agent BDI (Believe Desire Intention). Il établit les rapprochements suivants :

- Les croyances qui décrivent l'état du monde et l'état interne d'un agent sont simplement représentées par des données stockées dans la base de données. La technologie des BD offre en plus des mécanismes de vérification de l'intégrité des données applicables aux croyances.
- Chaque règle implémente un plan. La réalisation d'un but, composé de plusieurs plans, peut être atteinte par l'exécution en chaîne de plusieurs règles actives et de procédures de mise à jour de la BD. Cependant, [BAILEY 95] remarque que les plans exécutés par les agents sont souvent des processus longs qui se différencient ainsi des opérations ou des transactions dans les BD.
- Le moteur d'inférences, contrôlant l'exécution de règles actives, est enfin assimilé à l'interprète de l'agent.

[HANACHI 98] montre également comment une BD active permet d'enregistrer, suivre et réagir dans le temps aux événements associés à des contrats définis selon le protocole du "contract-net". Ce protocole d'allocation de tâches est basé sur la notion d'appel d'offre. La BD structure et enregistre les contrats et leur histoire alors que les règles actives synchronisent les différentes étapes du protocole.

8.3.2.3 *La technologie agent et les BD fédérées*

La technologie agent est utilisée pour modéliser la fédération de BD [TURKER 97]. Les propriétés d'autonomie, de coopération, de réaction (face à des événements) ou d'action (pour résoudre un problème donné) des agents sont adaptées pour modéliser la communication entre les différentes BD participant à la fédération. Deux architectures basées sur les agents sont possibles. L'une est dite centralisée ; l'autre est dite décentralisée. Dans chaque architecture, les agents sont utilisés comme des outils de coopération entre les différentes BD de la fédération.

L'architecture centralisée introduit un agent fédérateur et des agents médiateurs pour la modélisation d'une BD fédérée. Elle est illustrée par la figure 8.4.

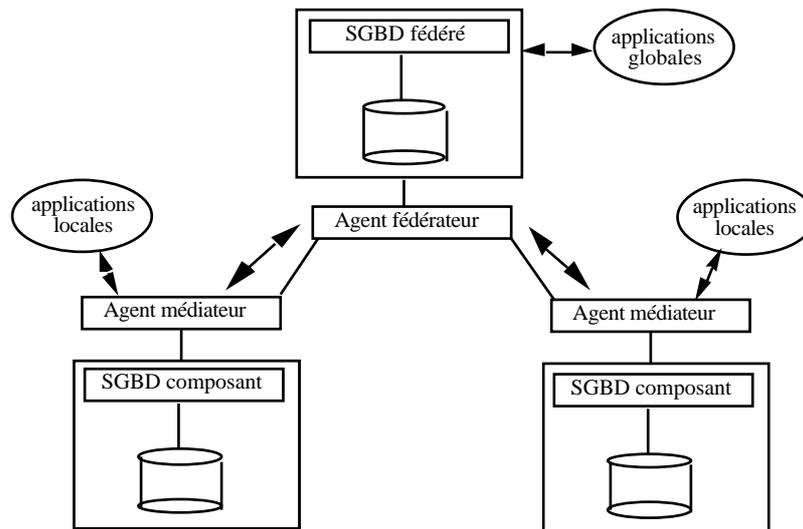


Figure 8.4. Architecture centralisée

Les agents médiateurs sont relatifs aux SGBD composants. Ils sont responsables des accès à ces SGBD, que ces accès soient locaux (application locale) ou globaux (application globale provenant de la fédération). Dans ce dernier cas, ils coopèrent avec l'agent fédérateur qui gère les accès vers le SGBD fédéré. Plus précisément, un agent médiateur doit :

- Gérer l'hétérogénéité des modèles du SGBD composant et du SGBD fédéré. L'agent médiateur est responsable des conversions entre le modèle (de données ou de requêtes) du schéma fédéré et le modèle du schéma local.
- Gérer les transactions fédérées en coopérant avec l'agent fédérateur. L'agent médiateur doit être capable de valider ou d'annuler des transactions locales en fonction de la validation ou de l'annulation des transactions fédérées. Il doit également gérer le contrôle de concurrence entre différentes applications locales ou globales.
- Gérer l'intégrité des données en prenant en compte, au niveau des SGBD composants, les règles d'intégrité spécifiées dans le schéma fédéré et en signalant à l'agent fédérateur toute modification du schéma local du SGBD composant ou des contraintes associées.

L'agent fédérateur fait le lien entre le SGBD fédéré et les différents agents médiateurs de la fédération. Il gère notamment :

- L'évolution du schéma fédéré. Il intègre ainsi les mises à jour des schémas locaux au niveau du schéma fédéré ainsi que les mises à jour de la fédération elle-même (ajout ou suppression des SGBD composants).
- L'exécution des requêtes fédérées. Cette exécution nécessite la décomposition de la requête globale en requêtes locales, la conversion des données retournées (du modèle du schéma local en modèle du schéma fédéré) et la fusion de ces résultats.
- La gestion des transactions fédérées.

L'architecture décentralisée s'oppose à l'architecture centralisée en ce sens qu'elle supprime l'agent fédérateur et répartit ses connaissances entre les différents agents médiateurs. Chaque agent médiateur possède donc sa propre connaissance de la fédération ; il peut alors communiquer directement avec les autres agents médiateurs des différents SGBD de la fédération. La figure 8.5 illustre cette architecture. Cette approche se veut plus proche de la philosophie agent. Elle est décentralisée puisque le comportement et les connaissances de l'agent fédérateur sont distribués entre les différents agents médiateurs. L'autonomie des SGBD composants est également accrue puisqu'il y a autonomie de décision (ce qui n'est pas le cas dans un SGBD fédéré classique).

Ces deux architectures, centralisée ou décentralisée, répondent à des besoins différents. La première convient bien pour la mise en place d'un système d'information individuel pour lequel les données sont stockées dans une BD fédérée. La seconde est adéquate pour l'implantation d'un ensemble de SI coopérant entre eux pour une résolution de problème. Cette architecture est particulièrement adaptée aux Entreprises Virtuelles ou au Commerce Electronique.

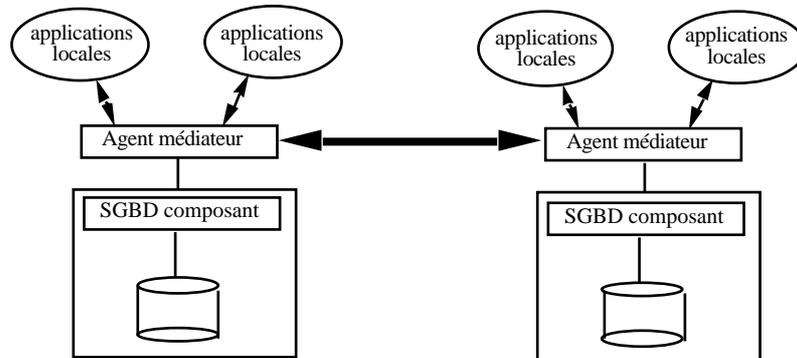


Figure 8.5. Architecture décentralisée.

8.3.3. Conclusion

La coopération a été initialement introduite dans les BD à travers les multibases et les BD fédérées. Nous avons montré les limites de la coopération dans ce type de systèmes qui ne peuvent en aucun cas être comparés à des systèmes agents relativement aux critères d'autonomie, de réactivité, de pro-activité et d'aptitudes sociales. Des travaux plus récents et prometteurs, regroupés sous le terme de Systèmes d'Information Orientés Agent, introduisent la technologie agent dans les SI (cf. conférences AOIS'1999 et AOIS'2000) pour permettre la mise en œuvre effective des notions de communication, coordination, collaboration et négociation entre SI. Nous avons développé un point de vue technique qui montre d'une part comment modéliser les concepts de l'approche agent avec une BD active ou conventionnelle, et d'autre part, comment articuler l'architecture d'une BD fédérée autour de la notion d'agent. En parallèle à ces travaux, menés essentiellement par des chercheurs en bases de données, des travaux ont été réalisés par des chercheurs en IAD qui ont expérimenté leurs concepts sur des systèmes d'information. Ces derniers travaux font l'objet du paragraphe suivant.

8.4. De l'IAD aux agents informationnels

Depuis une dizaine d'années, l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) [BOND 88], se pose comme un domaine dynamique de recherche qui donne lieu à un nombre croissant d'applications dans divers secteurs. Cette branche spécialisée de l'intelligence artificielle se définit généralement comme l'étude de systèmes dans lesquels évoluent plusieurs entités, dites "agents", qui sont autonomes et qui ont la capacité d'agir et de travailler dans un environnement commun, au prix de conflits éventuels.

