

THÈSE

présentée pour obtenir
le titre de

Docteur de l'Institut National Polytechnique de
Toulouse

ECOLE DOCTORALE SYSTEMES

Spécialité : SYSTEMES INDUSTRIELS

Par

Simon Enjalbert
Ingénieur ENI Tarbes

*Méthode et outil de simulation distribuée
pour l'accommodation de la conduite
de réseaux d'entreprises*

Soutenue le 19 octobre 2006 devant le jury composé de :

M.	Christian TAHON	Professeur à l'Université de Valenciennes	Rapporteurs
M.	Jean Luc PARIS	Professeur à l'IFMA	
M ^{me}	Caroline THIERRY	Maître de Conférences à l'Université Toulouse 2	Examineurs
M	Guy GOUARDERES	Professeur à l'IUT de Bayonne	
M.	Bernard ARCHIMEDE	Maître de Conférences à l'ENI de Tarbes	
M.	Philippe CHARBONNAUD	Professeur à l'ENI de Tarbes	

Equipe d'accueil : Production Automatisée - Laboratoire Génie de Production
UPRES EA N°1905 - ENI de Tarbes

"L'essentiel, c'est les trois points." R. C. et al..

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein de l'équipe Production Automatisée du Laboratoire Génie de Production de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes. Je remercie Monsieur Daniel Noyes, professeur à l'ENIT et directeur du LGP, de m'avoir accueilli au sein du LGP ainsi que Monsieur Bernard Grabot, responsable de l'équipe PA.

Je suis très honoré que Monsieur Christian Tahon, Professeur à l'université de Valenciennes, et Monsieur Jean Luc Paris, Professeur à l'Institut Français de Mécanique Avancée, aient accepté la charge de rapporter sur mes travaux de recherche. Malgré leur emploi du temps chargé, ils ont su me conseiller et m'orienter pour la rédaction de ce mémoire. Leur caution scientifique et leur approbation me touchent profondément.

Je remercie Madame Caroline Thierry, Maître de Conférences à l'université Toulouse Le Mirail, et Monsieur Guy Gouardères, Professeur à l'Institut Universitaire de Technologie de Bayonne, de m'avoir fait l'honneur de participer à mon jury de soutenance.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à mon directeur de thèse, Monsieur Philippe Charbonnaud, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, pour avoir dirigé mes travaux. Je le suis très reconnaissant pour ses conseils avisés qui m'ont permis d'avancer dans mes travaux. Sa disponibilité et sa rigueur scientifique ont été des atouts majeurs à la bonne conduite de mes recherches. Je suis très heureux d'avoir été encadré par Monsieur Bernard Archimède, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes. Je le remercie pour son investissement et son aide primordiale dans le développement de mes travaux. Ses compétences reconnues en informatique qui n'ont d'égal que sa bonne humeur ont été indispensables à mes recherches. Pour votre patience et votre confiance, je tiens à vous exprimer toute ma gratitude.

Je remercie toute ma famille, en particulier mes parents Alain et Marie Christine pour leur soutien et leurs accompagnements durant ces quatre années. Je n'oublie pas mes grands parents ainsi que tous ceux qui depuis Castres ont suivi mon long périple tarbais.

Je remercie également ceux dont j'ai eu à partager le bureau et qui ont eu à supporter mes goûts musicaux discutables, Rafael, Vincent et Roberta. Je tiens aussi à témoigner toute ma sympathie à l'ensemble des membres du LGP et de l'ENIT, chercheurs, enseignants et personnels auxiliaires, avec lesquels j'ai pu travailler dans une bonne humeur constante, plus particulièrement François et Thierry. Merci à Agnès, Beñat, Callaghan,

Cédrick, Eric, Hocine, Kreyket, Joël, Moussa, Pivert, Raymond, Sélim, Shadow, Valou, Witwit, Ytw, Zalux et les autres pour les bons moments passés aussi bien sur les terrains que sur les maps. Leur soutien, même en territoire ennemi, m'a toujours beaucoup touché. Je remercie enfin tous les membres de l'association oOo et particulièrement son président, anGel, pour leur aide spontanée et bienvenue.

Ma dernière pensée est adressée à mon amie Emilie. Celle-ci a su m'apporter douceur et joie afin de m'accompagner lors de ces quatre années.

Table des matières

Abréviations et acronymes	9
Introduction	11
1 Conduite de réseaux d'entreprises	15
1.1 Introduction	15
1.2 Réseaux d'entreprises	16
1.3 Problématique de la conduite réactive de réseaux d'entreprises	18
1.4 Modèles de conduite réactive d'activités de production	20
1.5 Modèles coopératifs d'ordonnancement	24
1.6 Modèle SCEP et mécanisme de coopération	26
1.7 Entreprises étendues et modèles de simulation de flux	30
1.8 Ateliers virtuels	32
1.9 Gestion des événements	34
1.10 Gestion du temps	36
1.11 Modèle MS-R-PAC	40
1.12 Techniques d'évaluation de performances pour la conduite	42
1.13 Démarche proposée pour la conduite réactive de réseaux d'entreprises	46
1.14 Conclusion	47
2 Méthode d'évaluation de la conduite de réseaux d'entreprises	49
2.1 Introduction	49
2.2 Démarche d'évaluation de la conduite d'entreprises	50
2.3 Modèle conceptuel de conduite réactive	51
2.4 Mise en oeuvre de l'architecture distribuée d'évaluation de la conduite	53
2.5 Fonction commande	57
2.6 Fonction suivi	60
2.7 Fonction communication	61
2.8 Fonction synchronisation	63
2.9 Modélisation des réseaux d'entreprises	68
2.10 Conclusion	72

3	Application à l'évaluation de performances pour l'accommodation de la conduite d'entreprises multi-sites	75
3.1	Introduction	75
3.2	Modélisation d'un projet réalisé par un réseau d'entreprises	76
3.3	Recherche d'une meilleure configuration logistique du réseau d'entreprise	82
3.4	Evaluation du plan distribué lors de perturbations d'un site	92
3.5	Evaluation du plan distribué en présence de perturbations du réseau	96
3.6	Vers une accommodation des plans multi-sites en présence de perturbations multiples	99
3.7	Performances de l'architecture d'évaluation	102
3.8	Conclusion	104
	Conclusion	107
	Bibliographie	110

Abréviations et acronymes

APS : Advanced Planning System, progiciel de planification et d'ordonnancement avancés,

AV : Atelier Virtuel, représentation informatique d'un atelier modélisé visant à être simulé,

CORBA : Common Object Request Broker Architecture, architecture permettant les communications clients - serveurs entre des objets distribués,

ERP : Enterprise Resource Planning, progiciel de gestion intégrée couvrant l'ensemble des fonctions de gestion de l'entreprise,

FLT : Federate Logical Time, temps de simulation observé pour un fédéré,

F-R-PAC : Fédération de Contrôle d'Activités de Production Réactif, outil de simulation pour l'évaluation de la faisabilité de plans multi-sites,

GL : Gestionnaire de Lancement, pilote le simulateur au sein du fédéré R-PAC,

GSF : Gestionnaire de Suivi de Flux, module permettant le suivi des performances des simulations,

HLA : High Level Architecture, protocole permettant les communications entre des fédérés,

L : valeur du *lookahead*,

LBTS : Lower Boundary Time Stamp, limite de dates, minimum qui correspond à la valeur maximale d'avance de temps qui est permise pour un fédéré au regard des autres éléments de la fédération,

lookahead : possibilité d'avance de temps qui est permise pour un fédéré, limitée par la valeur *L*,

MES : Manufacturing Execution System, progiciel de gestion au niveau atelier qui assure la continuité de la gestion des flux logistiques,

min : minute, unité de temps et de niveau de charge pour les tâches lancées sur les ateliers,

NER : Next Event Request, demande d'avance du fédéré au *RTI* d'avance dans le temps jusqu'au prochain événement,

OF : Ordre de Fabrication,

PAC : Production Activity Control, conduite d'activités de production,

RAV : Reflect Attribute Value, mise à jour de la valeur des attributs du *RTI* vers les fédérés,

RTI : Run-Time Infrastructure, implantation informatique du protocole HLA,

RTIA/FED A : RTI Ambassador / Federate Ambassador, ambassadeurs de communications entre fédéré et *RTI* pour HLA,

RTIG : RTI général, nom donné à la machine hôte de la fédération,

R@mses : Re@ctive Multi-Site Scheduling, logiciel d'ordonnancement distribué développé autour du modèle SCEP,

SCEP : Superviseur, Client, Environnement et Producteur, modèle multi-agent pour la résolution de problèmes d'ordonnements distribués,

SIMBA : progiciel de simulation développé et distribué par Lanner Group,

TAG : Time Advance Grant, autorisation d'avance du *RTI* vers le fédéré à la date du prochain événement,

TCP/IP : Transmission Control Protocol/Internet Protocol, protocole de communication,

TSO : Time Stamp Ordered, daté dans le temps pour les messages échangés entre les fédérés et la fédération,

UAV : Update Attribute Value, mise à jour de la valeur des attributs d'un fédéré vers le *RTI*,

UML : Unified Modeling Language, langage de modélisation utilisé pour représenter les diagrammes de classes ou de séquences,

wallclock : temps utilisateur qui pourrait être observé sur une horloge durant une simulation.

Introduction

Aujourd'hui, la globalisation des échanges et la mondialisation du marché sont représentatives des orientations et du fonctionnement de l'économie internationale. Les fusions, acquisitions ou absorptions menées par les groupes afin de renforcer leurs compétences dans certains secteurs d'activité sont courantes. La tendance des entreprises à se recentrer sur certaines activités ainsi que la recherche de flexibilité et de réactivité entraînent une coopération avec les fournisseurs et les clients et se concrétise par une logique de partage des réalisations, qu'elles soient technologiques ou logistiques. Dans ce contexte, les entreprises doivent faire face à une concurrence de plus en plus féroce avec un environnement en perpétuelle évolution. Les groupes industriels, plus ou moins grands, n'échappent pas à cette nouvelle donne. Les exigences difficiles à satisfaire des clients représentent une contrainte supplémentaire pour ces industriels. Les grands groupes se sont adaptés en travaillant avec des outils similaires et compatibles entre eux, capables d'organiser des productions sur différents sites. Les petites et moyennes entreprises et industries ne peuvent en revanche mettre en oeuvre les mêmes moyens. En effet, il est difficile pour de petites entités de travailler de la même manière, avec les mêmes moyens ou les mêmes savoirs. Les écarts culturels, géographiques, sociologiques sont autant de différences qui rendent ces coopérations délicates. De plus, le choix des partenaires avec lesquels se coordonner pour former des réseaux d'entreprises s'avère difficile. Il peut s'agir d'une collaboration ponctuelle pour la fabrication d'un produit, d'une coopération à moyen terme dans le cadre d'une relation client fournisseur voir même d'un partenariat à long terme. De nombreuses caractéristiques permettent de distinguer les réseaux d'entreprises qui font l'objet de notre étude.

Les réseaux d'entreprises sont des systèmes établis pour la production de biens ou de services afin de satisfaire les exigences d'un ou de plusieurs clients. Ils sont composés de partenaires aux savoirs-faire différents, aux équipements et aux réglementations variables, et peuvent être amenés à changer rapidement. Cependant, dans le but de s'adapter aux contraintes du marché, les entreprises doivent trouver les moyens de s'assurer de la faisabilité de leurs plans lors de leur participation à un ou plusieurs réseaux. Alors que de nombreux modèles de conduite d'entreprises existent, il n'existe que peu de moyens pour assurer la conduite efficace de tels réseaux. Des solutions souvent centralisées sont adoptées bien qu'elles ne correspondent pas à la réalité des systèmes étudiés. L'essor des

technologies de communication permet d'envisager un nouveau modèle décentralisé pour la conduite de réseaux d'entreprises.

Les politiques de conduite des réseaux d'entreprises sont généralement orientées vers la satisfaction du client sans pour autant chercher à optimiser la gestion de tels ensembles. La faisabilité de plans que nous souhaitons évaluer amène à considérer ces problèmes d'optimisation de la gestion lors de la conduite de réseaux d'entreprises. Les partenaires de ces réseaux peuvent aujourd'hui se trouver à plusieurs milliers de kilomètres l'un de l'autre. La distribution des tâches entre les différents sites prend alors un rôle important en termes de délais et de coûts. Une adaptation de la logistique doit pouvoir être réalisée à partir d'une meilleure configuration des réseaux étudiés.

Dans cette thèse, une méthode et un outil basé sur la simulation distribuée sont proposés pour réaliser l'évaluation de la faisabilité des plans multi-sites pour les réseaux d'entreprises. La méthode a pour but d'une part de déterminer la faisabilité de la production et d'autre part de trouver une meilleure configuration logistique dans le cadre de chaque stratégie d'ordonnancement évaluée. L'outil basé sur une architecture de simulation distribuée permet la simulation et le suivi de l'état du système en tout point du réseau d'entreprises. L'évaluation de performances permet l'accommodation de la conduite afin de déterminer la meilleure configuration permettant l'absorption d'un ordonnancement prévu.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres. Dans le premier, les réseaux d'entreprises sont définis. D'une manière générale, deux modèles sont nécessaires à la définition d'entreprises en réseau. Nous distinguons les modèles de conduite réactive d'activités de production et les modèles coopératifs d'ordonnancement. Bien que ne constituant pas l'objet de notre étude, la génération de plans est nécessaire pour l'évaluation de la faisabilité et les techniques d'ordonnancement distribué sont présentées. En revanche, les modèles issus de la littérature pour la conduite des réseaux d'entreprises considèrent le réseau comme une entreprise monosite et sont abordés de façon centralisée. La simulation événementielle facilite l'éclatement de tels modèles en s'appuyant sur la simulation d'ateliers. Le concept d'atelier virtuel pour la représentation des systèmes étudiés est défini. Cependant, la simulation de tels modèles de conduite nécessite une bonne gestion des événements et du temps au sein des simulateurs. A partir de travaux réalisés dans le domaine, une interface de communication et des mécanismes de coopération sont décrits afin d'assurer la conduite supervisée de ces réseaux simulés. Diverses techniques d'évaluation reposant sur le diagnostic de l'état du système sont présentées. Elles conduisent à la réalisation d'un plan prévu sans toutefois permettre l'optimisation de la coopération des partenaires du réseau. Afin de répondre à cet objectif, nous proposons une stratégie de conduite basée sur une architecture de simulation. Une accommodation de la conduite s'appuyant sur les résultats des simulations doit permettre de déterminer une meilleure configuration en réaction aux perturbations du système.

Dans le second chapitre, une méthode reposant sur un outil et sur une démarche itérative d'évaluation pour la conduite réactive est présentée. La conduite est conceptualisée sous la forme d'une architecture modulaire, composée d'une fonction pour la commande des ateliers et d'une fonction pour le suivi et l'évaluation des flux. La fonction commande permet la gestion des plans reçus depuis des logiciels d'ordonnancement externes, leur mise en oeuvre dans les ateliers simulés et la génération de perturbations pour contraindre le système. La fonction suivi permet la structuration des informations issues des simulations, la mesure de la charge, *i.e.* de l'occupation des machines dans les ateliers, la détection des écarts entre les grandeurs mesurées et celles attendues, et finalement permet le diagnostic de l'état du système. Une accommodation de la conduite est ensuite réalisable par modification du système. En fonction des objectifs de gestion et des contraintes qui s'exercent sur le système, une configuration capable d'absorber le plan prévu est définie. Les techniques mises en oeuvre pour assurer les communications au sein de l'outil proposé sont présentées. La synchronisation lors de simulations distribuées est expliquée. Différents types de modélisation sont détaillés afin de pouvoir étudier n'importe quel réseau d'entreprises.