Dans la communauté scientifique on distingue généralement une division du domaine de l'IAD en deux principaux sous domaines : les systèmes multi-agents (SMA) et la résolution distribuée de problèmes [DURFEE 94], [SICHMAN 92], [CHAIB-DRAA 95], [MOULIN 96]. La Résolution Distribuée de Problèmes (RDP) et la Résolution Coopérative et Distribuée de Problème (RCDP) ont comme stratégie commune de décomposer un problème en sous-problèmes traités par des unités de résolution de problème semi-autonomes. La différence fondamentale entre ces deux approches provient de la capacité de ces unités, modélisées sous forme d'agents, à interagir de manière coopérative ou non [LESSER 90]. Dans les systèmes multi-agents l'objectif est principalement d'étudier comment plusieurs agents ayant des préférences individuelles peuvent interagir dans un environnement particulier tel que tous consentent d'agir en vue d'atteindre des buts communs. Ainsi, dans la résolution distribuée coopérative ou non de problèmes, on tente d'obtenir des propriétés comme la robustesse et l'efficacité de systèmes constitués de plusieurs agents ayant des propriétés fixes [DURFEE 94] dans le but de résoudre un problème particulier alors qu'en SMA on étudie comment des agents autonomes ayant des

objectifs potentiellement divergents peuvent en arriver à travailler ensemble pour atteindre des objectifs communs.

Les SMA s'avèrent des outils très intéressants à plusieurs titres [ESPINASSE 98]: (i) tout d'abord de par leur puissance en tant qu'outil de modélisation de connaissances, plus précisément leur capacité à décrire des domaines complexes et leur souplesse permettant la mise à jour des modèles ; (ii) ensuite de par leur capacité d'exécution et/ou de simulation permettant la validation de modèles et enfin (iii) de par leur capacité à appréhender des notions telles que la distribution, la coopération, la coordination ou la négociation. En conséquence, les SMA ont été largement utilisés en tant qu'outil de modélisation pour décrire des systèmes industriels complexes [FOX 85], [JENNINGS 94], [CAMARINHA 94] [SPI NOSA 95]. Ils ont aussi donné lieu à un nombre croissant d'applications industrielles opérationnelles apportant des solutions originales et efficaces notamment dans les domaines de la gestion de production, de l'ingénierie simultanée, du pilotage ou encore de la gestion de systèmes d'information [KOUISS 95], [PARUNAK 96], [CHAIB-DRAA 95], [CLOUTIER 99], [TRAN VOUEZ 98].

Dans le contexte des SIC, le caractère fondamentalement distribué et orienté service de ces systèmes, qu'ils se développent ou non sur Internet, conduit à l'émergence d'agents essentiellement spécialisés dans le traitement d'information, d'où leur nom d'agents informationnels (AI). Un AI peut être défini comme un ensemble de modules logiciels qui ont des compétences particulières qui transforment les SI composants, par nature passifs, en composants actifs capables de raisonner sur leurs fonctionnalités et leurs compétences, et d'interagir pour résoudre un problème donné. De tels agents [KLUSCH 99] peuvent avoir des rôles bien différents comme par exemple chercher, acquérir, analyser des données stockées dans des sources d'informations hétérogènes, informer des utilisateurs lorsque de nouvelles données pertinentes apparaissent, négocier dans la fourniture ou l'acquisition d'information, de biens ou de services, justifier la pertinence, la qualité et la sûreté d'une information ou enfin s'adapter et d'évoluer.

Dans la plupart des cas, ces agents s'organisent en systèmes et, comme dans les SMA, ils doivent pour coopérer, partager des buts communs, se comprendre l'un l'autre, communiquer leur buts et tâches, être capables de partager des données et des connaissances. Aussi, la plupart des travaux déjà développés en IAD s'appliquent aux AOIS notamment (i) l'organisation et la structure de SMA, (ii) l'interaction, la communication entre agents, (iii) les rôles de chaque agent et la cohésion d'un groupe d'agents, (iv) la coordination, la coopération et la négociation entre agents.

Parmi les projets de développement des AOIS, deux approches ont retenu plus particulièrement notre attention : d'une part les systèmes de recherche et d'intégration "intelligente" d'information, souvent appelés "Cooperative Information Gathering", qui commencent à être utilisés dans le commerce électronique. Nous illustrons cette approche par la présentation du projet InfoSleuth. D'autre part, le domaine de l'entreprise virtuelle, problématique actuellement importante au sein des SI, où nous

avons retenu la gestion des chaînes logistiques qui ont fait l'objet de plusieurs projets d'AOIS.

8.4.1. Agents informationnels pour la recherche et l'intégration d'information

Pour faire face à l'explosion de l'information disponible sur les réseaux, due en particulier au développement d'Internet et du web, des moteurs et des systèmes sont actuellement proposés. Ces moteurs, comme par exemple Alta Vista, sont basés sur la fréquence de mots clés dans les documents et fournissent, en réponse à une requête posée par l'utilisateur une liste d'URLs (Universal Resource Location) souvent conséquente et pas toujours pertinente. Des moteurs de recherche de plus haut niveau, appelés "moteurs de méta recherche", comme par exemple MetaCrawler, commencent à voir le jour. Ces derniers construisent, à partir des documents trouvés par les moteurs de recherche, des groupes de documents, en fonction de critères tels que la similarité des documents ou la redondance des URLs. Les techniques utilisées par les moteurs de méta recherche, sont souvent les mêmes que celles utilisées par les moteurs de recherche classiques. Dès lors ces moteurs fournissent également trop de données à l'utilisateur. Dans ce contexte, la technologie agent, à base d'agents informationnels (AI), commence à être utilisée pour supporter une recherche et une intégration "intelligente" d'information, notamment nécessaire dans le domaine du commerce électronique. Nous allons tout d'abord préciser les fonctionnalités que doivent posséder de tels AI puis nous présenterons plus en détail un projet de AOIS développé à base de tels agents qui collaborent pour la recherche, l'intégration et la découverte d'informations dans un environnement ouvert comme le web.

8.4.1.1. Fonctionnalités des AI pour la recherche et l'intégration d'information

Les systèmes de recherche et d'intégration de l'information, basés sur des AI, ont pour rôles d'extraire l'information de documents qu'ils soient structurés ou non, de planifier la recherche d'information, d'intégrer l'information pour supporter un processus de décision, de raisonner sur les échanges entre les ressources informationnelles, et d'utiliser l'information extraite pour raffiner la recherche et traiter l'information.

Ainsi, pour pallier les faiblesses des moteurs de recherche, des AI "personnels" [AUTONOMY 99], plutôt que de consulter un grand nombre de sites, parcourent les liens pour trouver des informations relevant du domaine. Ils utilisent des règles, des questionnaires ou des techniques d'apprentissage. Ils ne sont pas aussi rapides que les moteurs de méta-recherche, mais ils privilégient la qualité des documents et permettent d'obtenir des documents qui relèvent mieux du domaine concerné.

Dans le domaine du commerce électroniques, des AI prennent en charge, à la demande d'un client potentiel, la recherche de documents contenant des prix et des

informations sur des produits spécifiques et qui correspondant le mieux aux souhaits du client. Par exemple, BargainFinder recherche le meilleur prix de CDs de musique. Contrairement aux agents personnels ou aux moteurs de meta-recherche, ces agents ne recherchent pas à localiser les sites vendeurs de produits, mais les concepteurs développent des bibliothèques qui contiennent les sites connus et des informations telles que "comment interagir avec un moteur de recherche local". Souvent ils intègrent les propriétés offertes par les agents personnels. Par exemple, Jango [JANGO 99] localise les catalogues et extrait les prix et des caractéristiques propres au produit, à partir de sites de vendeurs.

Comme nous l'avons déjà évoqué, un AI peut être appréhendé comme un ensemble de modules logiciels disposant de compétences particulières et transformant les SI composants, par nature passifs, en composants actifs capables de raisonner sur leurs fonctionnalités et leurs compétences, et d'interagir pour résoudre un problème donné. Selon [PAPAZOGLU 92], pour assurer une recherche et une intégration "intelligente" d'information, les AI doivent posséder les fonctionnalités suivantes:

- Traduction d'information : cette fonctionnalité permet à l'AI d'homogénéiser la représentation des données, les formats et les langages de différents SI hétérogènes, et ce conformément aux conventions d'une organisation.
- Intégration partielle des informations : l'AI doit pouvoir intégrer partiellement des informations issues des différentes sources et sémantiquement reliées.
- "Courtage" de l'information : cette fonctionnalité permet à l'AI de rechercher et de localiser des sources d'information, des services "wrappers", et d'autres AI susceptibles de participer à la résolution d'une requête posée par l'utilisateur. Le courtage peut être syntaxique ou sémantique. Par exemple, Corba fournit des services de courtage syntaxique, en ce sens qu'il utilise la structure ou le format d'une spécification de tâche pour mettre en relation un client avec un fournisseur de service. Les AI mettent souvent en œuvre, en plus du courtage syntaxique, le courtage sémantique. Cette fonctionnalité nécessite que l'agent possède un modèle de son domaine d'expertise et un modèle des capacités des autres agents. Ce dernier modèle inclut uniquement les parties du modèle d'expertise des autres agents pouvant directement intervenir pour résoudre une requête que l'agent ne peut pas résoudre localement.
- Auto-représentation : Les AI doivent pouvoir s'auto décrire, évoluer dynamiquement et être re-configurables afin de s'adapter à l'évolution des sources d'information et de leur environnement. Les techniques basées sur les méta objets et la réflexion, peuvent être utilisées à cette fin.
- Communication expressive avec les autres agents : des protocoles et des langages de communication sont indispensables, non seulement pour traiter les requêtes, mais également pour propager leurs informations.