Le troisième chapitre a pour objet l'évaluation des performances de la conduite proposée. Un cas d'étude est tout d'abord présenté. Nous proposons ensuite une simulation regroupant plusieurs simulateurs afin d'optimiser la gestion du réseau d'entreprise dans le cadre du système étudié. Différentes stratégies et conditions de réalisation des plans sont étudiées en considérant divers scénarios de fonctionnement. Les résultats de simulation obtenus sont présentés et analysés. Finalement, la méthode permet de dégager une bonne configuration de gestion pour la réalisation d'un plan donné. Les performances de l'outil sont évaluées afin de garantir l'évaluation de n'importe quelle configuration de réseau d'entreprises, permettant de montrer le caractère générique de l'outil et de la méthode pour l'accommodation de la conduite de réseaux d'entreprises.

Chapitre 1

Conduite de réseaux d'entreprises

1.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les réseaux d'entreprises au coeur de notre étude. Un réseau peut être analysé comme un ensemble d'entreprises respectant une certaine organisation. Lorsque les entreprises sont réparties sur des lieux distants, l'organisation est qualifiée de multi-sites. Les propriétés qui se dégagent des réseaux multi-sites sont abordées dans la section 1.2.

Ces réseaux d'entreprises et l'étude de leur conduite amènent à déterminer les limites et les enjeux de ce travail dans la section 1.3.

Les activités de production ainsi que les flux de pièces, de matières et d'informations sont au coeur de toutes les définitions. Les modèles de conduite réactive d'activités de production ont été proposés pour étudier le comportement de ces entreprises. Leurs particularités sont présentées dans la section 1.4.

Les réseaux d'entreprises sont créés afin de répondre aux besoins de clients. Les clients exigent de ces réseaux des niveaux de performances nécessitant une organisation des tâches lors de la phase d'ordonnancement. Aussi, les différents modèles coopératifs d'ordonnancement pour les réseaux d'entreprises sont décrits dans la section 1.5.

Le modèle développé dans notre laboratoire et reposant sur un mécanisme de distribution des ordres de fabrication est présenté. La technique d'ordonnancement ainsi que le protocole utilisé pour ce modèle sont détaillés dans la section 1.6.

Les réseaux de production ou d'information ont la particularité de véhiculer des flux. La simulation événementielle des flux et des ateliers de production apparaît comme une bonne solution pour l'étude de la conduite de réseaux d'entreprises. Le concept d'atelier virtuel est introduit lors de la simulation des ateliers de production. Différents travaux sont présentés dans les sections 1.7 et 1.8.

La gestion des événements devient délicate dès que la simulation est de grande taille. La coordination d'un grand nombre d'événements repose sur des mécanismes particuliers.

Différents protocoles et architectures peuvent être mis en oeuvre. De même, la gestion du temps et la synchronisation de ces événements nécessite la mise en oeuvre d'algorithmes et de protocoles spécifiques. Ils sont présentés dans les sections 1.9 et 1.10.

Un modèle distribué capable de simuler des activités de production pour la conduite d'activités de production pour les réseaux d'entreprises a été défini lors des travaux précédents dans le laboratoire [Archimède *et al.* , 2003b]. Une analyse montrant les points forts et les points faibles de cet outil est effectuée. Ses spécificités et ses limites sont présentées dans la section 1.11.

Un Etat de l'Art des techniques employées pour l'évaluation de performances pour la conduite de réseaux d'entreprises est proposé dans la section 1.12.

Compte tenu des analyses préliminaires, une démarche pour notre travail est définie dans la section 1.13 de ce chapitre. Elle permet de fixer le cadre du travail abordé dans cette thèse.

1.2 Réseaux d'entreprises

Notre étude s'intéresse plus particulièrement au comportement des réseaux d'entreprises. Nous présentons les différents concepts utilisés dans la littérature pour définir ces réseaux.

La définition la plus courante des réseaux d'entreprises est celle qui les présente comme une succession de relations clients fournisseurs. Les entreprises collaborent autour de la fabrication de produits ou de services et forment des chaînes logistiques. La chaîne logistique se définit par les flux des produits et de l'information le long des processus logistiques à partir de l'achat des matières premières jusqu'à la livraison des produits finis au consommateur. La chaîne d'approvisionnement inclut tous les fournisseurs de service et les clients. Une définition de la chaîne logistique pour un produit est donnée dans [Tayur *et al.* , 1999] : "un système de sous-traitants, de producteurs, de distributeurs, de détaillants et de clients entre lesquels s'échangent les flux matériels dans le sens des fournisseurs vers les clients et des flux d'information dans les deux sens". Une autre définition s'appuyant sur les entreprises participantes est donnée dans [Rota, 1998] : "La chaîne logistique d'un produit fini se définit comme l'ensemble des entreprises qui interviennent dans les processus de fabrication, de distribution et de vente du produit, du premier des fournisseurs au client ultime."

Si les chaînes logistiques ont une existence reconnue, leur gestion nécessite un effort commun de la part des membres de la chaîne. Une définition de la gestion de la chaîne logistique est donné dans [Davis & O'Sullivan, 1999] : "le management de la chaîne logistique est le management efficace du réseau d'usines et des options de distribution qui autorise les fonctions d'approvisionnement en matériaux, la transformation de ces matières en produits intermédiaires ou finis, et la distribution des produits finis aux clients". Les

entreprises s'organisent de nos jours en réseau afin de résister à l'environnement compétitif lié aux demandes continuellement changeantes des clients. Cette organisation permet aux entreprises une meilleure flexibilité face aux besoins des clients. La croissance des groupes industriels et leur intérêt commun ont conduit à des organisations multi-sites de leurs systèmes de production. La création de ces nouvelles chaînes logistiques entraîne la nécessité de bien comprendre le cadre et de gérer de telles coopérations pour ces entreprises. Le management de la chaîne logistique est associé au management du flux de matières et d'informations intra et inter-entreprises, pour les vendeurs, les usines de fabrication et d'assemblage et les centres de distribution dans [Thomas & Griffin, 1996]. Il apparaît que les principaux processus de la chaîne logistique sont la planification et le contrôle de la production. La distribution et la logistique qui incluent le management de la récupération des inventaires, le transport et la livraison du produit final y ont été ajoutées dans [Beamon, 1998].

L'organisation et la gestion de la distribution de la production et des métiers sont les enjeux essentiels de la chaîne logistique [Stadtler, 2000]. Les flux de produits et d'information le long des processus logistiques à partir de l'achat des matières premières jusqu'à la livraison des produits finis au consommateur sont étudiés. Les logiciels modernes de gestion de la chaîne logistique (type Enterprise Resource Planning [Stadtler & Kilger, 2000] ou Advanced Planning System [Meyr *et al.*, 2000]) intègrent des méthodes de conduite d'ateliers. Les entreprises choisissent aujourd'hui de regrouper leurs activités au sein de pôles d'excellence, ainsi n'est-il pas rare de devoir produire une pièce sur plusieurs sites afin d'augmenter la productivité. Compte tenu des demandes changeantes des clients, les configurations de ces réseaux varient fréquemment et les capacités de production sont soumises à des variations inhérentes aux performances des partenaires du réseau d'entreprises. Ces phénomènes font que les réseaux d'entreprises sont en perpétuelle évolution et qu'il est difficile d'organiser de telles entités.

De nouvelles définitions sont venues caractériser les différents types d'organisation. Des réseaux formés par une entreprise et l'ensemble de ses partenaires directs, *i.e.* les clients, les fournisseurs et les prestataires, sont considérés comme un tout intégré devant fonctionner comme une entreprise unique. Ces réseaux de co-traitants et sous-traitants forment des entreprises étendues. L'entreprise étendue est la formation d'une proche coordination dans la conception, le développement, le calcul des coûts et la coordination des ordonnancements respectifs de chaque entreprise en faisant coopérer des entreprises manufacturières indépendantes et leurs fournisseurs associés. D'après Jagdev et Browne, le concept d'entreprise étendue est en partie né des essais des entreprises, géographiquement réparties, de construire des partenariats pour gagner en compétitivité [Jagdev & Browne, 1998]. Ce concept s'étend à toutes les entreprises, aux services ainsi qu'aux ressources extérieures qui collaborent. Les buts sont multiples : réduction des durées de fabrication, diminution des temps de communication, baisse des durées de développement de nouveaux produits,

création d'organisations plus efficaces, etc. Pour Adesta et Agusman l'entreprise étendue constitue le plus haut degré d'intégration inter-entreprises [Adesta & Agusman, 2004]. Les aspects tels que la culture, la langue et l'éloignement géographique représentent autant de difficultés que l'entreprise étendue doit surmonter. Le développement d'une planification stratégique pour l'entreprise étendue doit servir de première méthode générique pour les organisations afin qu'elles évaluent leurs capacités et qu'elles se dirigent vers une coopération efficace.

Si l'entreprise étendue est une coopération stable pour développer des relations à long terme avec sous-traitants et fournisseurs, l'entreprise virtuelle est plutôt un réseau temporaire de compagnies indépendantes pour réaliser un produit spécifique et disparaître avec lui. Celles-ci coopèrent de façon étroite le temps nécessaire à la satisfaction du besoin afin de réagir aux demandes du marché et s'adapter rapidement. L'entreprise virtuelle est le concept mis en oeuvre par les entreprises pour gagner en agilité. La notion de chaîne logistique agile et sa gestion sont traités dans [Azevedo & Souza, 2000]. Paradoxalement, pour Rostaldas [Rostaldas, 1998], compte tenu du degré d'intégration plus fort et du champ de coopération plus large, l'entreprise étendue peut être considérée comme un cas particulier d'entreprise virtuelle. De manière plus générale, on considère plutôt l'entreprise étendue comme une extension de l'entreprise virtuelle.

Dans la section suivante, la problématique relative à la conduite réactive de ces réseaux d'entreprises est abordée afin de déterminer quels axes de développement ont été retenus pour la poursuite de nos travaux.

1.3 Problématique de la conduite réactive de réseaux d'entreprises

Compte tenu des différentes définitions d'organisations en réseau que nous venons de détailler, notre travail se situe au niveau des coopérations plus ou moins durables entre des partenaires qualifiés de petits ou moyens. Nous nous intéressons à l'étude de l'entreprise étendue que nous appelons réseau d'entreprises.

De nombreuses spécificités permettent de définir un réseau d'entreprises. Il se caractérise principalement par son système de production et ses ateliers répartis géographiquement qui sont au centre de ces coalitions d'entreprises en réseau. Un réseau doit aussi être très réactif aux aléas du marché et s'adapter rapidement aux contraintes des clients. Cette réactivité peut s'exprimer au travers des choix des partenaires du réseau qui peuvent changer rapidement en fonction des circonstances et des besoins. Mais un réseau d'entreprises se caractérise aussi par les spécificités des acteurs qui le composent. Les entreprises souhaitent garder leur autonomie et leur fonctionnement propre dans le cas où la coopération s'achèverait. De plus, certaines entreprises peuvent être impliquées dans différents réseaux

et souhaitent pouvoir garder le contrôle de leurs activités de production sans être dépendantes d'un réseau en particulier. D'autre part, participer à un réseau ne signifie pas pour une entreprise de tout mettre en commun. En effet, les acteurs souhaitent généralement conserver confidentiels leurs savoir-faire. Les réseaux étudiés par la suite sont constitués d'entreprises mettant en commun leurs moyens de production durant un temps limité, pour des activités précises, dans des buts clairement définis, tout en ayant la garantie de conserver leur autonomie et la confidentialité de leurs méthodes.

La conduite de ces réseaux consiste à organiser les activités de production lors des phases d'ordonnancement et le pilotage des activités de production dans les ateliers. Différents moyens sont disponibles afin d'assurer cette conduite. Il est possible d'agir sur les ressources humaines ou matérielles des différents partenaires afin de réaliser un projet défini par un cahier des charges. Il est aussi possible de faire évoluer le réseau en impliquant de nouveaux acteurs. La conduite est dite réactive lorsque les données issues du suivi de production sont traitées et que la politique de gestion permet de garantir les performances pour l'objectif fixé pour le réseau d'entreprises. Lorsque les performances se dégradent, le système de conduite doit être en mesure de mettre en œuvre des réglages ou une reconfiguration pour satisfaire l'objectif avec des performances acceptables. Lorsque l'objectif doit être changé une restructuration doit être proposée pour continuer à produire. L'accommodation désigne l'ensemble de ces actions d'adaptation, de reconfiguration et de restructuration de la conduite et lui confère ce caractère réactif.

Cependant, les réseaux de petites et moyennes entreprises concernées par notre travail ne bénéficient pas de logiciels de gestion semblables à ceux des grands groupes. La conduite de ces réseaux et le pilotage des ateliers nécessitent l'adaptation de nombreux logiciels différents suivant les entreprises. Le manque d'outils et de méthodes pour intégrer les processus de ces diverses organisations nous amène à reconsidérer les modèles utilisés pour la conduite des activités de production. Un modèle de conduite réactive d'activités de production proche de la réalité de ces réseaux doit être proposé. Celui-ci doit être distribué afin de garantir l'autonomie et la confidentialité au sein du réseau. De plus, l'ordonnancement de tâches doit aussi être distribué et un modèle retenu à cet effet. Enfin, un outil de simulation doit permettre d'évaluer la faisabilité des plans générés avant leur lancement dans les ateliers de fabrication. C'est donc une architecture globale comprenant un ordonnanceur distribué, un modèle de conduite et un simulateur d'ateliers distribués qui doivent être intégrés au sein d'un outil commun pour les partenaires des réseaux d'entreprises.

L'évaluation de la faisabilité des plans de production pour un réseau d'entreprises avant leurs lancements au niveau des ateliers doit permettre de s'assurer de la capacité d'un réseau à assurer une production dans les conditions exigées par un ou des clients. Le but est de fournir un outil d'aide à la décision pour prévoir les moyens à mettre en œuvre dans le cadre d'une coopération de ce type entre différents partenaires.

Dans la section suivante, des modèles de conduite d'activités de production sont présentés afin de définir celui qui conviendrait le mieux pour l'outil que nous souhaitons développer.

1.4 Modèles de conduite réactive d'activités de production

Nombre de modèles ont été développés afin d'étudier le comportement des entreprises. Les modèles conceptuels dédiés à la conduite d'activités de production dans les ateliers donnent une description des structures de pilotage et de leurs fonctions. Divers modèles basés sur différentes décompositions des systèmes de production ont été proposés. Les plus significatifs sont présentés par la suite.