8.4.1.2. Principaux concepts, techniques et langages utilisés

Afin d'assurer les fonctionnalités décrites précédemment, des concepts, des techniques et des langages sont souvent utilisés par les systèmes de recherche et d'intégration d'information. Nous décrirons ainsi brièvement dans ce paragraphe les concepts d'ontologie, de contexte, de négociation, d'inconsistance et d'incohérence, les techniques de protocoles de communication, et les langages de communication entre agents.

Une ontologie peut être définie comme un vocabulaire spécifique et des relations utilisés pour décrire certains aspects de la réalité, et un ensemble de postulats liés au sens du vocabulaire des mots [GUARINO 98]. Elle consiste en une description abstraite de classes d'objets d'un domaine, des relations entre ces classes, d'une terminologie, et d'autres informations spécifiques du domaine. Les ontologies sont souvent utilisées dans les AI, d'une part dans la fonction de traduction, pour fournir les bases d'une terminologie commune et faire correspondre les différentes terminologies utilisées dans les sources ; d'autre part dans les fonctions d'intégration, de courtage pour modéliser le modèle d'expertise, et de communication entre les agents. Les ontologies sont souvent décrites à l'aide de langage de représentation de concepts tels que Loom ou KL-ONE, ou encore à l'aide de langages spécialisés tels que KIF, et sont formalisés en utilisant des réseaux de concepts.

Le contexte d'une requête d'information peut aider le système par exemple à distinguer si le terme main levée relève de l'action de lever la main ou de l'acte juridique. Le contexte prend en compte les méta données, les profils d'utilisateur et les ontologies. Un challenge posé par les systèmes actuels est leur capacité à raisonner sur les contextes.

Les protocoles de communication entre AI, proposent des primitives de communication. Ils sont souvent basés sur la négociation et dotés de capacités argumentatives et explicatives. La négociation est nécessaire lorsque des problèmes de résolution de conflits se posent, du fait de l'hétérogénéité des SI composants. En effet, les agents peuvent être en concurrence pour obtenir des ressources ; des conflits peuvent apparaître dans la phase d'intégration de l'information issue de différentes sources d'informations, ou durant la construction d'un plan commun par différents agents. [BEDOU 98] propose un protocole de coopération basé sur la négociation et les actes de langages.

Pour réaliser une communication expressive et la négociation entre les agents, des recherches ont concentré leur effort sur des techniques de partage de la connaissance et on donné lieu à des langages comme KQML ou KIF. Ainsi le langage KQML (Knowledge Query and Manipulation Language) [PATIL 92] a été proposé pour assurer les fonctions de courtage et de communication. KQML spécifie des types de message qui peuvent être combinés pour implémenter des protocoles de communication. Les agents communiquent via un ensemble standard de primitives qui spécifient des actions pouvant être exécutées sur l'agent destinataire. Par exemple, on peut noter des primitives de requêtes de base (evaluate, ask-one, ask-all),

des primitives informationnelles (tell, untell), et des primitives de définition de capacités (advertise, subscribe, monitor). KQML peut être utilisé comme un "shell" pour contenir des messages dans divers langages et formats de représentation de connaissance, et permet à des agents de router des messages sans nécessairement comprendre la syntaxe ou la sémantique de leur contenu. Ainsi le langage de coordination COOL [BARBUCEAUNU 97] adopte le standard KQML. Pour sa part, KIF (Knowledge Interchange Format) [GENESERETH 92] fournit un mécanisme de communication commun pour l'échange de connaissances représentées à l'aide de schémas disparates. Plusieurs traducteurs permettent de convertir les langages de représentation des schémas sources en KIF et inversement. KIF est utilisé pour décrire des ontologies et pour convertir les requêtes ou les données en un même format unique.

L'intégration et la gestion des informations et des connaissances issues des différentes sources d'information, posent des problèmes (i) d'inconsistance qui apparaissent lorsque diverses sources sont combinées, (ii) d'incertitude, liés aux différents niveaux de confiance attribués aux sources d'information, et (iii) de complexité du raisonnement en présence d'un grand ensemble d'informations intégrées. Afin de traiter ces problèmes, des modèles formels sont proposés comme par exemple [KORICHE 98] qui a défini des spécifications formelles, exprimées en logique propositionnelle étendue à la logique des prédicats. Son approche, basée sur le raisonnement approximatif, repose sur trois caractéristiques : la notion de ressource de calcul, définie comme une mesure qualitative qui détermine la précision et le coût de calcul de l'approximation, une méthode incrémentale qui permet d'améliorer les conclusions approximatives et autorise leur convergence vers la réponse exacte, et un raisonnement dual qui permet de modéliser à la fois des approximations correctes et des approximations complètes [KORICHE 97].

Chronologiquement, les architectures existantes des SIC ont traité des aspects syntaxiques puis sémantiques. La tendance actuelle est de prendre davantage en compte des aspects liés aux interactions sociales. Dans cette perspective, [OUKSEL 99] propose une architecture des systèmes ouverts pour l'interaction sociale basée sur quatre niveaux : le monde social (croyance, espérance, engagement, contrat, loi, culture), la pragmatique (intentions, communication, conversation, négociation), la sémantique (sens, proposition, validité, vérité, dénotations), la syntaxe (structure formelle, langage, logique, donnée, enregistrement, déduction, logiciel). Les deux premières catégories d'interopérabilité sont souvent ignorées dans les systèmes actuels, mais sont nécessaires si l'on veut prendre en compte la négociation continue et l'évolution dans un environnement d'information incertain et incomplet, préserver l'autonomie des sources d'information, et permettre la collaboration et la coopération en présence de conflits.

Plusieurs projets de recherche proposent des AOIS qui traitent l'intégration syntaxique et sémantique de ressources hétérogènes. C'est le cas des systèmes SIMS [KNOBLOCK 94], TSIMMIS, InfoMaster [GENESERETH 97], Information

Manifold, RETSINA et SHADE, et InfoSleuth. Dans le cadre de ce chapitre, nous avons choisi de présenter plus en détail le projet InfoSleuth pour le courtage sémantique qu'il réalise et la richesse de son méta-modèle de représentation des ontologies.

8.4.1.3. *Le projet InfoSleuth*

InfoSleuth [BAYARDO 97], [NODINE 99] est un projet supporté par MCC (Microelectronics and Computer Technology Cooperation, Austin) depuis octobre 1995. Il se situe dans la continuité du projet Carnot qui était dédié à l'intégration statique des bases d'information hétérogènes. L'objectif du projet InfoSleuth est de développer un système basé sur un ensemble d'agents qui collaborent pour traiter une requête d'un utilisateur en recherchant, intégrant et découvrant les informations dans un environnement ouvert comme le web. Pour cela, il doit intégrer des informations issues de plusieurs sources distribuées et hétérogènes.

InfoSleuth se caractérise par sa fonction de courtage sémantique en utilisant le sens et le contenu de l'information des requêtes pour faire un rapprochement sémantique avec les services offerts par l'agent fournisseur. Ces services, également appelés ressources, peuvent être offerts par les sources d'informations ou tout autre agent. Par exemple, un agent appelé "mon-agent-de-requête-relationnelle" peut avertir l'agent courtier qu'il a la capacité de faire du traitement de requêtes d'algèbre relationnelle.

L'architecture d'InfoSleuth

InfoSleuth est un réseau d'agents coopérants qui communiquent à l'aide du langage de communication KQML. Les utilisateurs spécifient leurs requêtes sur des ontologies via des interfaces d'utilisateurs basés sur des applets java qui communiquent avec un agent utilisateur personnalisé. Le langage de représentation de connaissances KIF et le langage de requête de bases de données SQL, sont utilisés de manière interne pour décrire les requêtes sur les ontologies. Les requêtes sont routées par des agents de courtage, vers des agents spécialisés chargés de rechercher les données dans les ressources distribuées, d'intégrer et d'analyser les résultats.

Les agents avertissent leurs services et traitent les requêtes soit en effectuant des inférences à partir de la connaissance locale, soit en routant la requête à un agent plus approprié, soit encore en décomposant la requête en un ensemble de sous-requêtes qui sont routées vers les agents appropriés, puis en intégrant les résultats. Les décisions sur le routage des requêtes sont basées sur l'ontologie InfoSleuth, constituée par un ensemble de méta données qui décrivent la connaissance des agents et leurs relations avec les autres agents. La décomposition des requêtes est basée sur une ontologie du domaine, choisie par l'utilisateur, qui décrit la connaissance sur les données et leurs relations stockées par les ressources qui relèvent de l'ontologie.

L'architecture d'InfoSleuth en termes d'agents est décrite dans la figure 8.6. Le rôle des agents du système InfoSleuth est décrit ci-dessous. Les deux agents constituant le cœur du système sont les agents "courtier" et "ontologie" :

- L'agent "utilisateur" est l'interface "intelligente" avec l'utilisateur. Il utilise les connaissances des modèles du domaine, à savoir les ontologies, pour assister l'utilisateur à formuler ses requêtes et à afficher les résultats.
- L'agent "ontologie" fournit toutes les connaissances sur les ontologies et répond à toutes les requêtes sur les ontologies. Pour cela, il maintient une base de connaissance des différentes ontologies utilisées pour des requêtes spécifiques.
- L'agent "courtier" reçoit et stocke les déclarations de tous les agents sur leurs capacités. A partir de cette information, il renseigne tous les agents sur le routage de leurs requêtes en recherchant les agents qui peuvent fournir des informations susceptibles de participer à la résolution de la requête posée par l'utilisateur. Il maintient une base de connaissances contenant les informations sur les déclarations des compétences des agents et recherche les agents qui peuvent intervenir dans les services demandés.
- L'agent "ressource" recherche et active la base de données ou la base d'information et fournit un "mapping" à partir de l'ontologie commune vers le schéma de la base de donnée et le langage propre de sa ressource. Il exécute les requêtes spécifiques à cette ressource incluant les requêtes continues et les notifications. Chaque source d'information est considérée comme une ressource.
- L'agent "analyse de données" est un agent ressource spécialisé dans les méthodes d'analyse et de fouille de données (data mining).
- L'agent "exécution et planification de tâches", coordonne l'exécution des sous-tâches de recherche et d'intégration d'information haut niveau nécessaires pour répondre aux requêtes. Il utilise l'information transmise par l'agent courtier pour identifier les ressources qui disposent de l'information requise. Il dirige les requêtes vers les agents ressources appropriés et rassemble les résultats.
- L'agent "moniteur" suit les interactions des agents et les étapes d'exécution de la tâche. Il fournit aussi une interface visuelle pour afficher l'exécution.

Le modèle des ontologies à trois niveaux d'InfoSleuth

Les ontologies dans InfoSleuth sont utilisées à la fois pour décrire et raisonner sur le contenu de l'information et pour spécifier l'infrastructure sous-jacente à l'architecture des agents. Elles sont utilisées pour décrire le schéma des bases de données (ex.: relationnel ou hiérarchique), les modèles conceptuels (ex.: modèle entité-relation ou objet), et les aspects de l'architecture agent d'InfoSleuth (ex.: les configurations de l'agent, les spécifications des workflows).

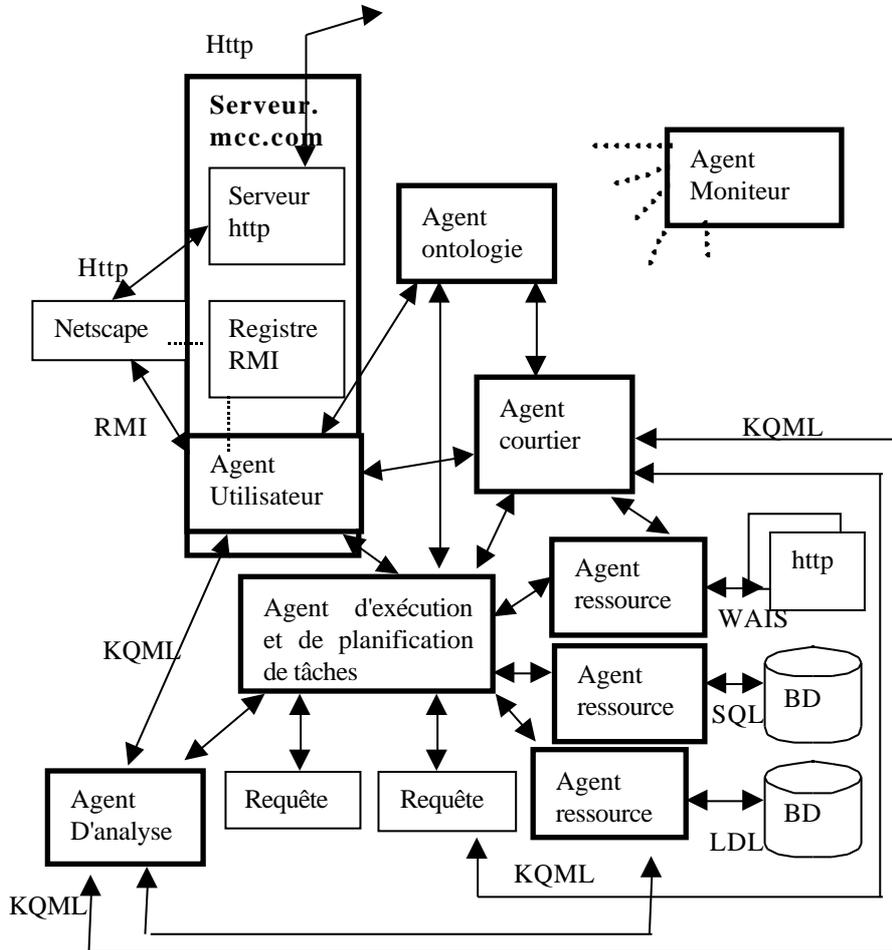


Figure 8.6. Architecture agents d'InfoSleuth

En effet, déterminer si une source d'information relève du domaine sans accéder aux données sous-jacentes, nécessite la capacité de décrire des contenus des sources d'information et de raisonner avec une description déclarative intentionnelle. Les SGBD orientés objet ou relationnels n'ont pas la possibilité de raisonner sur leurs schémas. Les ontologies spécifiées dans une représentation de connaissance ou un langage de programmation logique peuvent être utilisés pour raisonner sur le contenu de l'information et dès lors permettent de décider si l'information relève du domaine. De plus, dans un environnement ouvert, plusieurs ontologies peuvent décrire différentes vues d'une même source d'information.

Les ontologies sont par ailleurs utilisées pour spécifier le contexte dans lequel les agents opèrent, c'est-à-dire l'information manipulée par les différents agents et

leurs relations. Elles permettent alors de décider sur quels agents router les requêtes. Cette information est représentée dans l'ontologie d'InfoSleuth et représente le système tel qu'il est vu par l'agent courtier. Comme la fonctionnalité des différents agents évolue, elle est incorporée dans l'ontologie.

Plutôt que de retenir un format d'ontologie "universel", InfoSleuth autorise des formats et des représentations multiples en représentant chaque format d'ontologie avec un méta modèle d'ontologie qui facilite l'intégration de différents types d'ontologies. La représentation et le stockage des ontologies sont réalisés autour d'un modèle à trois niveaux : Le niveau frame permet de créer, peupler et d'interroger des méta modèles. Les objets du niveau méta modèle sont des instances des objets du niveau frame. Les objets du niveau ontologie sont des instances des objets du méta modèle. Une caractéristique de l'ontologie d'InfoSleuth est qu'elle est auto-descriptive. Enfin, les différents agents peuvent représenter les ontologies dans différents langages en fonction du type d'inférence qu'ils doivent effectuer. Par exemple, la même partie de l'ontologie peut être décrite en KIF par un agent "ressource" et en LDL par l'agent "courtier".

8.4.2. Agents informationnels pour la gestion de chaînes logistiques

Comme nous l'avons déjà évoqué, les entreprises industrielles sont actuellement plongées dans un marché global fortement compétitif et centré client. Ce marché est caractérisé par une demande de produits de qualité croissante, disponibles dans un temps de plus en plus court, moins cher et personnalisé [VERNADAT 94]. Pour accroître leur performance, de nombreuses entreprises industrielles transforment alors leur structure organisationnelle en externalisant des activités ne correspondant pas à leur métier de base, ce qui les conduit à travailler avec un nombre croissant de partenaires localisés partout de par le monde. Aussi de nouvelles structures organisationnelles distribuées émergent, comme l'entreprise étendue ou l'entreprise virtuelle. Les entreprises font désormais partie intégrante de réseaux de partenaires, réseaux de plus en plus complexes et sensibles aux perturbations. Dans ce contexte, la logistique et plus précisément les chaînes logistiques associées à ces réseaux de partenaires prennent une place stratégique [PACHE 94]. Nous allons tout d'abord développer la problématique de ces chaînes logistiques et de leur gestion puis nous présenterons brièvement quelques AOIS d'aide à cette gestion.

8.4.2.1 Problématique des chaînes logistiques

Dans de tels réseaux de production les gestions locales de la production s'avèrent souvent inefficaces face à des défaillances de fournisseurs, de sous-traitants, à la variation de la demande des clients qui sont des aléas dont l'origine est extérieure à l'entreprise. Pour palier ces insuffisances, le concept de "chaîne logistique" est

apparu. La chaîne logistique permet d'appréhender toute la chaîne de production, du fournisseur de matières premières aux clients. Ainsi une chaîne logistique peut être définie comme un réseau d'équipements et d'options de distribution qui assurent les fonctions d'acquisition de matières premières, de transformation de celles-ci en produits semi-finis et produits finis, et de distribution de ces produits finis aux clients.

Gestion de la chaîne logistique

La gestion d'une chaîne logistique doit tout d'abord permettre de satisfaire au mieux la demande du client, ce qui se traduit en terme d'objectifs comme la mise à la disposition du client du bon produit, en bonne quantité, au bon endroit, au bon moment, au prix minimum. Cette gestion doit aussi limiter la sensibilité aux perturbations d'une chaîne logistique devenue complexe et en conséquence sujette à des aléas tels que des défaillances de fournisseurs, des changements de demande clients, ou encore des pannes machines. La dynamique de l'entreprise et des marchés rend cette gestion difficile et la plupart du temps, l'atteinte de ces objectifs est incomplète. Pour améliorer les performances de la chaîne logistique trois voies d'amélioration sont possibles :

- Accélérer la circulation des flux dans la chaîne elle-même : ceci pour permettre une réduction des stocks intermédiaires et améliorer ainsi la flexibilité de la chaîne logistique. Il existe un seuil au-delà duquel il est vain de vouloir aller.
- Restructurer la chaîne logistique : de manière à ce qu'elle supporte mieux les aléas de production et de livraison.
- Modifier la coordination des éléments de la chaîne logistique : ceci en appliquant de nouvelles stratégies de gestion et en favorisant la communication entre les différents acteurs impliqués.