Le modèle N.I.S.T. (National Institute of Standards and Technics) [Jones & Saleh, 1990] propose une décomposition du système physique de production suivant une hiérarchie de cinq niveaux. Le modèle N.I.S.T est un modèle multi-niveau et multi-couche. La notion de multi-niveau est liée à la décomposition hiérarchique (usine, atelier, cellule, poste de travail et équipements) et la notion de multi-couche est liée à trois fonctions. La fonction d'adaptation génère les plans de production et révisé les plans existant lors de perturbations. La fonction régulation assure le suivi d'activités de production, transmet le travail et supervise le retour à un fonctionnement normal lors de petits incidents. Enfin, la fonction d'optimisation évalue les plans de production de la fonction d'adaptation, génère les ordonnancements et les met à jour en fonction des informations de la fonction régulation. Ce modèle inclut la fonction de planification et est construit de manière centralisée. Son adaptation dans le cadre de réseaux d'entreprises n'est donc pas envisageable.

L'approche PABADIS (Plant Automation BAsed on DIstributed Systems) [Luder *et al.*, 2004] vise à résoudre les problèmes de flexibilité horizontale aussi bien que verticale dans la structure de conduite. La flexibilité verticale est relative à la structure hiérarchique des entreprises où il faut intégrer tous les niveaux depuis le niveau décisionnel d'ERP (Enterprise Resource Planning) jusqu'au niveau de conduite des ateliers. La flexibilité horizontale concerne la participation de plusieurs acteurs et la capacité de chacun à coopérer facilement. Le but est de dissoudre la couche de MES (Manufacturing Execution System) et de diviser ses fonctionnalités en une partie centralisée, pouvant être attachée au système d'ERP, et en une autre partie décentralisée, mise en application par les agents logiciels mobiles. Cette flexibilité est atteinte par l'utilisation d'agents mobiles et résidentiels pour établir une intelligence distribuée au niveau des systèmes d'exécution de fabrication et de conduite. Cette approche ne concerne pas directement la conduite des activités de production. Malgré la distribution partielle des agents, l'approche nécessite le fonctionnement d'une partie centralisée et ne peut donc être retenue car elle n'est pas complètement

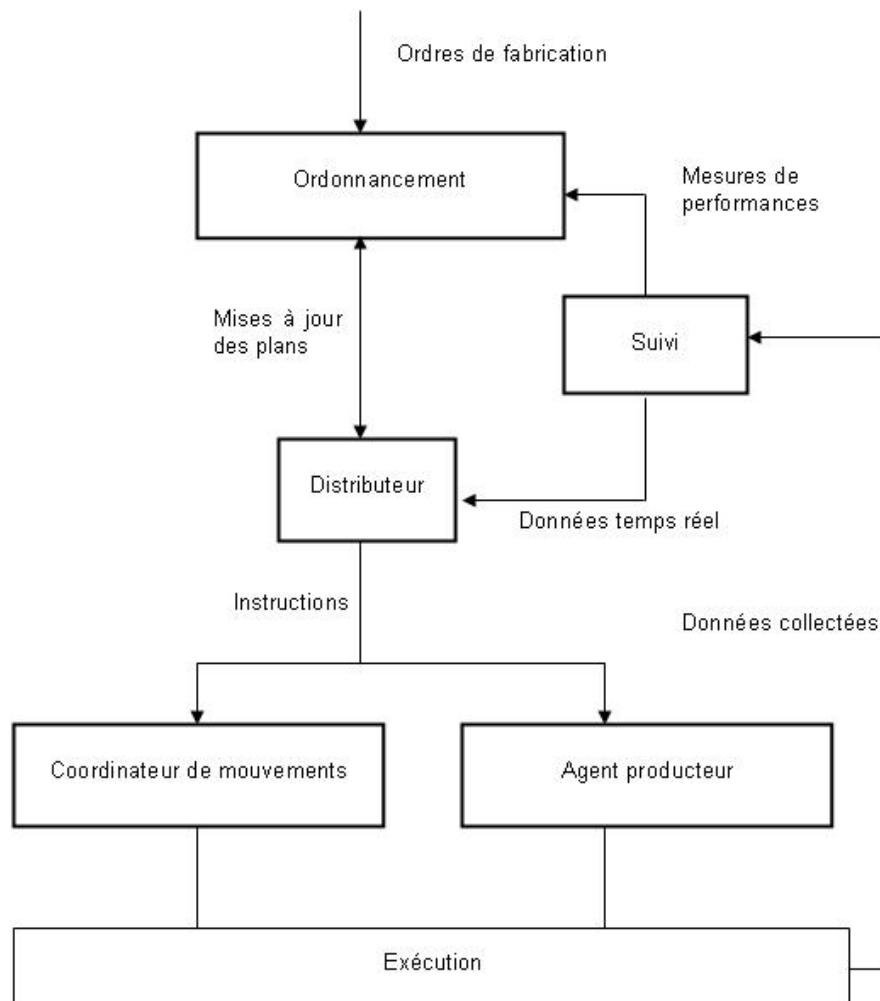


FIG. 1.1 – Modèle PAC d’après [Browne, 1988].

distribuée.

Le modèle PAC (Production Activity Control) présenté dans [Browne, 1988, Lyons *et al.*, 1990] a été proposé pour développer des systèmes de contrôle de production intégrée. Le modèle PAC s’insère dans une structure globale de gestion de production hiérarchisée basée sur une décomposition suivant les horizons de prise de décision stratégique, tactique et opérationnelle. Le système de gestion de production comprend un système de coordination qui permet de coordonner le fonctionnement des différents systèmes de pilotage, chacun étant dédié à un atelier particulier dans l’entreprise. Ce modèle conceptuel de système de conduite d’activités de production construit autour de cinq modules est présenté sur la Figure 1.1. Le module d’ordonnement nécessite les informations de fabrication issues de l’atelier. Les gammes, les besoins en ressources, les capacités et les mesures donnant l’état de l’atelier sont utilisées afin de générer les plans de production pour les OF (Ordres de Fabrication). Le module distributeur permet de déterminer l’enchaînement final des

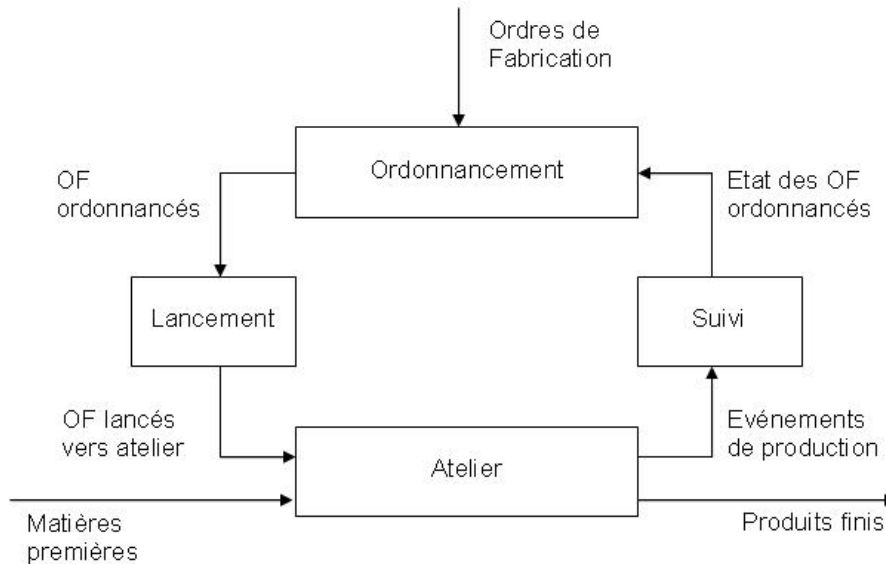


FIG. 1.2 – Modèle conceptuel R-PAC.

tâches au niveau de l'atelier. La coordination de chaque plan pour les ateliers et des mouvements de matières est assurée par ce module. Le module de suivi mesure et enregistre les données issues de l'atelier pour la conduite effective des activités de production. Le module coordinateur de mouvements est responsable de la coordination du transport des ressources ainsi que de l'interface entre le module distributeur, et les transports et les stockages réels de l'atelier. C'est un module qui assure une interface pour la logistique. Enfin le module de l'agent producteur concerne la conduite des processus pour chaque atelier. Il a accès à toutes les informations pour l'exécution des opérations dans l'atelier. Des modifications ont été apportées à ce modèle conceptuel dans [Archimède *et al.*, 2003a]. Un nouveau modèle est proposé sur la Figure 1.2. L'ensemble des OF est ordonnancé dans le but d'être distribué vers les ateliers. Le lancement a pour rôle de coordonner les postes de travail et de préparer les phases à réaliser. Les événements au niveau de la fabrication dans l'atelier sont suivis pour établir un état de la production. Ce suivi réunit les activités de collecte en temps réel de données issues du système physique ainsi que leur traduction afin de les rendre utilisables pour la prise de décision. Ce modèle simplifié met en oeuvre les modules de coordination et de production de façon intégrée au niveau de l'atelier.

Le projet ESPRIT #809 [Puym, 1990] présente une approche similaire à celle de PAC. Les différents modules communiquent par l'intermédiaire d'une base de donnée. L'ordonnancement génère un plan de travail pour les réalisations des OF en fonction de la gamme. Le lancement est effectué sur les différentes machines. Le module de suivi collecte les informations avec les données provenant de l'atelier. Un système à base de connaissance décide de la date d'un nouvel ordonnancement et de la stratégie d'ordonnancement. La réactivité du modèle PAC ne peut être considérée qu'en présence de perturbations au

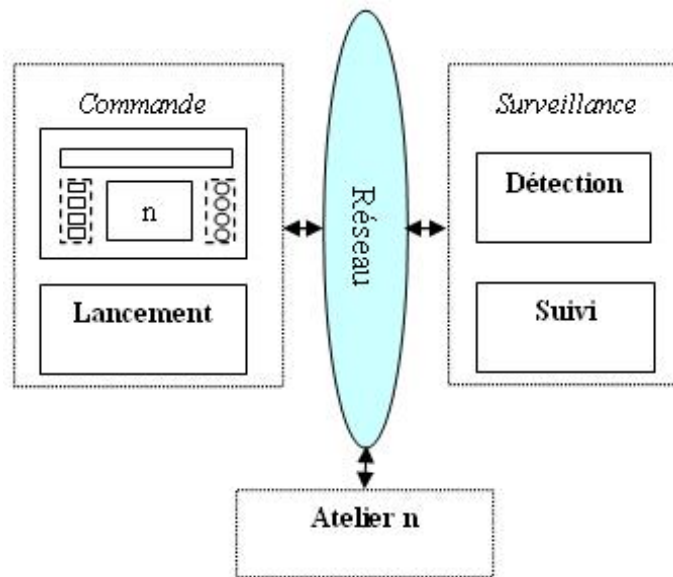


FIG. 1.3 – Modèle de référence R-PAC.

niveau de l'atelier. Archimède *et al.* proposent d'améliorer la réactivité pour les systèmes d'ordonnancement en définissant une nouvelle architecture logicielle basée sur le modèle conceptuel R-PAC (Reactive PAC) dans [Archimède *et al.* , 2003b]. La Commande et la Surveillance sont les deux principaux composants du modèle de référence de conduite réactive R-PAC, présenté sur la Figure 1.3. Pour la commande, un ordonnanceur distribué est associé à un module de lancement des tâches vers l'atelier n . Pour la surveillance, deux fonctions sont combinées pour suivre et détecter tous les événements. Le modèle PAC modifié, ainsi que l'extension R-PAC qui en a été faite, semble le plus intéressant compte tenu de la séparation des différentes fonctions. De plus, la construction de ce modèle peut être totalement distribuée.

Tous les modèles présentés proposent une architecture pour les systèmes de production et permettent de comprendre les fonctions et les interactions entre les différentes entités qui les composent. Ils peuvent aussi servir de base pour la conception et l'implantation de tels systèmes. Les modèles de conduite réactive d'activités de production proposent tous des fonctions de planification, d'adaptation en fonction des perturbations, de mise en oeuvre des plans générés et de suivi des informations. Cependant, ces modèles s'appuient principalement sur les architectures centralisées ou font appel à des fonctions centrales qui ne satisfont pas les exigences de la distribution des réseaux d'entreprises. Dans la section suivante, nous abordons la notion de modèle coopératif d'ordonnancement indépendamment de la conduite afin de pouvoir dissocier les fonctions de planification et de conduite.

1.5 Modèles coopératifs d'ordonnement

Les modèles de conduite d'activités de production intègrent fréquemment des fonctions de planification. Cependant, lors de la distribution des tâches sur différents sites dans le cadre d'un réseau d'entreprises, les logiciels d'ordonnement utilisés localement peuvent ne pas fonctionner. Des modèles de planification distribuée ont été développés dans le cadre de fabrications sur plusieurs sites. L'approche multi-agent, telle qu'elle est conçue en intelligence artificielle distribuée par Ferber [Ferber, 1989], semble pouvoir être transposée et appliquée avec intérêt dans le cas d'entités coopératives d'ordonnement. Néanmoins, l'Etat de l'Art en planification de production est encore largement dominé par des solutions centralisées. Dans cette section, nous présentons des modèles coopératifs d'ordonnement.

Afin de rendre les systèmes plus réactifs aux perturbations, une plus grande autonomie est donnée aux bas niveaux décisionnels. On peut ainsi ramener les décisions d'un réseau d'entreprises aux décisions d'ateliers coopérants. L'atelier bénéficie ainsi de plus d'autonomie, c'est un centre de décision qui désigne les actions possibles dans un espace délimité par des contraintes [Erschler *et al.* , 1997]. Des marges temporelles aident à la détermination d'ensembles de solutions d'ordonnement admissibles, des choix pouvant être faits parmi des solutions pour absorber des perturbations [Billaut & Roubellat, 1996, Roubellat & Billaut, 1997]. L'utilisation de gammes dynamiques [Archimède, 1998] permet au décideur de modifier l'ordre d'exécution des tâches lors de l'apparition de perturbations. La flexibilité des machines de l'atelier est un moyen d'améliorer la réactivité. Il est ainsi possible de réaffecter des tâches perturbées vers des machines capable de les réaliser. L'ordonnement distribué permet d'apporter une autonomie pour la prise de décision et une flexibilité pour la répartition des charges de production.