La troisième voie semble actuellement la plus prometteuse. En effet, la réactivité ne peut s'obtenir qu'en décloisonnant les fonctions de l'entreprise et en améliorant la communication. Elle passe par l'intégration de tous les partenaires de production [BAGLIN 90] et devrait être grandement possible par la mise en œuvre des nouvelles technologies de l'information. Aussi allons-nous nous y intéresser plus particulièrement.

Coordination des acteurs de la chaîne logistique

Face à un marché devenant de plus en plus instable, les entreprises doivent être réactives, adaptatives, en prenant notamment des décisions judicieuses sur des problèmes faisant intervenir de plus en plus de paramètres et d'acteurs [CLAVER 97]. Prendre de telles décisions nécessite de pouvoir prédire les effets de l'action choisie ce qui, dans le domaine de la logistique, est particulièrement difficile. Aussi pour coordonner les actions de toutes les entreprises d'un réseau dans de telles conditions, le recours à un système d'aide à la décision apparaît nécessaire. De tels systèmes d'information doivent permettre aux gestionnaires de la chaîne logistique de disposer des informations pertinentes leur permettant de prendre la meilleure décision possible, notamment affectant le moins possible le reste de la chaîne. L'élaboration

de tels systèmes nécessite de disposer d'une bonne modélisation des chaînes logistiques. On distingue trois principales approches associées à l'élaboration de telles modélisations [PARUNAK 99]:

- l'approche théorie du contrôle modélise la chaîne logistique à l'aide d'équations différentielles ou d'équations aux différences, les comportements y sont analysés par transformations des réponses aux stimuli. Cette approche, qui s'appuie largement sur la linéarisation des comportements, s'avère peu satisfaisante pour la beaucoup de chaînes logistiques.

- l'approche recherche opérationnelle se base sur la théorie de l'optimisation, la théorie des jeux et l'analyse statistique. Cette approche s'applique aussi bien aux systèmes linéaires qu'aux systèmes non linéaires mais elle nécessite souvent des approximations statistiques irréalistes et, en ne prenant pas explicitement en compte le temps, elle ne permet pas de représenter les caractéristiques dynamiques des chaînes logistiques.

- l'approche simulation-émulation s'appuie sur des modèles exécutables de systèmes, soit des modèles simulables basés sur une modélisation mathématique du système dont le comportement est observé dans le temps (simulé), soit des modèles multi-agents qui sont émules afin de faire apparaître un comportement collectif des agents qui sera interprété comme le comportement des acteurs de la chaîne logistique.

L'approche qui semble actuellement émerger est l'approche simulation-émulation et plus particulièrement l'émulation de modèles à base d'agents conduisant à l'élaboration de AOIS de support à la gestion de chaînes logistiques.

8.4.2.2 AOIS pour la gestion de chaînes logistiques

Nous avons vu précédemment l'intérêt d'utiliser un système d'aide à la décision basé sur l'approche simulation-émulation pour améliorer les coordinations des acteurs de la chaîne logistique et par conséquent les performances de celle-ci. Dans l'émulation des chaînes logistique, les modèles à base d'agents ou SMA présentent plusieurs intérêts dans la modélisation des chaînes logistiques, en voici quatre principaux [PARUNAK 99] :

- La représentation des chaînes logistiques est grandement facilitée par le fait qu'à un acteur de la chaîne on fait correspondre un agent.

- Les agents étant autonomes, les SMA s'adaptent bien à la forte évolutivité des chaînes logistiques en permettant d'ajouter ou d'enlever des agents cela sans nécessiter d'effectuer une recompilation complète du système.

- Les SMA peuvent facilement se greffer sur des systèmes informatiques déjà existants sans en perturber le fonctionnement et ainsi utiliser les capacités informatiques existantes dédiées par exemple à l'ordonnancement ou à la gestion des stocks sans avoir à les reprogrammer.

- La capacité "naturelle" des SMA à résoudre des problèmes par coopération fait qu'ils reproduisent très bien les comportements des entités d'une chaîne logistique.

Les intérêts que présentent les SMA pour la modélisation de chaînes logistiques et l'importance croissante de ces dernières pour les entreprises industrielles a donné lieu à de nombreuses réalisations d'AOIS spécifiques. Deux d'entre elles ont retenu notre attention : les travaux développés au Santa Fe Institute autour de Swarm et le système DASCh réalisé au CEC (Center for Electronic Commerce) du Industrial Technology Institute. Nous allons dans ce qui suit présenter succinctement ces deux réalisations.

Travaux développés au Santa Fe Institute

L'équipe de T.J. Strader du Santa Fe Institute a développé une plate-forme multi-agents de simulation Swarm (essaim) [STRADER 98]. Cette plate-forme est constituée d'éléments appelés eux-mêmes des "Swarm". Trois de ces Swarms sont indispensables au bon fonctionnement de la plate-forme : le contrôleur de simulation qui sert à diriger la simulation, l'outil statistique qui sert à fournir des données statistiques pour l'aide à la décision, et le modèle à simuler. Ce dernier est également construit à base de Swarm représentant les acteurs du système modélisé qui peuvent à leur tour être décomposés de manière récursive en Swarm.

La plate-forme Swarm a été mise en oeuvre pour modéliser des chaînes logistiques afin de prouver la faisabilité d'un système d'aide à la décision basé sur un SMA et ensuite d'évaluer l'impact du partage de l'information sur les performances de la chaîne logistique. La validation du système réalisé s'est faite en simulant la réponse à des commandes d'un modèle de chaîne logistique à laquelle on a fait utiliser différentes stratégies de coordination. Les performances obtenues ont été évaluées au travers du niveau des stocks et du temps de réponse aux commandes. La figure 8.7 illustre l'architecture générale agents adoptée pour ce système développé avec Swarm.

D'après ses concepteurs, la plate-forme Swarm permet une modélisation facile des chaînes logistiques grâce à la récursivité de ses Swarms et apporte une aide à la décision en permettant de simuler diverses stratégies de coordination d'une chaîne logistique. La littérature consultée ne donne que peu d'information sur le niveau d'intelligence des Swarm, ainsi que sur les protocoles de communication qu'ils utilisent pour se coordonner. Ces protocoles doivent encore, d'après les chercheurs du Santa Fe Institute, faire l'objet d'études plus approfondies.

Travaux du Center for Electronic Commerce at Industrial Technology Institute

Parunak et son équipe ont développé au CEC (Center Electronic Commerce), en collaboration avec le Randall Laboratory de l'Université du Michigan, le système DASCh (Dynamical Analyse of Supply Chain) [PARUNAK 98b, PARUNAK 99]. DASCh se présente comme une plate-forme de développement de modèles multi-agents dédiée à la représentation de chaîne logistiques. Les modèles obtenus, appelés ABM (Agent-Based Modeling) sont émulés dans le but d'observer la variabilité dans les commandes et dans les niveaux de stocks des différents agents en fonction du niveau de coopération des agents. La plate-forme DASCh comporte trois types d'agents : l'Agent Entreprise, l'Agent PPIC et l'Agent Expédition.

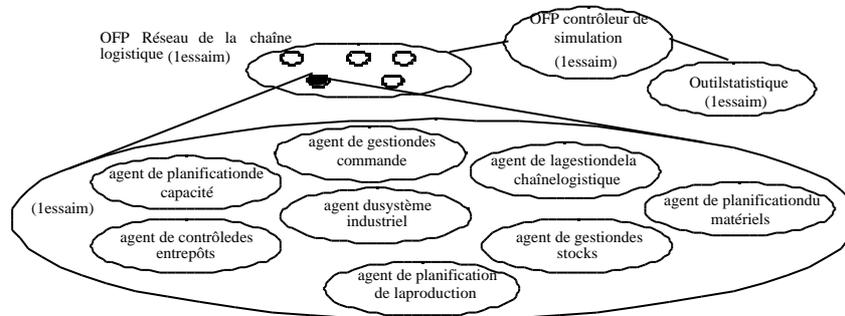


Figure 8.7. Mise en oeuvre de Swarm pour la modélisation de chaînes logistiques

- L'agent Entreprise représente les différentes organisations (entreprise, atelier, etc.) que l'on peut rencontrer dans les chaînes logistiques. Il reçoit en entrée différents types d'objets tels que des matières premières ou encore des modifications de tâche ; il transforme ces entrées en sorties (produit semi-fini ou fini) pour les distribuer à ses différents clients.
- L'agent PPIC modélise la planification de la production ainsi que la gestion des stocks par les Agents Entreprise.
- L'agent Expédition modélise les délais et les incertitudes dus aux mouvements de matières et d'informations des différents agents.

La figure 8.8 illustre une modélisation multi-agents développée avec la plateforme DASCh. Cette modélisation concerne une chaîne logistique constituée d'un fournisseur, de deux sites de transformation et d'un consommateur. Ces agents sont reliés grâce à six agents d'expéditions chargés de transmettre soit des informations soit les produits fabriqués.