Les logiciels classiques ne fournissent pas le support nécessaire pour les organisations en réseaux ou distribuées et sont clairement insuffisants en ce qui concerne la planification et la coordination des activités pour ces environnements. La personnalisation des produits et les demandes plus pointues des clients amènent les industries à revoir leurs systèmes de fabrication et à adapter leurs logiciels d'ordonnement afin de répondre au mieux aux nouvelles contraintes du marché. L'exemple de l'industrie de la chaussure traité dans [Barnett *et al.* , 2004] présente une solution de plans distribués afin de fournir des ordonnancements réactifs aux différents collaborateurs. Les plans locaux des ateliers sont fournis par un ordonnanceur collectif. Cette proposition repose sur deux niveaux d'ordonnement et ne convient donc pas pour une architecture entièrement distribuée. Une architecture multi-agent pour la planification temps réel de commandes des clients aux entreprises de production distribuées a été proposée dans [Azevedo *et al.* , 2004]. La visibilité augmentée d'information, la détection précoce des perturbations, la production synchronisée et la collaboration de planification dans la chaîne logistique sont les enjeux

essentiels. D'autres travaux sur la planification globale et les promesses de commandes ont été mis en application à l'aide d'un système distribué et décentralisé d'information basé sur une architecture d'agents. Un ensemble d'agents hétérogènes pour l'ordonnancement dynamique a été proposé [Cowling *et al.* , 2004]. Chaque agent incarne son propre modèle d'ordonnancement et réalise son ordonnancement prédictif-réactif en tenant compte des objectifs locaux, de l'information en temps réel et des informations reçues d'autres agents. La communication est effectuée par l'échange de messages asynchrones traitant des ordonnancements locaux afin de produire d'un ordonnancement globalement bon. Enfin, un modèle d'ordonnancement distribué basé sur le comportement des agents participants a été proposé par Tharumarajah [Tharumarajah, 1998]. Ces diverses propositions reposant sur des systèmes multi-agents mettent en oeuvre des caractéristiques particulières non nécessaires et difficilement adaptables à notre étude. De plus, la taille des ordonnancements et l'absence de gestion des moyens de transport ne permettent pas de garantir pas le bon fonctionnement de ces outils dans le cadre d'ordonnements multi-sites.

Dans le cadre du projet ESPRIT #8615 LOCOMOTIVE (Logistic Chain Multidimensional Design Toolbox with Environmental Assessment), Hameri et Paatela ont proposé un outil de simulation pour la planification [Hameri & Paatela, 1995]. Les travaux présentés par Ait Hssain *et al.* dans [Hssain *et al.* , 1998] concernent une approche basée sur la simulation pour l'évaluation de performance de partenaires industriels dans le cadre de l'entreprise étendue. Cette approche s'intéresse à la planification globale qui donne les capacités de chaque fournisseur et à la simulation des flux des fournisseurs et de l'ensemble de l'organisation pour l'établissement d'une planification. Ce projet intègre la planification des moyens logistiques mais ne repose pas sur une architecture distribuée.

Des approches distribuées nécessitent une augmentation des communications et la charge croissante de ces réseaux devient un facteur important. Dans [Penya & Sauter, 2002], une approche distribuée d'usine automatisée basée sur l'utilisation d'agents mobiles est présentée dans le cadre du projet PABADIS. Il apparaît que les ordonnancements distribués prévoyant plusieurs étapes à l'avance utilisent plus de ressources pour leurs communications mais permettent d'éviter certaines surcharges liées au processus de réordonnement. Néanmoins, la compatibilité entre cette méthode d'ordonnement et la simulation n'est pas garantie. La détection de perturbations au niveau du simulateur risque de contraindre le fonctionnement du réordonnement prévu par l'ordonneur. Nishi *et al.* proposent un système autonome et décentralisé d'optimisation pour les processus de production multi-site. Le système, décrit dans [Nishi *et al.* , 2005], consiste en trois sous-systèmes de planification de ressources, de distribution de plans et d'ordonnement décentralisé qui appartiennent à chacun des sites qui constituent l'entreprise étendue. Les résultats des simulations d'ordonnements sont supérieurs à ceux obtenus par un système de planification hiérarchique classique en terme d'optimisation d'ordonnement. La mise en oeuvre d'un tel système dans l'outil semblant trop compliquée,

nous avons préféré écarter cette possibilité.

La simulation peut être utilisée pour la génération de plans de production distribués pour les ateliers virtuels. Dans [Clegg *et al.*, 2000], le projet PIPSEE (Product Introduction Process : a Simulation in the Extended Enterprise) concerne l'amélioration de l'exécution du processus d'introduction de produits dans une entreprise étendue du secteur aéronautique. Ce projet repose sur la simulation pour la génération dynamique de plans de production. Cependant les transports ne sont pas pris en compte dans ces ordonnancements.

Il apparaît que l'ordonnancement de plusieurs ateliers ne peut se résumer à la somme des ordonnancements de ces ateliers. D'autre part, les solutions centralisées sont trop lourdes à manipuler et le nombre de tâches à ordonnancer peut accroître grandement le temps de planification. De plus, tous les calculs sont à reprendre en cas de réordonnement. Les solutions distribuées peuvent être efficaces dans le cadre de réseaux d'entreprises. Nous présentons dans la section suivante les travaux qui ont été menés et les mécanismes mis en oeuvre pour la réalisation de ces ordonnancements au sein de notre laboratoire.

1.6 Modèle SCEP et mécanisme de coopération

Les approches par systèmes multi-agents dans les problèmes d'ordonnement sont nombreuses et nous pouvons trouver dans [Shen & Norrie, 1999] un Etat de l'Art en recensant plus d'une trentaine. Les travaux menés au Laboratoire de Génie Industriel ont conduit à la définition d'un modèle SCEP (Superviseur, Client, Environnement et Producteur) capable de réaliser des ordonnancements distribués. Le mécanisme de coopération du modèle SCEP que nous proposons repose sur le protocole Contract Net. Ce modèle peut être étendu et utilisé dans le cadre de simulations de grande taille.

Le modèle multi-agent SCEP, acronyme de ses composants, a été proposé pour résoudre les problèmes d'ordonnement dans [Archimède & Coudert, 2001b]. Le modèle SCEP présenté dans [Archimède & Coudert, 2001a] et repris sur la Figure 1.4 est un modèle distribué introduisant une coopération indirecte entre les agents Ordres de Fabrication représentant les agents Clients et les agents Machines représentant les agents Producteurs. Cette coopération est synchronisée par l'intermédiaire d'un environnement type "Tableau noir" sous le contrôle d'un agent Superviseur. Le "Tableau noir" est le lieu d'échange des messages durant les négociations entre les agents. L'agent superviseur lance d'abord les agents clients et demande aux agents producteurs d'attendre. Chaque agent client effectue ses actions, indépendamment du comportement des autres agents. Dans le cadre de l'utilisation de SCEP pour résoudre des problèmes d'ordonnement, les actions de l'agent client consistent en la proposition de ses services pour la réalisation d'OF. L'agent client informe le superviseur lorsqu'il a terminé. Une fois enregistrée la

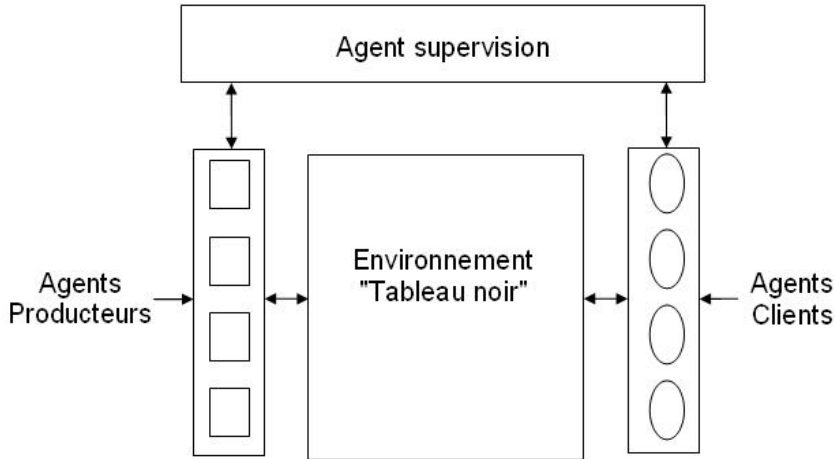


FIG. 1.4 – Modèle SCEP.

dernière action du dernier agent client, le superviseur active les agents producteurs et retient les agents clients. Les agents producteurs effectuent à leur tour leurs actions et en informe le superviseur dès qu'ils ont terminé. Pour les problèmes d'ordonnancement, ses actions consistent en des réponses aux différents agents clients qui avaient proposés leurs services. Une fois la dernière action du dernier agent producteur effectuée, l'agent superviseur redonne le contrôle aux agents clients. Cette alternance pour l'activation des agents clients puis producteurs est répétée jusqu'au positionnement final de tous les ordres de fabrication sur toutes les machines de l'environnement dans le cadre de l'utilisation du modèle SCEP pour l'ordonnancement distribué de tâches.

Le protocole Contract Net pour l'allocation de tâches dans le cadre de simulations multi-agents, proposé dans [Smith, 1980, Smith & Davis, 1981], repose sur la notion d'appel d'offres sur des marchés. La relation entre producteurs et clients est créée par des appels d'offres et par une évaluation des propositions soumises. Dans une première étape, le client fait un appel d'offres aux agents qui peuvent réaliser la tâche. Dans une seconde étape, les producteurs utilisent la description de la tâche pour construire une proposition qu'ils renvoient au client. Dans une troisième étape, le client reçoit et évalue les propositions puis affecte la tâche au meilleur producteur. Enfin dans une quatrième étape, le producteur qui a reçu la tâche confirme son intention d'effectuer celle-ci. Cependant, ce protocole Contract Net connaît quelques limites. Principalement, il ne peut gérer plusieurs négociations en parallèle et le séquençage des opérations nuit à la qualité des réponses. De plus, si une proposition s'avère meilleure qu'une autre, les engagements pris précédemment sont rompus, nécessitant de relancer le processus quitte à obtenir une solution moins satisfaisante. De nombreuses améliorations ont été portées à ce modèle afin de le rendre plus efficace. Le FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) a apporté une première modification à Contract Net par l'ajout de messages de refus ou de confirma-

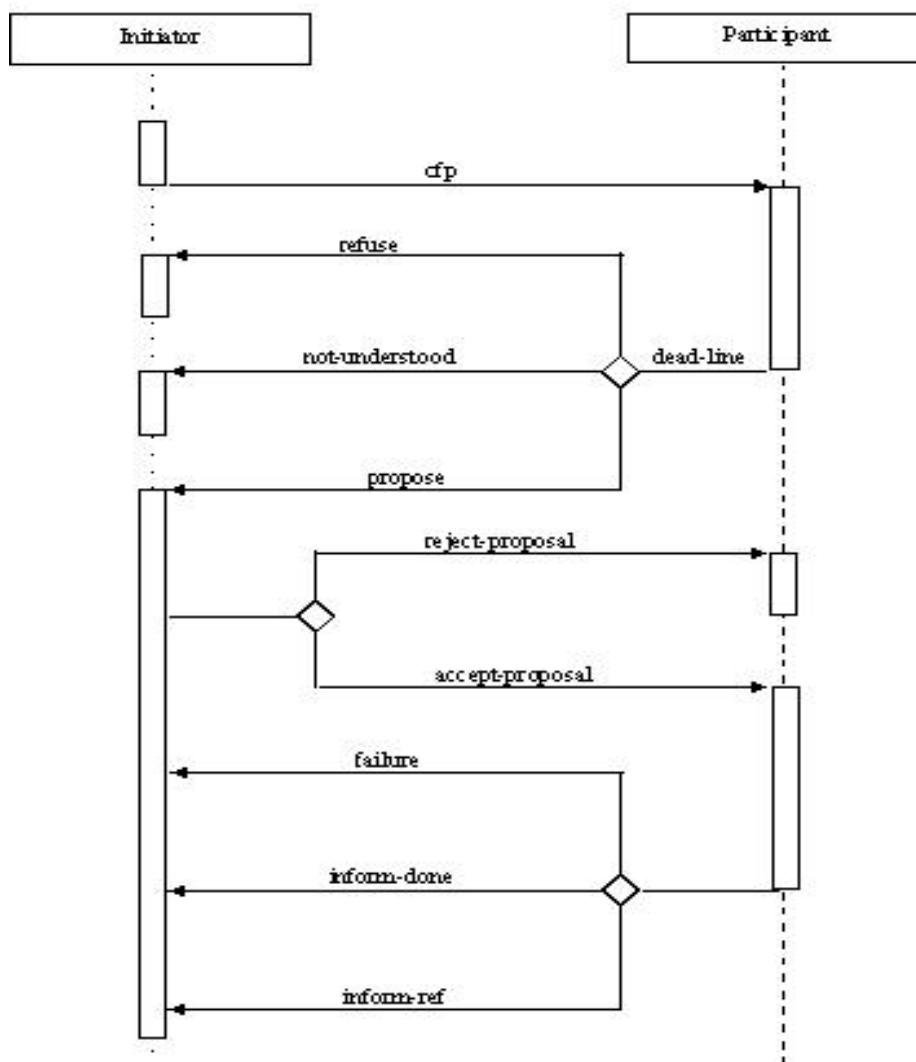


FIG. 1.5 – Diagramme de séquences du protocole Contract Net proposé par le FIPA.

tion pour les interactions entre agents [FIPA, 2000]. Sur la Figure 1.5, un diagramme de séquences permet l'analyse des échanges d'informations entre les différents acteurs lors d'une négociation. Le gestionnaire *initiator* sollicite les propositions des autres agents en envoyant une demande de travail *call for proposal*, qui spécifie la tâche et les conditions d'exécution de celle-ci. Les agents qui reçoivent cette demande génèrent des propositions pour accomplir cette tâche. Ils peuvent aussi refuser. Une fois la date limite atteinte, le gestionnaire évalue les propositions reçues et sélectionne les agents (plusieurs, un seul voire aucun) qui lui conviennent. Les agents sont informés de leur situation par la réception d'un message d'accord ou de refus de proposition ; ceux choisis sont maintenant engagés dans la réalisation de la tâche. Ils devront informer le gestionnaire lors de l'achèvement de celle-ci ou en cas d'échec. D'autres évolutions du Contract Net sont proposés dans [Aknine *et al.*, 2004] en ajoutant des étapes aux deux phases d'offres et d'affectations

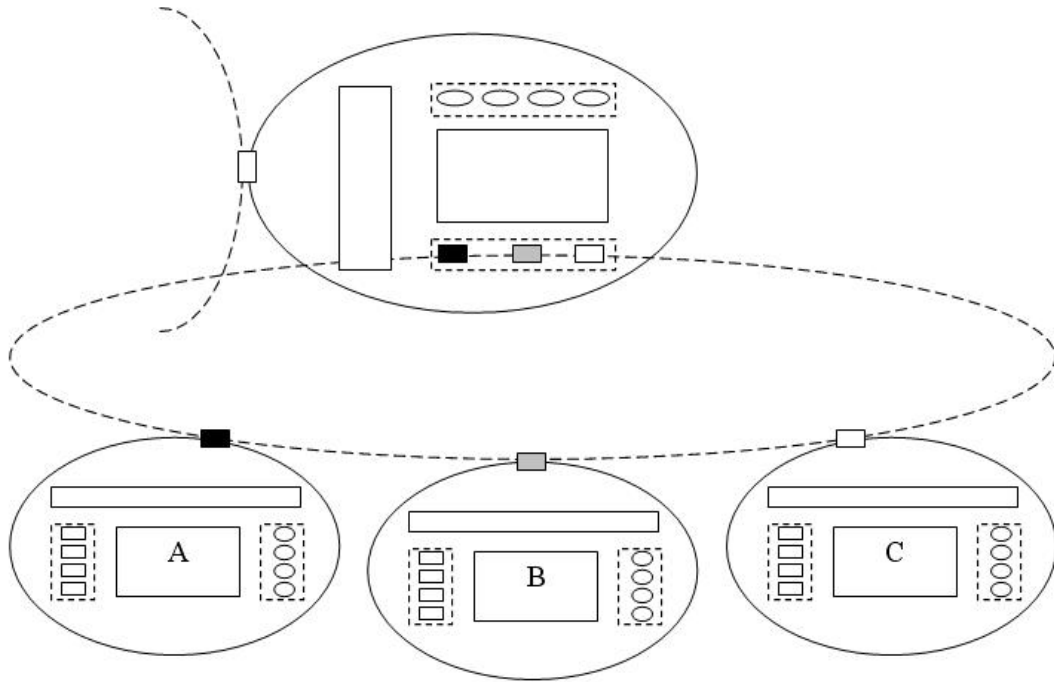


FIG. 1.6 – Coopération entre un client SCEP et trois serveurs SCEP.

des tâches. Les phases de pré-offre et de pré-affectation ont été étudiées pour améliorer les communications mettant en jeu de nombreux agents en même temps tout en garantissant une meilleure efficacité en temps de calcul et une bonne tolérance aux fautes.

Sur la Figure 1.6, le client SCEP établit une coopération entre les OF et les agents producteurs, *i.e* les sites distribués. CORBA est le support de transmission des informations alors que le mécanisme de coopération se rapproche du protocole Contract Net. Le modèle SCEP est un modèle générique permettant de résoudre d'autres problèmes que ceux d'ordonnancement. Il peut être utilisé dans une architecture client/serveur pour résoudre des problèmes de grande taille nécessitant la puissance de calcul de plusieurs processeurs. Trois serveurs et un client SCEP sont ici connectés. Cette configuration permet de faire coopérer trois sites distribués.

Cependant, les machines composant les ateliers de diverses entreprises peuvent participer à plusieurs réseaux. Lors de phases d'ordonnancement distribué, les machines peuvent être amenées à produire au même instant pour plusieurs chaînes de production. Les plans générés indépendamment les uns des autres peuvent se chevaucher et donc ne pas être réalisables. La simulation doit nous permettre de tester la faisabilité de ces plans.

L'objectif de nos travaux n'étant pas la réalisation d'ordonnements mais l'évaluation de la faisabilité de ceux-ci, le modèle SCEP pourra être reconduit dans le cadre de l'architecture que nous souhaitons réaliser. Nous avons vu dans la deuxième section que les modèles de conduite d'activités de production ne prennent pas nécessairement en compte la distribution des ateliers de manière décentralisée. Des modèles de conduite distribuée

basés sur la simulation pour la conduite d'entreprises étendues sont présentés dans la section suivante.

1.7 Entreprises étendues et modèles de simulation de flux

Les modèles de conduite d'activités de production ont été améliorés afin de répondre aux contraintes multi-sites. Des modèles de simulation de flux pour les entreprises étendues sont présentés dans cette section.

Dans [Davis & O'Sullivan, 1998], quatre technologies de communication pour les entreprises étendues sont comparées. L'émergence de protocoles de communication proche de ceux utilisés dans l'Intranet ou l'Internet sont relevés et l'utilisation de base de données associées au développement en Java ou ActiveX est préconisée pour coordonner des partenaires. Un cadre pour la modélisation des systèmes des entreprises étendues est présenté dans [Davis & O'Sullivan, 1999]. Cependant, ces propositions ne prennent pas en compte la conduite d'activités de production.

Différents modèles basés sur la simulation ont été proposés pour assurer la conduite d'entreprises étendues. Le projet présenté dans [Worn *et al.*, 2004] et intitulé DIAMOND (Distributed Multi-Agent Architecture for Monitoring and Diagnosis) repose sur une architecture distribuée pour la simulation de deux exemples industriels. L'architecture DIAMOND propose un concept pour la construction d'un système de surveillance et de diagnostic afin d'évaluer les chaînes logistiques ou le fonctionnement des cellules de production.

L'approche PABADIS présentée précédemment repose sur la distribution partielle de la couche MES en coopération avec une partie centralisée intégrée à l'ERP. Cette solution nécessite une configuration spécifique au cas étudié et n'est donc pas générique. De plus, son champ d'action concerne véritablement la couche de MES et peut difficilement être adaptée à l'échelle de l'atelier. L'équipe du projet MACSI (Modeling, Analysis and Control of Industrial Systems) a proposé une architecture de simulation pour l'analyse de la chaîne logistique [MACSI, 2004]. La méthodologie de MACSI est basée sur des réseaux de Petri pour la synchronisation des événements, sur des algorithmes génétiques pour optimiser la prise de décision stratégique et sur des modèles multi-agents pour la simulation par événements discrets. Néanmoins, l'architecture de simulation semi-décentralisée ne correspond pas aux critères de distribution retenus dans nos hypothèses.

La simulation est souvent utilisée pour déterminer quels partenaires ou fournisseurs sont les plus adaptés pour un modèle d'entreprise étendue. L'étude des comportements de coopération au sein d'une chaîne logistique a pu être réalisée par un outil de simulation dans [Parrod *et al.*, 2005]. Les performances en termes de risques et de délais sont évaluées lors d'une relation coopérative. Une approche d'optimisation par simulation utilisant

les algorithmes génétiques a été présentée dans [Ding *et al.* , 2003]. L'approche proposée utilise la simulation d'événements discrets pour l'évaluation des performances d'un fournisseur et un algorithme génétique pour déterminer le choix optimum en fonction des indications de la simulation. Un exemple présente les résultats d'une étude sur une chaîne logistique de fabrication de chaussures.

Les travaux présentés dans [Geller *et al.* , 1995] portent sur l'application de la simulation à événements discrets pour modéliser une chaîne logistique ou une entreprise virtuelle. L'utilisation de la simulation durant les phases de conception et d'implantation de la chaîne logistique permet de comprendre les impacts sur les processus avant l'établissement de contrats, la définition de planification ou le développement de cellules de production. Le principal avantage de cette modélisation est de fournir les moyens et la visibilité nécessaires à la prise de décision stratégique. Cela inclut l'optimisation de ressources partagées (transports), la concordance des ordonnancements, la planification d'urgence (...). De plus, cet outil fournit le seul moyen d'obtenir une représentation visuelle de l'entreprise virtuelle complète. La gestion des déplacements de produits peut être effectuée sans avoir besoin de se déplacer d'un site à l'autre.

Une méthode d'optimisation pour la configuration d'un système de production Kanban a été proposée dans [Paris & Pierreval, 2001]. La simulation d'algorithmes génétiques sur plusieurs processeurs a permis d'améliorer les performances de calculs de l'outil proposé. Les problèmes de configuration et de dimensionnement de lignes de production ont pu ainsi être traités par simulation d'algorithmes distribués dans [Cheikhrouhou *et al.* , 2002, Pierreval & Paris, 2003]. La distribution des processeurs lors de la simulation apparaît comme une bonne solution pour la configuration de systèmes de production.

Un exemple basé sur l'utilisation du module DMSA (Distributed Manufacturing Simulation Adapter) lors du projet MISSION [Mertins *et al.* , 2005], facilite les transmissions des composants de la simulation et ce quelque soit les simulateurs utilisés. Ces composants sont des fédérés. Un fédéré est un membre d'une fédération, une fédération étant une simulation regroupant plusieurs simulateurs. Cette notion de fédération permet de définir le concept d'interopérabilité. La capacité d'interopérabilité pour un système de simulation étudié est sa capacité à faire interagir des logiciels qui n'ont pas forcément le même fonctionnement ou qui sont écrits dans des langages différents. Seules certaines informations sont partagées et échangées permettant ainsi la coopération de tous les acteurs. Cette méthode est appliquée à un exemple de chantier naval [McLean & Shao, 2001]. Le projet MISSION a pour but la simulation distribuée de chaînes logistiques pour faire face aux évolutions de la distribution des tâches. Le développement d'un environnement permettant l'intégration de logiciels de simulation avec d'autres logiciels qui ne sont pas nécessairement de simulation a été mis en oeuvre. Si les entreprises font partie de plusieurs chaînes logistiques, le travail de modélisation est facilité grâce à la réutilisation des modèles. Actuellement, la distribution de simulation entre différents logiciels de si-

mulation (Arena, Witness,...) ainsi qu'avec d'autres logiciels de surveillance ou de calcul dans le même processus de simulation est une nouvelle technologie. Le protocole HLA (High Level Architecture) a été choisi comme protocole de communication dans l'architecture de MISSION pour ses qualités de synchronisation et de communication entre des simulateurs indépendants. Il existe des solutions propres à différents logiciels mais aucun mécanisme automatisé d'interopérabilité n'existe. De nombreux travaux ont été menés dans le cadre de MISSION sur les différents aspects qui ont permis la réalisation du DMSA dont [Schumann *et al.* , 1998, Rabe & Jäkel, 2000, Jäkel & Pinedo, 2000, Harding & Popplewell, 2000, McLean *et al.* , 2000, Rabe *et al.* , 2001, Straßburger *et al.* , 2002].

Les modèles et structures présentées ici satisfont aux exigences de la distribution lors de simulations. Néanmoins, certains ne garantissent pas la synchronisation de tous les simulateurs ou ne sont pas complètement décentralisés. De plus, ces simulations reposent sur des modèles de haut niveau et ne correspondent pas à nos attentes en terme d'étude du comportement de l'atelier de fabrication. Le projet MISSION semble répondre aux exigences de collaboration en préservant l'autonomie de chacun des acteurs. Les mécanismes mis en oeuvre dans ce projet semblent pouvoir être adaptés pour l'évaluation de la faisabilité de plans de production. La simulation d'entreprise étendue nécessite tout d'abord la maîtrise de la simulation d'un atelier de fabrication. Dans la section suivante, nous nous intéressons à la simulation de ces ateliers de production.

1.8 Ateliers virtuels

Pour évaluer la faisabilité de plans multi-sites avec un outil distribué, nous avons étudié les différentes techniques envisageable. Cela nous a mené à réfléchir sur une nouvelle architecture de simulation capable de mettre en oeuvre les communications entre un ordonnanceur distribué et des ateliers multi-sites. La solution consistant à simuler le fonctionnement des ateliers a été retenue. La simulation peut être définie comme le processus de conception d'un modèle du système réel et d'expérimentations sur ce modèle, dans le but de comprendre le comportement du système et d'évaluer différentes stratégies pour ce système. Un simulateur doit reproduire de manière fidèle et précise la séquence des événements se déroulant dans l'atelier. Nous proposons dans cette section le concept d'atelier virtuel et présentons, dans les sections suivantes, les méthodes garantissant les communications et la synchronisation des événements lors d'une simulation.

Il existe deux types de modèles pour résoudre les problèmes de production et distribution : analytique et de simulation. Dans la littérature, la simulation distribuée d'ateliers apparaissant comme une technique prometteuse, une architecture capable de mettre en oeuvre cette simulation a été présentée dans [Lee *et al.* , 2002]. Si les critères tels que le coût, l'offre, les délais ou les temps de transport sont aisés à prendre en compte dans le cadre d'un atelier, il en va différemment pour plusieurs ateliers en réseau. La simulation

est le principal outil pour améliorer la gestion et l'organisation de ces nouvelles entités [Fujii *et al.* , 2000]. Un atelier est un système dynamique où des événements inattendus peuvent se produire ce qui nécessite un contrôle réactif. Chaque processus industriel est sujet à des perturbations dont les origines peuvent être diverses ; problème de transport, absence d'approvisionnement, panne de machine, grève ou tout autre événement qui n'entre pas en compte lors de l'ordonnancement des tâches pour un atelier. La définition d'indicateurs et leur mise en oeuvre, afin de suivre les processus de production et détecter si des perturbations viennent modifier les processus établis, représentent une première étape dans l'élaboration d'une stratégie de surveillance. Les problèmes fondamentaux des systèmes de production peuvent se résumer à un manque de flexibilité de la structure de l'organisation et à l'absence de normes pour s'adapter facilement aux changements d'environnement. Les structures présentées sont des conglomerats d'unités distribuées et autonomes qui opèrent comme des ensembles d'entités coopérantes [Tharumarajah *et al.* , 1996]. La fabrication bionique, ou "Bionic manufacturing", est une analogie entre le fonctionnement biologique d'une cellule vivante et celui d'une cellule de production. Les usines fractales, ou "fractal factory", sont des usines composées d'ensembles identiques ; chaque unité organise sa structure interne différemment afin de se concentrer sur certains critères comme les produits, les processus ou les matériaux. Les usines fractales ont des systèmes d'information et de navigation flexibles et efficaces. La coopération entre les usines fractales qui s'auto-régulent et s'auto-organisent se caractérise par un grand dynamisme individuel et la possibilité de réagir au mieux aux conditions changeantes. Enfin, la fabrication holonique, ou "holonic manufacturing", se définit par un ensemble d'holons dans une hiérarchie où ceux-ci sont définis par leurs fonctions ou leurs tâches. A l'aide de stratégies flexibles, un holon s'auto-régule et réagit aux changements d'environnement. Ces trois structures permettent d'obtenir des entités de production autonomes, coopératives et intelligentes. L'étude qui nous intéresse nécessite la représentation fidèle d'ateliers de fabrication simples capables de réaliser des tâches de fabrication simples. La définition d'un atelier virtuel compatible avec les logiciels de simulation du commerce ne permet pas de retenir des organisations aussi complexes dont la modélisation informatique s'avérerait délicate et coûteuse.

Une simulation distribuée d'une chaîne de production de moteurs de véhicules a été développée dans [Taylor & Ladbrook, 2003] mais les auteurs ont rencontré des difficultés pour la gestion du temps lors de l'utilisation du logiciel de simulation Witness. McLean et Riddick déclarent qu'il serait difficile de pouvoir intégrer des simulations de fabrication depuis la chaîne logistique jusqu'au plus bas niveau de processus de l'atelier" [McLean & Riddick, 2000b]. L'architecture proposée par [McLean & Riddick, 2000a] identifie les modules et les interfaces du logiciel qui faciliteront l'intégration de systèmes de simulation distribuée et permettront l'intégration de ces systèmes avec d'autres applications de logiciels de fabrication.

La simulation d'ateliers virtuels posent des problèmes liés à l'exécution d'un plan sur un simulateur. Dans le cadre de réseaux étendus, les problèmes de coordination des messages entre les acteurs et de synchronisation entre les partenaires sont multipliés. Dans les sections suivantes, nous présentons les techniques mises en oeuvre afin d'assurer une bonne gestion des événements et du temps lors de simulations de grande taille.

1.9 Gestion des événements

L'exécution de simulations distribuées nécessite la mise en place d'architectures réseaux capables de supporter les communications de nombreux agents. L'Etat de l'Art réalisé nous a permis de comparer les divers protocoles de communication et de contrôle pour les problèmes distribués. D'après [Rolstadas, 1998], la distribution de décision réalisée par des systèmes multi-agents conduit à une meilleure gestion des perturbations et de la réactivité.