La plate-forme DASCh permet d'émuler des modèles multi-agents de chaînes logistiques de manière efficace mais nécessite, d'après ses concepteurs, d'autres développements complémentaires. DASCh devrait ainsi supporter le traitement de plusieurs produits et la mise en concurrence d'agents ayant le même rôle (plusieurs fournisseurs par exemple) en permettant de développer des structures non linéaires et des protocoles de décision. De plus un effort devra être fait sur le développement de mécanismes adaptatifs pour permettre l'émulation de chaîne logistiques évolutives.

8.4.2.3 Conclusion

D'autres réalisations ont été développées ou sont actuellement en cours de développement. Citons tout d'abord les travaux de Y. Chen et son équipe [CHEN 99], qui s'intéressent plus particulièrement à l'élaboration dynamique (émergence) de la chaîne logistique par négociations automatiques ou semi-automatiques entre agents, négociations spécifiées par réseaux de Pétrie colorés. De même, le projet MASCOT (Multi-Agent Supply Chain cOrdination Tool), développé à l'Université Carnegie Mellon par l'équipe de N.M. Sadeh [SADEH 99].

Il s'agit d'une architecture multi-agents temps réel reconfigurable et multi-niveaux, spécifique pour la planification et l'ordonnancement coordonnés de chaînes logistiques. Citons encore le projet ANTS (Agent Network for Task Scheduling) développé par J.A. Sauter et H.V.D. Parunak [SAUTER 99]. ANTS propose une architecture agent adaptée à la modélisation de chaînes logistiques mettant en oeuvre un mécanisme de négociation appelé "least commitment scheduling", différant les décisions le plus tard possible, ainsi qu'une résolution de conflits spécifique. Enfin, citons les travaux développés par K.P. Sycara et D.D. Zeng [ZENG 99] ainsi que par M. Barbucaunu et R. Teigen [TEIGEN 96-97].

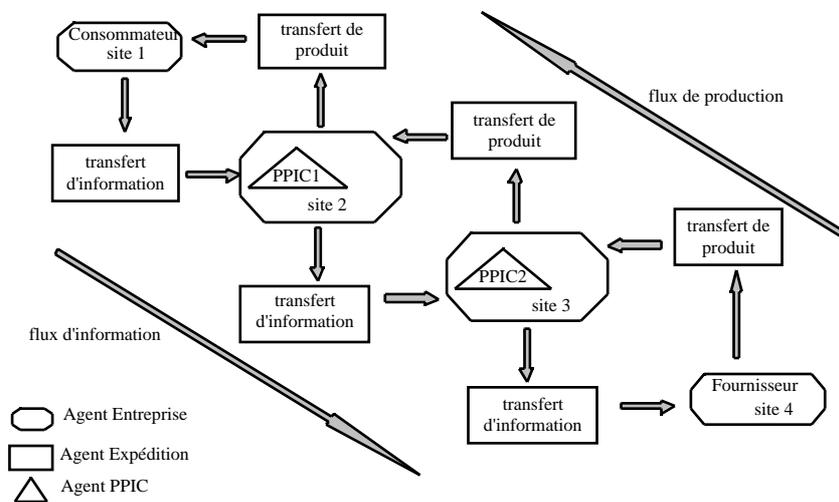


Figure 8.8. Chaîne logistique modélisée dans DASCh

8.5. Conclusion

On constate que les travaux de recherche relevant du domaine des SIC sont réalisés par des chercheurs de différentes disciplines et selon différentes perspectives. Ainsi, les chercheurs en SI s'intéressent à la prise en compte des aspects organisationnels et sociaux de la coopération et réfléchissent à des extensions de modèles conceptuels et de langages tels que UML. Les chercheurs en BD s'intéressent essentiellement à des problèmes de persistance et de performances d'accès et essaient d'adapter des SGBD existants ou d'en créer de nouveaux. Les chercheurs en IAD s'intéressent aux techniques d'IA, souvent issues de la logique pour traiter les problèmes de coopération. Enfin les chercheurs en sciences cognitives essaient de développer des modèles cognitifs, des protocoles de négociation reposant par exemple sur la théorie des actes de langage.

Jusqu'à maintenant, chacune des communautés, essentiellement SI et BD d'une part, IAD et SMA d'autre part, effectuaient leurs travaux de recherche de manière relativement indépendante. Actuellement, nous assistons à des travaux menés en commun, en particulier au travers de congrès, comme par exemple le workshop bi-conférence internationale AOIS qui s'est tenue en mai 1999 en parallèle au congrès Agents'1999 à Seattle (USA), et en juillet 1999, en parallèle à la conférence sur les SI, CAiSE'1999 à Heidelberg (Germany). Cette expérience, qui s'est avérée fructueuse par la confrontation des deux communautés, est renouvelée dans AOIS'2000 qui se déroulera en parallèle à CaiSE'2000 à Stockholm et à AAAI'2000 à Austin. Ce rapprochement des deux communautés se retrouve au sein du réseau européen d'excellence pour l'informatique basée sur les agents, où un groupe, actuellement dirigé par M. Klusch, s'est créé sur le thème des agents d'information en regroupant les deux communautés. Il en est de même du journal International "Cooperative Information Systems" qui consacre des numéros spécifiquement dédiés aux "Intelligent Information Agents: Theory and Application" et de la conférence CIS (Cooperative Information Systems). Ce rapprochement s'avère indispensable pour l'avancée de la recherche dans le domaine, mais également pour une meilleure harmonisation des vocabulaires.

Les applications des recherches autour des SIC sont actuellement au cœur même des technologies de l'information et de la communication, avec le développement de l'Internet, du web et de l'intranet ; c'est le cas du commerce électronique, de l'enseignement à distance, des systèmes d'information génomiques, des systèmes d'information géographiques, de l'entreprise virtuelle ou des chaînes de production. Ces applications nécessitent toutes la coopération de systèmes d'information et de bases de données existantes, et pour lesquelles les techniques informatiques traditionnelles telles que les BD fédérées ou les multibases ont montré leurs limites. Chronologiquement, les architectures existantes des SIC ont traité des aspects syntaxiques puis sémantiques. La tendance actuelle est de prendre davantage en compte des aspects liés aux interactions sociales comme le monde social ou la pragmatique, si l'on veut prendre en compte la négociation et l'évolution dans un environnement d'information incertain et incomplet, tout en préservant l'autonomie des sources d'information, et en autorisant la collaboration et la coopération en présence de conflits.

8.6. Références

[ACM 90] ACM Computing Surveys, Special Issue on Multidatabases, Vol. 22, n° 3, September 1990.

[ASHISH 97] ASHISH N., KNOBLOCK C.A., *Semi-automatic Wrapper Generation for Internet Information Sources*, IEEE, 1997.

[AUTONOMY 99] *Autonomy agentware technology white paper*, <http://www.agentware.com/main/tech/whitepaper.htm>

- [BAGLIN 90] BAGLIN G., BRUEL O., GARREAU A., GRIEF M., *Management industriel et logistique*, Econométrica, 1990.
- [BAILEY 95] BAILEY J., KINNY D., GEORGEFF M., KEMP B., RAMAMOHANARAO K., *Active Databases and Agent Systems: A Comparison*, 2nd International Workshop on Rules in Database Systems, RIDS 95, LNCS 985, Athens, Greece, September 1995.
- [BARBUCEANU 97] BARBUCEANU M., FOX M.S., *The Design of a Coordination Language for Multi-Agent Systems*, Intelligent Agents III, Proceedings of the 1996 Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages, ATAL 96, pp.342-55, 1997.
- [BAYARDO 97] BAYARDO R. & AL., *InfoSleuth : Semantic Integration of Information in Open and Dynamic Environments*, Sigmod Record, Vol. 26, N° 2, International Conference on Management of Data, pages 195-206, Tucson, Arizona, June 1997.
- [BEDOU 98] BEDOU I., *Modélisation des systèmes d'information coopératifs : une approche cognitive basée sur la négociation*, thèse de doctorat, Université Montpellier II, Décembre 1998.
- [BERNDTSSON 96] BERNDTSSON M., CHAKRAVARTHY S., LINGS B., *Cooperative Problem Solving: A New Direction for Active Databases*, International Symposium on Cooperative Database Systems for Advanced Applications, Kyoto, Japan, December 1996.
- [BOND 88] BOND H.A., GASSER L., *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, Morgan Kaufman, 1988.
- [BOULANGER 97] BOULANGER D., DUBOIS G., *Objets et Coopération de Systèmes d'Information*, Ingénierie Objet : Concepts et Techniques, Chap. 10, InterEditions, 1997.
- [BROWNE 94] BROWNE J., SACKETT J.C., WORTMANN, *Industry Requirements and Associated Research Issue in the Extend Enterprise*, European Workshop on Integrated Manufacturing Systems Engineering, IMSE 94, Grenoble, France, December 12-14, 1994.
- [BUKHRES 96a] BUKHRES O., *Object-Oriented Multidatabases Systems : A Solution for Advanced Applications*, O. Bukhres and A. Elmagarmid editors, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1996.
- [BUKHRES 96b] BUKHRES O., ELMAGARMID A., GHERFAL F., LIU X., BARKER K., SCHALLER T., *The Integration of Database Systems*, in [BUK 96] Chap. 2.
- [CAMARINHA 94] CAMARINHA-MATOS L.M., *Lecture Note, Special Session on Multiagent Systems in Manufacturing*, European Conference on Robotics and Intelligent Systems, EURISCON 94, Malaga, Spain, August 1994.
- [CHAIB-DRAA 95] CHAIB-DRAA B., *Industrial Applications in Distributed AI*, Communication of ACM, Vol. 38, n°11, pp. 49-53, 1995.
- [CHEN 99] CHEN Y., PENG Y., FININ T., LABROU Y., CHU B., YAO J., SUN R., WILHELM B., *A negotiation-based Multi-Agent System for Supply Chain Management*, International Workshop on Agent Based Decision Support System for Managing the Internet-Enabled Supply Chain, in parallel with Agent 99, Seattle, Washington, USA, May 1999.
- [CLAVER 97] CLAVER J.F., GELINIER J., PITT D., *Gestion des flux en entreprise : modélisation et simulation*, Hermes, 1997.