Plusieurs architectures permettent l'échange d'informations et la gestion d'événements dans le cadre de simulations multi-agents. CORBA (Common Object Request Broker Architecture) est un standard d'objets distribués. La norme CORBA permet d'exprimer, grâce au langage IDL (Interface Description Language) très proche du C++, les interfaces d'objets. Elle définit une architecture d'applications distribuées reposant sur un ORB (Object Request Broker) chargé de gérer les objets et de leur transmettre les appels. Une interface est une collection d'attributs et d'opérations qui correspondent à l'objet. Une interface peut être vue comme un contrat mis en place pour définir les opérations correspondantes à des méthodes ainsi que pour fournir l'accès aux méthodes appropriées correspondantes aux attributs. CORBA est une architecture de communication qui permet à ses clients et serveurs d'être construit dans n'importe quel langage supporté et de travailler ensemble sans même connaître le langage de l'autre. La définition d'interfaces plutôt que de classes est l'élément essentiel de ce langage. CORBA permet à une application de demander à un objet distribué d'effectuer une opération et d'en obtenir le résultat. L'application communique avec l'objet qui effectue l'opération. C'est une fonctionnalité clients/serveur basique où un client envoie une requête à un serveur et le serveur répond au client. Les données peuvent passer du client au serveur et sont associées à une opération particulière sur un objet particulier. Les données sont ensuite retournées au client sous la forme d'une réponse. De plus, CORBA supporte plusieurs langages et aussi un mélange de ces langages dans une même application distribuée. Avec un degré élevé d'interopérabilité, CORBA permet d'assurer que des objets distribués pourront communiquer. Dans [Zeigler *et al.*, 1999], les besoins pour la modélisation d'une chaîne logistique et pour la simulation d'environnement sont pris en considération pour l'exécution parallèle et distribuée sur une architecture DEVS (Discrete Event System Specification)/CORBA. Cette architecture permet l'amélioration des vitesses d'exécution des simulations mais aussi de

meilleures modélisations de chaînes logistiques. Néanmoins, les problèmes de gestion du temps ne sont pas pris en compte et nécessitent l'adaptation de techniques pour la coordination des messages. Aucune méthode de CORBA ne permet d'assurer la synchronisation des événements lors de l'exécution d'une simulation. En l'état, CORBA ne peut satisfaire les contraintes de la simulation distribuée.

L'architecture RMI (Remote Method Invocation), développée sur JDK (Java Development Kit) pour Sunsoft, n'utilise que l'interface de langage Java pour ses spécifications. En revanche, dans la programmation, le langage d'interface objet doit aussi être Java contrairement aux autres outils présentés. RMI fonctionne comme CORBA pour l'utilisation d'objets distants. Un aspect important de RMI est la possibilité de sécuriser les méthodes invoquées afin d'éviter des intrusions dans le système. RMI, grâce à un gestionnaire de sécurité utilisant le cryptage des informations et les signatures digitales, peut empêcher tout code malveillant d'accéder aux ressources locales. RMI peut être utilisé dans toute application générique [Buss & Jackson, 1998] ou pour l'ordonnancement dynamique de tâches pour les entreprises étendues [Azevedo *et al.*, 2004], mais ne garantit rien en terme de synchronisation des exécutions de simulations. RMI ne peut être retenu.

D'autre part, des protocoles sont utilisables afin de faire communiquer différents simulateurs ayant leurs propres architectures. DIS (Distributed Interactive Protocol) est un protocole qui supporte les simulations composées de plusieurs simulateurs. Ce protocole a été développé puis abandonné. En effet, l'interopérabilité était conduite par les données ; si les types de communications étaient modifiés, les simulations et applications utilisant ce protocole devaient aussi être modifiées. Les entités statiques (bâtiments dans le cas d'une simulation civile) envoyaient aussi des mises à jour ce qui consommait beaucoup de bande passante. Ce protocole a donc été abandonné.

HLA [Kuhl *et al.*, 1999] est un protocole qui permet de synchroniser des simulateurs au sein d'une grande simulation. Il a été proposé par le DMSO (Defense Modelling and Simulation Office) du DoD (Department of Defense) [DMSO, 1998]. Les objectifs de HLA sont de faciliter l'interopérabilité et la réutilisation des simulations, de réduire les coûts de la modélisation et de la simulation, et de répondre aux besoins de la simulation distribuée. Dans ce cadre, la distribution est vue comme une contrainte, puisqu'il s'agit de conduire des simulations de grande ampleur faisant intervenir des composants géographiquement distribués. HLA permet de synchroniser une fédération, *i.e.* un ensemble de fédérés partageant un modèle objet commun [Klein, 2000]. En pratique, c'est la représentation d'un ensemble de simulateurs inter-opérant dans un but commun. Le Run-Time Infrastructure (RTI) constitue une implantation informatique des spécifications d'interface HLA. Il s'agit d'un processus informatique assurant les communications entre les fédérés d'une même fédération et offrant les services de HLA au travers d'une API (spécification de l'interface de programmation). Plusieurs RTI ont été développés, notamment celui du DMSO, et celui de l'ONERA (CERTI) [Siron, 1998].

Certaines approches proposent différentes combinaisons de systèmes multi-agents et de protocoles de communication. Bongaerts *et al.* ont développé une stratégie de coopération entre un ordonnanceur et un atelier toujours prêt à recevoir un nouvel ordonnancement [Bongaerts *et al.* , 1997]. Cette stratégie prend en compte les délais d'ordonnancement et d'exécution du plan [Asbjornslett & Rausand, 1999]. Les systèmes multi-agents combinés avec des protocoles de distribution sont nécessaires pour permettre un contrôle des activités de production multi-site [Parunak, 1996]. Le projet SSAHLA (Simulation based on Software Agents and the High Level Architecture) propose de simuler des agents logiciels communicants grâce à une architecture construite autour du protocole HLA [Maamar, 2003]. Les agents logiciels sont choisis pour leur capacité d'autonomie, de sociabilité et de mobilité. HLA est le protocole de communication entre agents qui supporte l'architecture. Afin d'obtenir une bonne interopérabilité et de supporter des simulations en temps-réel, les architectures construites sur des modèles multi-agents et intégrant HLA semblent indiquées. Les travaux présentés dans [Brun *et al.* , 2002] sont la synthèse du projet WILD (Web Integrated Logistics Designer) pour le développement d'un modèle de simulation distribuée représentant une chaîne logistique du secteur aéronautique. Le modèle de simulation se compose de plusieurs modules indépendants qui sont autant d'entreprises partenaires et est exécuté à l'aide de HLA. De plus, pour supporter la réutilisation de modèles existant pour la simulation de chaînes logistiques, un standard commun est nécessaire pour assurer l'interopérabilité quelques soient les logiciels de simulation. Une simulation de chaîne logistique de semi-conducteurs a été réalisée grâce au protocole HLA dans [Turner *et al.* , 2000]. Les résultats montrent notamment que les performances ont été améliorées en terme de temps de simulation.

Les architectures et les protocoles présentés correspondent tous aux exigences de la distribution fixées par notre étude. Cependant, certains semblent être capable de mettre en oeuvre plus efficacement la gestion des événements. Dans la mesure où la synchronisation des événements est indispensable au bon fonctionnement de l'outil que nous souhaitons proposer, il est nécessaire d'aborder la gestion du temps.

1.10 Gestion du temps

Outre la gestion des événements, le protocole HLA permet aussi une gestion efficace du temps. Le DMSO a implanté l'algorithme TEXS (Time EXchange System) proposé par Chandy et Misra [Chandy & Misra, 1978] pour la gestion du temps lors de la conception de HLA. Cet algorithme introduit les notions de travail "nul" et de messages datés dans le temps. Le travail "nul" est en réalité l'absence de tâche. Il se définit par une charge égale à zéro pour la machine et une durée variable qui peut être reconduite dans le temps jusqu'à ce que l'exécution d'une tâche non "nulle" soit planifiée. Il différencie le système étudié du processus de modélisation utilisé. Ainsi, le système physique, un atelier par

exemple, peut être arrêté lorsqu'aucun processus ne s'exécute. Le processus ne doit en revanche pas s'arrêter et l'exécution de tâches "nulles" permet une boucle du processus qui ne se bloque pas. De plus, si un message de travail "nul" est envoyé pour une date t , le système est assuré qu'aucune tâche ne lui sera demandée avant cette date t . Ces messages datés assurent la synchronisation en évitant l'apparition de messages avant une date t définie au préalable. Les fédérations HLA sont des systèmes distribués et sont sujettes à des délais de calculs informatiques ou de transmission d'informations sur le réseau. La gestion du temps avec HLA doit assurer que les événements sont délivrés aux fédérés dans un ordre correct. Avec des fédérés simulés sur des processeurs ayant différentes vitesses, assurer l'ordre correct des événements se révèle délicat. Ainsi, de nombreux paramètres ont été spécifiés dans [IEEE, 2000] pour permettre l'utilisation de HLA par des logiciels de simulation distribuée.

L'architecture HLA permet la création d'une simulation (fédération en terminologie HLA) composée elle-même de différents éléments de simulation appelés simulateurs (fédérés en terminologie HLA).

Les objectifs de HLA sont de :

- faciliter l'interopérabilité et la réutilisation des simulations,
- réduire les coûts de la modélisation et de la simulation,
- répondre aux besoins de la simulation distribuée.

L'architecture HLA est composée :

- de règles pour le fédéré et la fédération,
- d'une spécification d'interface de programmation (API),
- d'un patron pour les modèles d'objets appelé Object Model Template (OMT).

La compréhension des mécanismes et services offerts par l'architecture de simulation HLA, nécessite la connaissance de certains concepts. Sur la figure 1.7, une fédération est représentée par un ensemble de fédérés partageant un modèle objet commun. En pratique, c'est la représentation d'un ensemble de simulateurs inter-opérant dans un but commun.

Un fédéré est un membre d'une fédération HLA. En fait, toute application qui participe à une fédération est appelée fédéré. Dans la réalité, cela englobe les gestionnaires de fédérés, les banques de données ou les observateurs passifs.

Parmi les particularités de HLA, nous pouvons citer le FOM (Federation Object Model). La structure de tous les FOM est prescrite par L'OMT. Chaque fédération possède un FOM décrivant le vocabulaire spécifique de cette fédération. Le FOM ne précise rien d'interne à un fédéré, seulement les interactions pouvant survenir entre eux. Finalement, le FOM est le vocabulaire de données échangées par les fédérés au travers du RTI pour l'exécution d'une fédération. Il définit les classes d'interactions ainsi que les classes d'objets.

De plus, dix règles régissent le fonctionnement de toute simulation s'appuyant sur le protocole HLA.

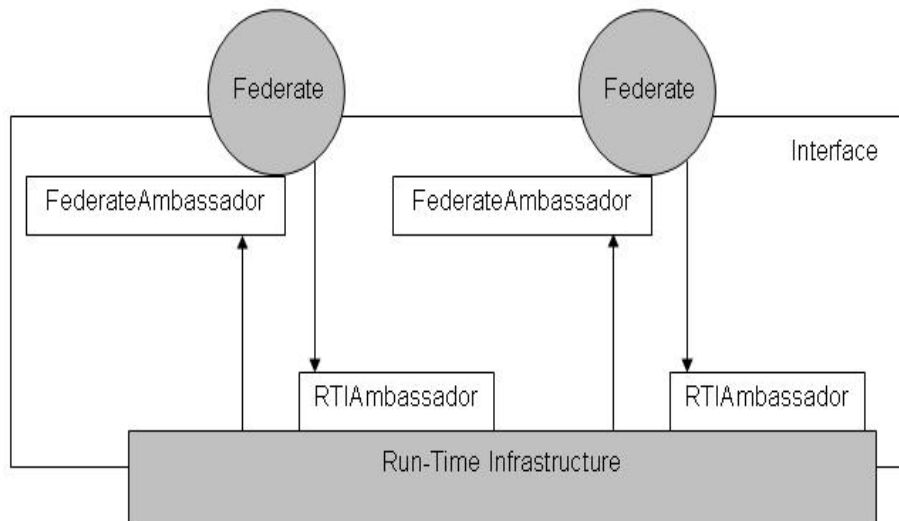


FIG. 1.7 – Structure générale d’une fédération HLA d’après [Kuhl *et al.* , 1999].

- Les fédérations doivent avoir un FOM HLA, renseigné en accord avec l’OMT HLA.
 - Dans une fédération, toutes les représentations d’objets associés à la simulation doivent être dans les fédérés, pas dans le RTI.
 - Pendant l’exécution d’une fédération, tous les échanges de données du FOM parmi les fédérés doivent se dérouler via le RTI.
 - Pendant l’exécution d’une fédération, les fédérés doivent interagir avec le RTI en accord avec la spécification d’interface HLA.
 - Pendant l’exécution d’une fédération, un attribut doit être possédé par au plus un fédéré en même temps.
 - Les fédérés doivent avoir un modèle objet pour la simulation HLA, renseigné en accord avec l’OMT HLA.
 - Les fédérés doivent être capables de mettre à jour et/ou de réfléchir un quelconque attribut et d’envoyer et/ou recevoir des interactions, comme spécifié dans leur SOM (Simulation Object Model).
 - Les fédérés doivent être capables de transférer et/ou d’accepter la propriété d’attributs dynamiques durant l’exécution de la fédération, comme spécifié dans leur SOM.
 - Les fédérés doivent être capables de changer les conditions (par exemple, niveaux) sous lesquelles ils fournissent la mise à jour d’attributs, comme spécifié dans leur SOM.
 - Les fédérés doivent être capables de gérer le temps local de sorte à ce qu’ils puissent être autorisés à coordonner l’échange de données avec les autres membres de la fédération.
- Enfin, le FED (Federation Execution Data) correspond à certaines informations qui font partie du standard HLA et qui ne changent pas d’un RTI à l’autre. Le FED doit être utilisable par tous les RTI. Le FED contient l’extrait du FOM dont le RTI a besoin pour fonctionner.

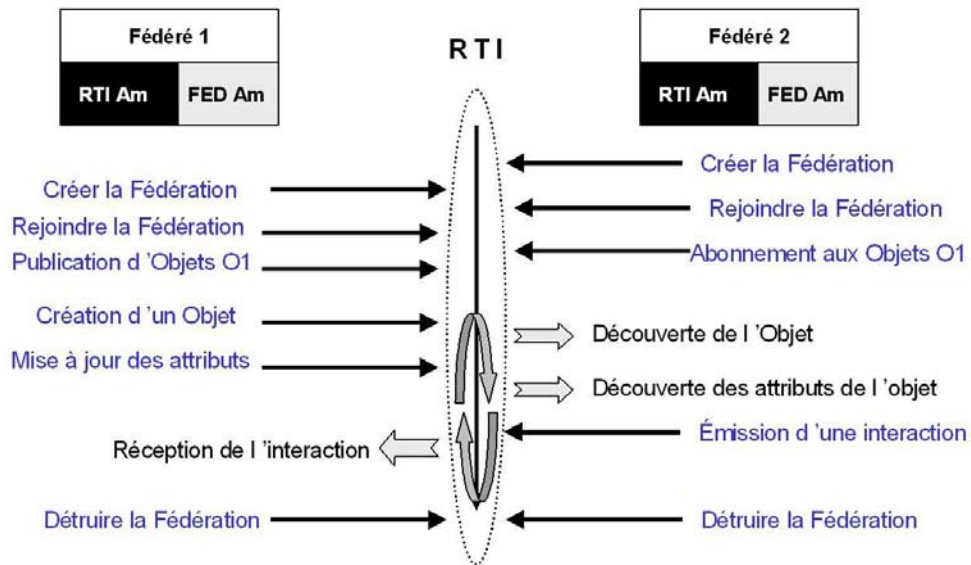


FIG. 1.8 – Exécution d’une fédération HLA d’après [DMSO, 1998].