- [CLOUTIER 99] CLOUTIER L., ESPINASSE B., LEFRANÇOIS P., *Networked Enterprise Integration : an Agent-Based Coordination Framework*, Invited Conference, 14th International Conference of International Federation of Automatic Control, IFAC 99, Beijing, China, July 1999.
- [DEEN 94] DEEN S.M., *Cooperation Issues in Holonic Manufacturing Systems*, Information Infrastructure Systems for Manufacturing (B-14), in Yoshikawa H. and Goossenaerts J. Editors, Elsevier Science B.V., North Holland, 1993.
- [DE MICHELIS 97] DE MICHELIS G., DUBOIS E., JARKE M., MATTHES F., MYLOPOULOS J., POHL K., SCHMIDT J., WOO C., YU E., *Cooperative Information Systems : A Manifesto*, in Papazoglou M.P., Schlageter G. Editors, Cooperative Information System : Trends and Directions, Academic Press, 1997.
- [DE TERSSAC 92] DE TERSSAC G., DUBOIS P., *Les nouvelles rationalisations de la production*, Cepadues-Editions, 1992.
- [DURFEE 94] DURFEE E.H., ROSENSCHEIN J.S., *Distributed Problem Solving and Multi-Agent Systems: Comparisons and Examples*, 30th International Workshop on Distributed Artificial Intelligence, pp.94-104, 1994.
- [EFD 97] International Workshop on Engineering Federated Database Systems, in parallel with CAiSE 97, Barcelona, Spain, June 1997.
- [ESPINASSE 95] ESPINASSE B., SPINOZA L.M., CHOURAQUI E., *D-CIM et IAD : Une approche orientée connaissance pour la modélisation de systèmes de production*, Congrès International de Génie Industriel de Montréal : La productivité dans un monde sans frontière, Montréal, Canada, 18-20 octobre 1995, Volume II, pp. 915-925.
- [ESPINASSE 98] ESPINASSE B., CLOUTIER L., LEFRANÇOIS P., *A Coordination Framework for Intelligent Agents in the Distributed Enterprise*, in Globalization of Manufacturing in the Digital Communications Era of the 21st Century : Innovation, Agility and the Virtual Enterprise, G. Jacucci, G.J. Olling, K. Preiss, M. Wozny Editors, Kluwer Academic Publishers, pp 565-578.
- [FERBER 95] FERBER J., 1995, *Les systèmes multi-agents*. Paris, InterEditions, 1995.
- [FIPA 97] FIPA 97, *Specification part 2, Agents Communication Language*, Foundation for Intelligent Physical Agents, Geneva, Switzerland.
- [FOX 85] FOX M.S., *Knowledge Representation for Decision Support Systems*, in Knowledge Representation for Decision Support Systems, L.B.Methlie and R.M.Sprague Editors, North Holland, 1985.
- [GARDARIN 96] GARDARIN G., GANNOUNI S., FINANCE B., FANKHAUSERA P., KLAS W., PASTREA D., LEGOFF R., RAMFOS A., *IRO-DB: A Distributed System Federating Object and Relational Databases*, in [BUK 96], Chap. 20.
- [GARDARIN 97] GARDARIN G., SHA F., *Using Conceptual Modeling and Intelligent Agents to Integrate Semi-Structured Documents in Federated Databases*, International on Conceptual Modeling, LNCS 1565, Los Angeles, California, USA, November 1997.
- [GARDARIN 99] GARDARIN G., BOUGANIM L., CHAN-SINE-YING T., DANG-NGOC T., DARROUX JL., SHA F., *Miro Web: Integrating Multiple Data Sources through Semistructured Data Types*, 25th International Conference on Very Large Data Bases, VLDB 99, Edinburgh, Scotland, September 1999.

- [GARCIA-SOLACO 96] GARCIA-SOLACO M., SALTOR F., CASTELLANOS M., *Semantic Heterogeneity in Multidatabase Systems*, in [BUK 96], Chap. 5.
- [GENESERETH 92] GENESERETH M.R., FIKES R.E., & AL., *Knowledge Interchange Format*, version 3, reference manuel, Logic-92-1, Stanford University Logic Group, 1992.
- [GENESERETH 97] GENESERETH M.R., KELLER A.M., DUSCHKA O.M., *Informaster: An Information Integration System*, Sigmod Record Vol. 26, N° 2, International Conference on Management of Data, pp. 539-542, Tucson, Arizona, June 1997.
- [GUARINO 98] GUARINO N., *Formal Ontology and Information Systems*, International Conference on Formal Ontology in Information Systems, Torino, Italia, pp. 3-15, 1998.
- [HANACHI 98] HANACHI C., *Agent-Based Manufacturing: a Database Point of View*, IFIP/IEEE International Conference on Information Technology for Balanced Automation Systems in Manufacturing, BASYS 98, Prague, Czech Republic, August 1998.
- [HERATH 94] HERATH A., *Towards a CKBS Model for Holonic Manufacturing Environments*, Report N° DAKE/-/TR-94002, DAKE Centre, University of Keele, United Kingdom, 1994.
- [HUHNS 97] HUHNS M.N., SINGH P., *Reading in Agents*, Morgan Kaufmann Publishers, 1997.
- [HURSON 96] HURSON A., BRIGHT M., *Object-Oriented Multidatabase Systems*. in [BUK 96], Chap. 1.
- [JANGO 99] JANGO, <http://www.jango.com>
- [JENNINGS 94] JENNINGS N.R., *Cooperation Industrial Multiagent Systems*, World Scientific Publishing Co., World Scientific Series in Computer Sciences, Vol. 43, 1994.
- [KAPPEL 96] KAPPEL G., SCREFL M., *Modeling Object Behavior: to Use Methods or Rules or Both ?*, 7th International Conference on Database and Expert Systems Applications, DEXA 96, LNCS 1134, Zurich, Switzerland, September 1996.
- [KLUSCH 99] KLUSCH M., *Intelligent Information Agent: Agents-Based Information Discovery and Management on the Internet*, Klusch M. Editors, Springer Verlag, 1999.
- [KNOBLOCK 94] KNOBLOCK C.A., ARENS Y., HSU C.N., *Cooperating Agents for Information Retrieval*, 2nd International Conference on Cooperative Information Systems, CoopIS 94, Toronto, Canada, May 1994.
- [KORICHE 97] KORICHE F., *Fault-tolerant and Approximate Reasoning in Multi-source Environments*, 2nd International Conference on Cooperative Information Systems, IFCIS-CoopIS 97, pp. 66-72, Kiawah Island, South Carolina, USA, June 1997.
- [KORICHE 98] KORICHE F., *Approximate Reasoning about Combined Knowledge*, Intelligent Agents Vol. 4., LNAI 1365, Chap. 5, pp. 259-273, Springer Verlag, Berlin, 1998.
- [KOUISS 95] KOUISS K., PIERREVAL H., *Systèmes multi-agents: direction actuelles pour les systèmes de productions*, Congrès International de Génie Industriel de Montréal : La productivité dans un monde sans frontière, Montréal, Canada, 18-20 octobre 1995, Volume II, pp. 2029-2039.

- [LAMMARI 99] LAMMARI N., *An Algorithm to Extract IS-A Inheritance Hierarchies from a Relational Database*, 18th International Conference on Conceptual Modeling, ER 99, Paris, France, November 1999.
- [LESSER 90] LESSER V.R., *An Overview of DAI: Viewing Distributed AI as Distributed Search*, Journal of Japanese Society for Artificial Intelligence, Vol. 5, N°4, R. Nakano et S. Doshita Editors, pp. 392-400.
- [LESSER 98] LESSER V., HORLING B., KCLASSNER F., RJA A., WAGNER T., ZHANG S., *A Next Generation Information Gathering Agent*, 4th International Conference on Information Systems Analysis and Synthesis, pp. 41-50, July 1998.
- [LITWIN 94] LITWIN W., *Multidabase Systems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1994.
- [MEBARKI 96] MEBARKI N, PIERREVAL H., KOUISS K., *Une approche multi-agents pour l'ordonnancement dynamique d'un système de production flexible*, *Ingénierie des Systèmes d'Information*, Hermes, Vol. 4, N°5, pp. 621-636, 1996.
- [MOLINA 94] MOLINA A., AL-ASHAAB, ELIS T.I.A., YOUNG R.I.M., BELL R., *A Review of computer Aided Simultaneous Engineering Systems in Computer Aided Simultaneous Engineering Systems*, Manufacturing Engineering Department, Loughbrough University of Technology, England, 1994.
- [MOTZ 98] MOTZ R., FANKHAUSER P., *Propagation of Semantic Modifications to an Integrated Schema*, 3rd International Conference on Cooperative Information Systems, IFCIS-CoopIS 98, New York City, New York, USA, August 1998.
- [MOULIN 96] MOULIN B., CHAIB-DRAA B., *An Overview of Distributed Artificial Intelligence, in Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, John Wiley & Sons Publishers, New-York, 1996.
- [NODINE 99] NODINE M., BOHRER W., NGU A.H., *Semantic Brokering over Dynamic Heterogeneous Data Sources in InfoSleuth*, 15th International Conference on Data Engineering, ICDE 99, Sydney, Australia, March 1999.
- [OATES 94] OATES T., NAGENDRA PRASAD M., LESSER V., *Cooperative Information Gathering: A Distributed Problem Solving Approach*, Technical Report, University of Massachusetts, April 1994.
- [OUKSEL 99] OUKSEL A., *A Framework for a Scalable Agent Architecture for Cooperating Heterogeneous Knowledge Sources*, in [KLU 99] , pp. 100-121.
- [PACHE 94] G. PACHE, *La logistique : enjeux stratégiques*, Vuibert entreprise, 1994.
- [PAPAZOGLU 92] Papazoglou MP., Laufmann SC., Sellis TK., *An organisational framework for cooperating intelligent information systems*, International Journal of Intelligent and Cooperative Information Systems, Vol. 1, N°3, 1992.
- [PARUNAK 96] PARUNAK H.V.D., *Application of Distributed Artificial Intelligence in Industry*, in Artificial of Distributed Artificial Intelligence, John Wiley & Sons Editors, New_York, pp.139-164, 1996.
- [PARUNAK 98a] PARUNAK H.V.D., VANDERBOK R., *Modeling The Extended Supply Network*, Industrial Technology Institute, 1998.

- [PARUNAK 98b] PARUNAK H.V.D., *What can Agents do in Industry, and Why ? An Overview of Industrially-Oriented R&D at CEC*, in Cooperative Information Agents II, LNCS 1435, Klusch and Weiss Editors, Springer-Verlag, pp. 1-18, 1998.
- [PARUNAK 99] PARUNAK H.V.D., SAVIT R., RIOLO L., CLAK S.J., *DASCh : Dynamic Analysis of Supply Chains*, Center for Electronic Commerce, 1999.
- [PATIL 92] PATIL R. ET AL., *The DARPA knowledge sharing effort*, Third International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning , Morgan-Kaufmann, 1992.
- [ROLSTADAS 94] ROLSTADÅS A., *Beyond Year 2000: Production Management in the Virtual Company*, IFIP WG5.7, Working Conference on Evaluation of Production Methods, Gramado, Brazil, march 21-29, 1994.
- [RONCARIO 94] RONCARIO C., *Interopérabilité entre SGBD : systèmes fédérés et systèmes multibases*, Technique et Sciences Informatiques, Vol. 13, n° 3, 1994.
- [SADEH 99] SADEH N.M., HILDUM D.W., KJENSTAD D., TSENG A., *MASCOT : An Agent-based Architecture for Coordinated Mixed-Initiative Supply Chain Planning and Scheduling*, Agent'99, Workshop on Agent Based Decision Support System for Managing the Internet-Enabled Supply Chain, Seattle, Whashington, May 1999.
- [SAUTER 99] SAUTER J.A., PARUNAK H.V.D., *ANTS in the Supply Chain*, Agent'99, Workshop on Agent Based Decision Support System for Managing the Internet-Enabled Supply Chain, Seattle, Washinton, May 1999.
- [SHETH 90] SHETH A., LARSSON M., *Federated Database Systems for Managing Distributed, Heterogenous and Autonomous Databases*, in [ACM 90].
- [SHETH 92] SHETH A., KASHYAP V., *So Far (Schematically) yet So Near (Semantically)*, IFIP WG 2.6 International Conference on Semantics of Interoperable Database Systems, Data Semantics 5, Lorne, Australia, November 1992.
- [SHOHAM 93] SHOHAM Y., *Agent-Oriented Programing*, Artificial Intelligence, n° 60, pp.51-93, 1993.
- [SICHMAN 92] SICHMAN J.S., DEMAZEAU Y., BOISSIER O., *When Can Knowledge-Based Systems Be Called Agents?*, 9th Brazilian Symposium on Artificial Intelligence, Rio De Janeiro, Brazil, 1992.
- [SKJELLAUG 90] SKJELLAUG B., HÄMMÄINEN H., SAATHOFF H., *Enterprises and Distributed CIM : Inter-organizational Communication*, Computers in Industry , Vol. 9, 1990.
- [SPINOSA 95] SPINOSA M.L., ESPINASSE B., CHOURAQUI E., *Distributed CIM and DAI: for a Knowledge and Multiagent Approach*, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vancouver , Canada, October 1995..
- [STRADER 98] STRADER T., LIN F., SHAW M., *Simulation of Oder Fulfillement in Divergent Assembly Supply Chains*, Journal of Artificial Societies and Social Simulation, Vol. 1, N°.2, 1998.
- [TEIGEN 96] TEIGEN R., BARBUCEANU M., *The Supply Chain Demonstrator*, Enterprise Integration Laboratory, University of Toronto, Report and User Guide, 1996.
- [TEIGEN 97] TEIGEN R., *Information Flow in a Supply Chain Management System*, PhD Thesis, University of Toronto, 1997.

- [THOMAS 90] THOMAS G., THOMPSON G., CHUNG C., BARKMEYER E., CARTER F., TEMPLETON M., FOX S., HARTMAN B., *Heterogenous Distributed Database Systems for Production Use*, in [ACM 90].
- [TRANVOUEZ 98] TRANVOUEZ E., ESPINASSE B., CHIRAC JP., *A Multi-Agent Based Scheduling System: a Cooperative and Reactive Approach*, 9th International Symposium on Information Control in Manufacturing, INCOM 98, Nancy-Metz, France, June 1998,.
- [TURKER 97] TÜRKER C., SAAKE G., CONRAD S., *Modeling Database Federation in Terms of Evolving Agents*, 10th International Symposium on Methodologies for Intelligent Systems, ISMIS 97, Charlotte, North Carolina, USA, October 1997.
- [VERNADAT 94] VERNADAT F., *Future R&D Directions for CIM Deployment*, European Workshop on Integrated Manufacturing Systems Engineering, pp. 3-6, Grenoble, France, December, 1994.
- [WAGNER 99] WAGNER G., *Towards Agent-Oriented Information Systems*, Technical Report, University of Leipzig, Germany, March 1999.
- [WIDOM 95] WIDOM J., CERI S., *Active Database Systems: Triggers and Rules for Advanced Database Processing*, Morgan Kaufmann, San Francisco, California, USA, 1995.
- [WIEDERHOLD 99] Wiederhold G., *Mediation to Deal with Heterogeneous Data Sources*, 2nd International Conference on Interoperating Geographic Information Systems, Interop 99, Zurich, March 1999.
- [WOOLDRIDGE 95] WOOLDRIDGE M., JENNINGS N.R., *Intelligent Agents: Theory and Practice.*, *Knowledge Engineering Review*, 1995, Vol. 10, No. 2. pp.115-52
- [ZENG 99] ZENG D.D., SYCARA K.P., *Agent-Facilitated Real-Time Flexible Supply Chain Structuring*, Agent'99, Workshop on Agent Based Decision Support System for Managing the Internet-Enabled Supply Chain, Seattle, Washington, May 1999.

8.7. Index

A

ACL-FIPA,4
Agent et Bases de Données Actives,11
Agent et Bases de Données Fédérées,12
Agent et Systèmes d'Information,10
Agent Informationnel et Chaîne Logistique,24
Agent Informationnel et Recherche d'Information,17
AI, Agent Informationnel,2, 16, 17, 18, 19
ANTS,29
AOIS, Agent Oriented Information System,2, 4, 16, 17, 21, 24, 26, 27
AOP, Agent Oriented Programming,4

B

BDI, Believe Desire Intention,12

C

Contract-Net,12

D

DASCh,27

I

IAD, Intelligence Artificielle Distribuée,2, 4, 15, 16, 29, 30

InfoMaster,21

Information Gathering,10, 16

Information Manifold,21

InfoSleuth,21

K

KIF,19, 21, 24

KL-ONE,19

KQML,4, 11, 19, 21

L

Loom,19

M

MASCOT,28

Multibases et Bases de Données Fédérées,5, 8

O

ODMG,5

OMT,4

ontologie,19, 20, 21, 22, 23, 24

R

RCDP, Résolution Coopérative et Distribuée de Problèmes,15

RDP, Résolution Distribuée de Problèmes,15

RETSINA,21

S

SHADE,21

SIC, Système d'Information Coopératif,2, 3, 4, 16, 20, 29, 30

SIMS,21

SMA, Système Multi Agent,2, 4, 15, 16, 26, 27, 30

Swarm,27

T

TSIMMIS,21

U

UML,4, 29