L’architecture d’un fédéré HLA, représentée sur la figure 1.8, comprend trois composantes : la boucle de simulation qui met à jour le modèle de comportement des entités simulées par le fédéré, la classe RTIAmbassador et la classe FEDAmbassador. La boucle de simulation doit initialiser l’exécution de la fédération. La classe RTIAmbassador définit les services offerts par le RTI au fédéré, sous forme de méthodes (C++ ou Java). Chaque fédéré doit créer une instance de cette classe pour pouvoir invoquer les services du RTI. La classe FEDAmbassador définit les services de HLA auxquels fait appel le RTI. Ces services sont également des méthodes dans un langage objet (C++ ou Java) qui devront être renseignées par le concepteur du fédéré.

Le dialogue entre fédérés repose sur des mécanismes de publication/abonnement aux attributs et aux interactions offerts par le RTI. Ces mécanismes de publication/abonnement se généralisent dans le cas des interactions, le second support de communication de HLA. Une interaction est décrite par un ensemble de paramètres. Toute interaction est émise par un fédéré qui déclare son intention de la publier, et est reçue par tout fédéré qui s’y abonne.

Tout d’abord, il est nécessaire de distinguer les deux notions de temps sous HLA. Le temps logique est le temps pour un fédéré dans la simulation. On parle de *FLT* qui est un acronyme de Federate Logical Time. Le temps logique est quasi équivalent du temps

de simulation dans la littérature classique des simulations à événements discrets, et est utilisé pour s'assurer que les fédérés observent les événements dans le même ordre (ce qui n'est pas nécessairement au même moment) que celui correspondant aux activités qui vont être observées dans le monde réel. L'horloge utilisateur *wallclock* est le temps qu'un observateur extérieur pourrait constater. Il n'y a pas de relation directe entre *FLT* et *wallclock*. Si la simulation se déroule en temps réel, le temps logique et l'horloge avancent à la même vitesse relative mais peuvent avoir des origines différentes ; l'horloge indique le temps actuel alors que le temps logique peut être dans une semaine ou un mois. Dans tous les cas de simulation, un fédéré va calculer son état avant de se rendre à l'incrément de temps ou à l'événement suivant. Pour assurer l'ordre des messages, les services de gestion du temps de HLA vont coordonner l'avance du temps logique pour la fédération et l'arrivée de données datées.

Ce protocole apparaît donc comme une solution intéressante pour le développement d'un outil de simulation distribuée.

1.11 Modèle MS-R-PAC

Au Laboratoire de Génie de Production, des travaux ont été réalisés sur les architectures réactives. Le modèle MS-R-PAC (Multi-site R-PAC) est une extension, au cas des ateliers distribués, du modèle R-PAC présenté sur la Figure 1.3. Ce modèle, décrit sur la Figure 1.9, est basé sur l'exécution d'ateliers virtuels présentés dans [Archimède *et al.* , 2003a, Archimède *et al.* , 2003b]. La coordination des mécanismes de résolution est réalisée à l'aide d'un protocole proche du Contract Net. Un bus CORBA assure une interface de communication entre les différents agents de la simulation. Les différents ateliers virtuels A, B et C sont construits selon le modèle de référence R-PAC. Les OF sont distribués sur les machines des ateliers virtuels à l'aide d'un client SCEP pour l'ordonnancement qui coordonne la coopération. Au niveau de chaque atelier, les agents producteurs, *i.e.* les machines, déclarent leurs intentions pour la réalisation de tâches selon les mécanismes décrits dans la section 1.5. Une fois que chaque atelier a déclaré ses intentions, les ateliers sont mis en compétition au niveau du réseau d'ateliers. A ce niveau, les agents producteurs, *i.e.* les représentants des ateliers virtuels A, B et C, sont en compétition pour la réalisation des OF. Chacun des serveurs SCEP implantés sur les trois sites va négocier les OF par l'intermédiaire de ces agents producteurs lors de la phase d'ordonnancement au sein du client SCEP. Une fois cette phase achevée, les OF sont distribuées via le bus CORBA aux ateliers. Les ateliers sont alors en mesure de lancer les tâches sur les différentes machines.

Deux composants principaux se distinguent dans cette architecture : la commande et la surveillance. Pour la commande, un ordonnanceur distribué construit sur le modèle SCEP est utilisé ; pour la surveillance, deux fonctions sont combinées pour suivre et détecter tous les événements prévus et imprévus.

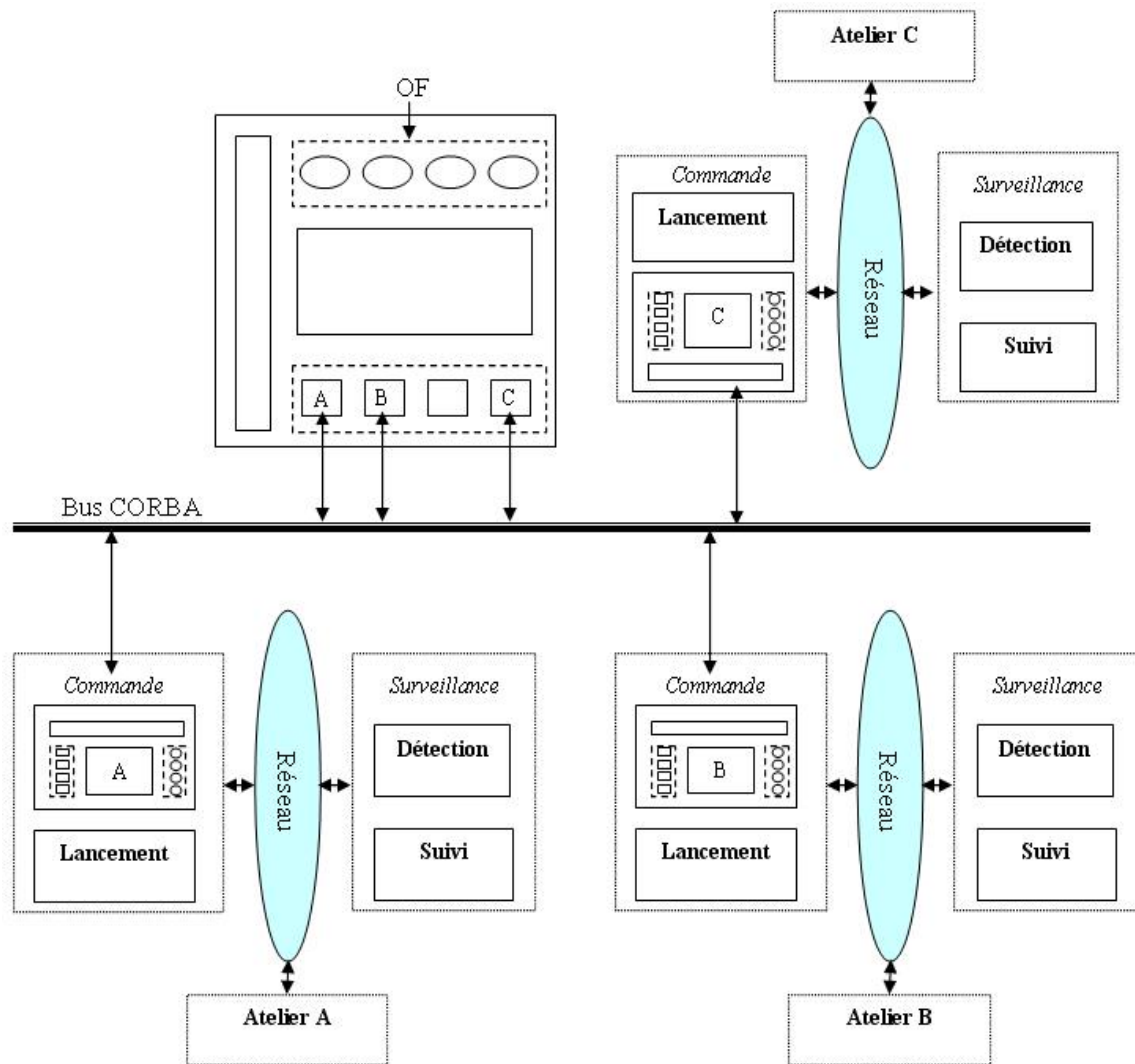


FIG. 1.9 – Modèle MS-R-PAC pour trois ateliers virtuels.

Dans les différentes études basées sur l'architecture MS-R-PAC et présentées dans [Enjalbert *et al.*, 2004a], un problème important de synchronisation des événements multi-sites a été relevé. Nous avons étudié la synchronisation des simulateurs distribués afin de garantir les performances des modules de commande et de surveillance de MS-R-PAC. La solution adoptée, présentée en Figure 1.10, a été de créer un serveur accessible via le bus pour permettre la gestion du temps et la synchronisation des événements. Une horloge implantée sur ce serveur permet de réguler les avancements de chaque site et d'assurer la coordination des ateliers virtuels. Cependant, si le système à simuler est de grande taille, nous n'avons pas réussi à garantir l'arrivée de messages datés dans le bon ordre si les vitesses des différents simulateurs sont trop différentes. Finalement, un nouveau protocole de communication est nécessaire pour garantir la bonne exécution des plans simulés.

Dans la section suivante, les techniques d'évaluation de performances pour la conduite

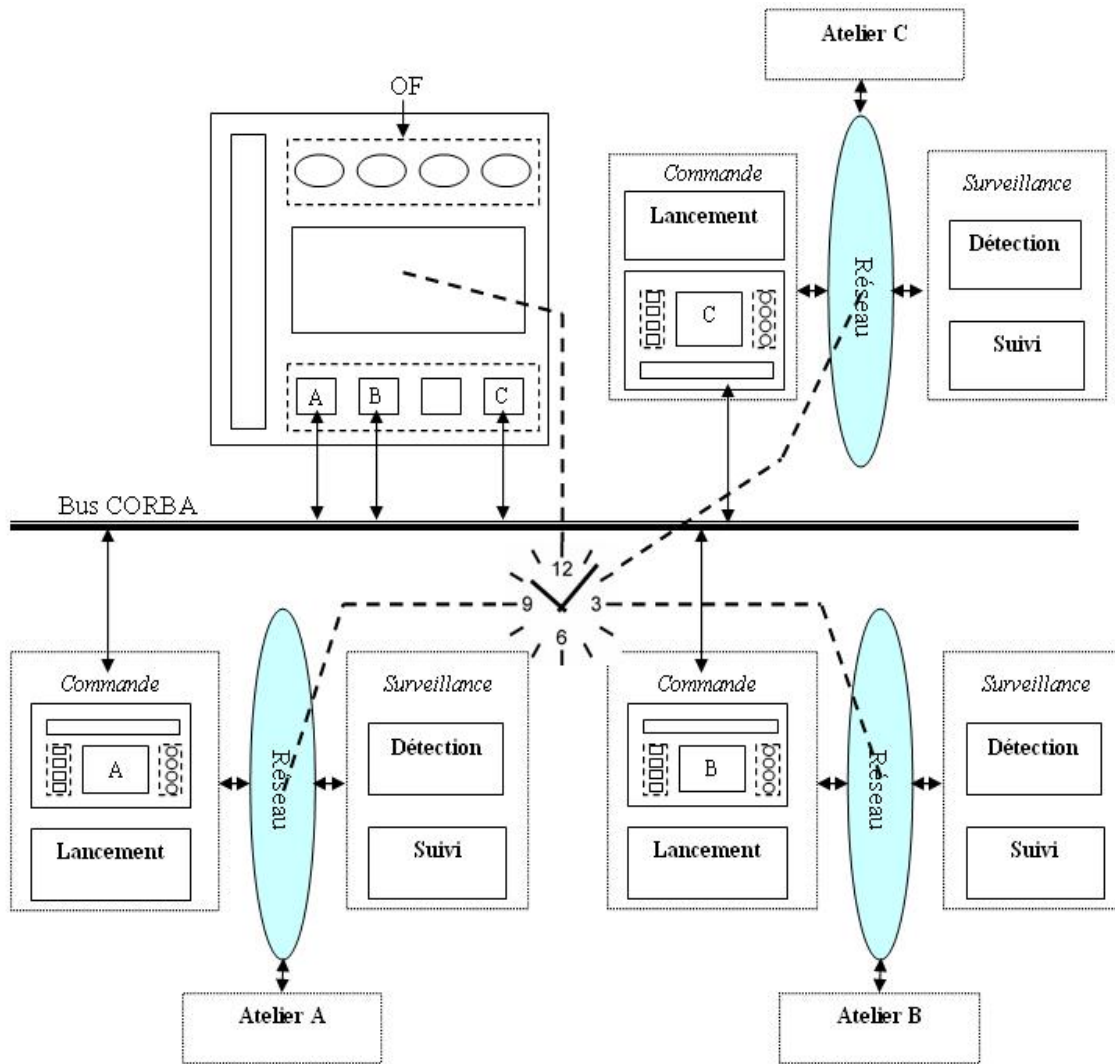


FIG. 1.10 – Modèle MS-R-PAC synchronisé par horloge.

d'activités de production sont présentées.

1.12 Techniques d'évaluation de performances pour la conduite

Le problème d'évaluation de performances d'un système de production est largement abordé dans la communauté scientifique. Les notions de coût, de délai, de qualité viennent caractériser la performance pour un réseau d'entreprises. La flexibilité, *i.e.* la capacité de réordonnancement ou de changement d'outil de production, la robustesse, *i.e.* la stabilité du système lors de perturbations, et la satisfaction du client doivent aussi être évaluées. Des concepts et des méthodes ont été présentés dans [Tahon, 2003]. Dans [Schmitz & Platts, 2004], un Etat de l'Art est proposé sur les différences entre les mesures

de performances intra et inter-entreprises à l'aide des concepts d'évaluation de performance de la chaîne logistique. Une étude de quatre manufacturiers automobiles européens est présentée pour l'évaluation de leurs fournisseurs et un cadre conceptuel identifiant la mesure de performance dans ce contexte est donné.

Pour surveiller les processus de production, des méthodes basées sur des diagrammes statistiques de contrôle de qualité sont développés dans [Chan *et al.* , 2000]. Il faut distinguer les erreurs aléatoires et les variations dues aux changements de paramètres. Si nous considérons une erreur comme une variation de paramètre et que nous essayons de mettre en oeuvre des actions correctrices, la réaction est sur-proportionnée. En revanche, pour un changement de paramètre qui serait interprété comme une variation naturelle et qu'aucune action correctrice n'est engagée, le processus risque de se détériorer très rapidement avant que nous ayons pu le stopper. En prenant en compte l'origine des écarts, on peut effectuer une surveillance des processus. Les mesures issues d'indicateurs alimentent des outils mathématiques d'analyse [Lamberson & Wasserman, 2001] ou des diagrammes de contrôle [Chan *et al.* , 2000]. L'analyse, via des réseaux de Petri colorés, des flux mis en jeu lors d'une simulation d'atelier est utilisée pour évaluer les performances [Nandula & Dutta, 2000].

De nombreux travaux s'appuient sur des outils analytiques afin d'effectuer l'évaluation de performances de chaînes logistiques. L'optimisation des stocks et la gestion des livraisons sont ainsi traitées dans [Zanoni & Grubbstrom, 2004]. Les problèmes de stock et de gestion de taille de lots sont aussi repris dans [Dong & Chen, 2005]. L'exemple présenté dans [Ross & Droge, 2002] propose un cadre de banc de test illustré dans le cas d'un système de chaîne logistique à grande échelle. Des mesures quantitatives de performances pour les chaînes logistiques sont aussi étudiées dans [Tian *et al.* , 2003]. Des paramètres comme le temps, la qualité, le coût et la flexibilité sont analysés au niveau de l'atelier, de l'usine ou de la chaîne logistique complète. Certains travaux s'appuient sur les statistiques ou sur des méthodes graphiques appliquées à une chaîne logistique du secteur textile afin d'étudier les entrées/sorties de produits pour évaluer la performance [Moore & Ray, 1999]. Wang *et al.* présentent dans [Wang *et al.* , 2005] une méthodologie d'aide à la décision pour la conception de chaîne logistique qu'un décideur peut utiliser pour la sélection des fournisseurs. Cette méthode utilise des techniques analytiques afin d'assurer l'évaluation de l'efficacité globale de la chaîne logistique. Il est ainsi possible de comparer plusieurs stratégies pour une chaîne logistique.

Les techniques à base de réseaux de Petri sont utilisées pour modéliser la chaîne logistique [Chen *et al.* , 2002]. Un outil de mesure et d'analyse pour l'évaluation de la performance des chaînes logistiques ont été proposés dans [Chen *et al.* , 2005].

Chan a proposé dans [Chan, 2002] une base pour la comparaison de performances de chaînes logistiques par simulation. La simulation d'équations modélisant le comportement d'une chaîne logistique est étudiée dans [Tu *et al.* , 2003]. L'évaluation dynamique

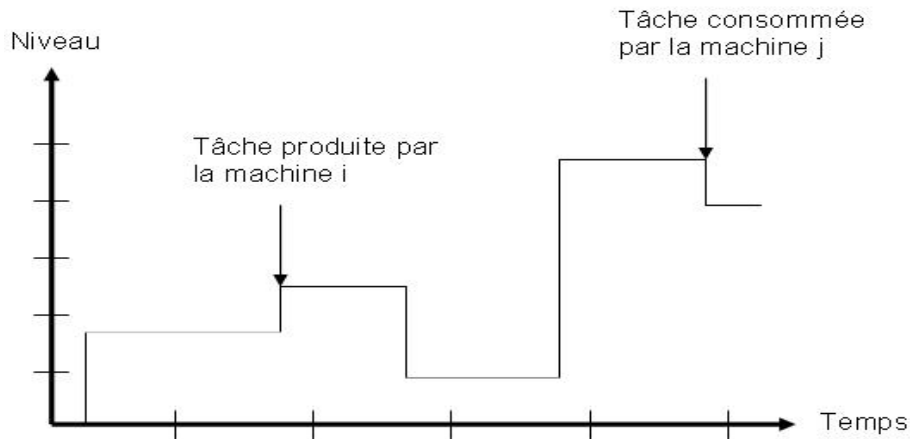


FIG. 1.11 – Fonction profil de flux entre deux machines i et j .

de l'amélioration des processus de la chaîne logistique est étudiée dans [Reiner, 2005]. La chaîne logistique est un modèle complexe très difficile à analyser, surtout en terme de performance. La simulation est l'un des outils efficace pour évaluer le mécanisme de contrôle de la chaîne logistique. Dans [Chan & Chan, 2005], plusieurs exemples ont été construits et traités à l'aide de simulateurs. Plusieurs mesures de performances comme le coût du transport, l'utilisation des ressources, le niveau de stock ou le temps de cycle ont été calculés pour comparer les stratégies.

Des indicateurs peuvent être développés en utilisant des méthodes graphiques. Dans MS-R-PAC, l'évaluation par profil de flux est proposée [Archimède *et al.*, 2003b]. Un profil de flux est une représentation graphique de l'évolution du traitement des tâches entre deux machines i et j . Le temps d'attente des tâches envoyées depuis une machine productrice i vers une machine cliente j est représenté grâce à un profil de flux. Un profil de flux se décrit par une couleur et un niveau. La couleur caractérise la composition du flux de tâches. Dans le cadre de profils agrégés que nous traiterons par la suite, les variations de couleur permettent de déterminer les tâches associées correspondantes. Le niveau est la capacité de charge associée à la machine cliente j pour réaliser ces tâches. Si par exemple une tâche d'une durée de 10 doit être représentée, le niveau sera deux fois supérieur à celui d'une tâche de durée 5. Sur la Figure 1.11, la machine i produit pour la machine j qui a le rôle de cliente. Lorsqu'une tâche est lancée en production sur une machine, la charge de cette machine augmente et son profil s'accroît. Lorsque la tâche s'achève et que la pièce est envoyée vers la machine j , la charge diminue. Ces fonctions de profils de flux présentent un intérêt pour la surveillance de la production. Elles permettent de détecter des écarts à partir d'un diagramme de Gantt. Un diagramme de Gantt pour deux machines i et j est proposé sur la Figure 1.12.a. La fonction profil de flux va être utilisée pour comprendre le comportement des ressources. Dans [Srinivasan & Moon, 1999],

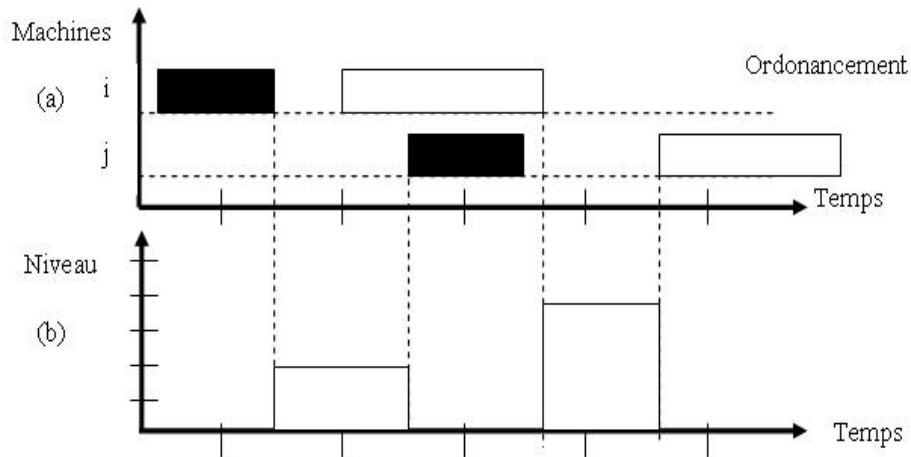


FIG. 1.12 – Construction, à partir d'un (a) ordonnancement de machines i et j , d'un (b) profil de flux.

l'utilisation de groupes d'objets permet une gestion plus efficace pour le contrôle des performances du système étudié. L'agrégation de ces données permet d'obtenir des résultats identiques aux techniques conventionnelles mais à un coût moindre. Dans un atelier, la somme de tous les profils de flux nous donne le profil de flux agrégé de l'atelier. Cette propriété peut nous permettre de réduire les temps de détection. Un mécanisme d'agrégation permettant la génération de profil de flux de plus haut niveau a été développé dans [Archimède *et al.*, 1993, Aldanando & Archimède, 1996]. Il est néanmoins possible à tout moment d'obtenir des profils semi ou non agrégés afin de localiser l'origine et les effets d'une perturbation. Un profil de flux agrégé en fonction du Gantt prévisionnel a été réalisé sur la Figure 1.12.b. Lorsque la première tâche s'achève sur la machine i , la machine j reçoit un ordre de fabrication correspondant à la deuxième tâche de cet OF symbolisé en noir. Le niveau de charge pour l'atelier augmente durant l'attente avant le lancement de la deuxième tâche de l'OF noir. Dès le début de la fabrication pour cette deuxième tâche noire, celle-ci est dite consommée et le niveau de charge équivalent est retranché. Dans la mesure où seule cette tâche était en attente de fabrication, le niveau retombe à zéro. Le processus identique est reconduit pour le second OF symbolisé en blanc. Lors du la fin de la première tâche de l'OF blanc, le niveau s'élève d'une valeur deux fois supérieure par rapport au niveau constaté pour l'OF noir car la durée de tâche planifiée est deux fois supérieure. De façon générale, à la fin d'opérations sur une machine i , celle-ci produit une charge pour une machine j . Cette charge est ajoutée à la fonction profil de flux décrivant la charge donnée par i à j en modifiant le niveau.

La machine i fournit du travail à la machine j et inversement. Pour décrire complètement le niveau de charge entre deux machines, il est donc nécessaire de représenter deux profils de flux ; un de i vers j et un de j vers i . Dans cet exemple, le flux de j vers i est

nul puisque aucune tâche n'est envoyée depuis la machine j vers la machine i . Dans le cas général, l'ensemble des profils de i vers j , avec i variant de 1 à n et j variant de 1 à n (avec n le nombre de machines), sont agrégés pour faciliter l'interprétation globale du fonctionnement d'un atelier.

Depuis un ordonnancement, un profil de flux prédit est généré. Les performances théoriques des ressources, celles du plan de production, peuvent être différentes de la réalité du fait que pour réaliser un ordonnancement la réalité est nécessairement simplifiée. Le profil de flux prédit est périodiquement comparé au profil de flux effectif issu de l'exécution du plan afin de pouvoir analyser les éventuelles différences. Des tables nous permettent d'analyser ces différences. Les profils de flux sont des indicateurs basés sur une méthode graphique facilitant la détection des perturbations et l'évaluation du retard. L'agrégation des profils pour un atelier donne une lecture globale alors que l'analyse de la courbe permet une détection locale de la perturbation. Les profils de flux sont de bons outils pour déterminer les écarts entre les prévisions d'ordonnements et les plans réalisés.

1.13 Démarche proposée pour la conduite réactive de réseaux d'entreprises

A l'issue de notre analyse, nous constatons que l'évaluation de la conduite d'activités distribuées de production reste un problème ouvert pour le cas de réseaux d'entreprises. La simulation de l'évolution d'ateliers multi-sites de production est une voie d'investigation capable de donner les concepts pour concevoir une conduite réactive.

Pour le cas de grands systèmes, le modèle MS-R-PAC développé précédemment ne satisfait pas aux exigences de synchronisation et de coordination des messages malgré les travaux menés afin de pouvoir garantir de meilleures performances d'exécution. Les différentes capacités des processeurs supportant les simulations ainsi que la charge à simuler peuvent provoquer de grands temps de traitement en fonction de la taille des simulations. Il apparaît nécessaire de proposer une nouvelle architecture permettant la gestion d'une simulation distribuée d'ateliers multi-sites tout en garantissant la gestion du temps et des événements. Dans la mesure où la simulation distribuée d'ateliers appartenant à une ou plusieurs chaînes logistiques peut impliquer un grand nombre de simulateurs, d'opérations de calcul et de synchronisations, il est essentiel de mettre en oeuvre un protocole capable de garantir la synchronisation des différents simulateurs en limitant les temps d'exécution pour les simulations d'envergure. Le choix de l'intégration d'un protocole de communication doit permettre de satisfaire efficacement les contraintes tout en assurant une meilleure réutilisation des simulations. C'est à ces conditions que nous pourrions étudier la faisabilité d'un plan multi-site.

De plus, de nombreux aléas peuvent perturber ces organisations multi-sites. Les pro-

blèmes internes à l'un des partenaires ainsi que les problèmes de logistique qui peuvent survenir lors des transports doivent être pris en compte. La simulation permet d'intégrer de telles perturbations afin d'en mesurer leurs influences. L'objectif est de déterminer des configurations qui anticipent certains retards afin de garantir les délais pour les clients. L'adaptation des moyens logistiques au sein de ces réseaux d'entreprises doit aussi être prise en compte. Une gestion efficace doit permettre de limiter le nombre de transports engagés pour les productions distribuées. Pour améliorer les performances des réseaux d'entreprises, une méthode d'accommodation de la conduite selon des critères de délai ou de coût doit être proposée.

Nous proposons une méthode d'évaluation reposant sur une démarche ainsi qu'un outil intégrant le protocole HLA et un simulateur afin d'évaluer la faisabilité de plans multi-sites. Le développement de l'outil reposera sur l'étude de l'architecture MS-R-PAC et la façon d'intégrer le protocole HLA. De plus, cette nouvelle architecture devra encapsuler un simulateur afin d'exécuter les plans dans les ateliers et d'en assurer la faisabilité.

1.14 Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons exposé le contexte général de la conduite d'entreprises sur des marchés fortement concurrentiels, au coeur de multiples réseaux et confrontées à de nombreuses exigences. Une réflexion a tout d'abord été menée à partir d'une étude bibliographique sur la notion de réseau d'entreprises et sur la problématique de conduite et d'évaluation. Des modèles et méthodes ont été présentés, les structures de conduite multi-site ont été décrites et nous avons proposé le concept d'architecture distribuée pour évaluer ces structures.

Dans ce cadre, nous avons étudié le fonctionnement des entreprises en réseau et avons insisté sur le besoin de distribution, de coordination et de synchronisation. La problématique d'ordonnancement a aussi été exposée et la nécessité de prendre en compte la nature distribuée des systèmes de production nous a amené à retenir des solutions elles-mêmes distribuées afin de s'approcher de la réalité des systèmes étudiés.

Nous avons proposé une démarche pour la conduite des réseaux d'entreprises. La distribution des opérations de fabrication sur différents sites et le manque d'outils pour effectuer l'évaluation de plans avant leur lancement en production imposent la définition d'une méthode d'évaluation de la conduite de réseaux d'entreprises. Cette démarche s'appuie sur la proposition d'une méthode basée sur une démarche d'évaluation de performances et sur un outil de simulation pour déterminer la faisabilité des plans. L'objectif est de s'assurer de la faisabilité de plans multi-sites lors de la conduite de réseaux d'entreprises ainsi que d'améliorer la gestion des ressources et de la logistique.

Chapitre 2

Méthode d'évaluation de la conduite de réseaux d'entreprises

2.1 Introduction

Nous proposons dans ce chapitre une méthode et un outil pour évaluer la conduite de réseaux d'entreprises. Basé sur un modèle d'architecture distribuée, cet outil est au cœur d'une méthode qui vise à optimiser la configuration des sites et la logistique des transports intra et inter-sites en vue de permettre l'exécution sans encombre d'un plan de fabrication prévu. Aussi, nous décrivons les rôles et les actions des différentes fonctions, ordonnancement, production et évaluation.

Pour déterminer la faisabilité d'un plan multi-site, cette méthode nécessite pour chacun des sites de définir au préalable un ordonnancement, puis d'exécuter et de suivre la réalisation des opérations du plan. Cette démarche itérative en cinq étapes sera utilisée dans le cadre des simulations que nous mettrons en oeuvre par la suite. Elle est présentée dans la section 2.2.

L'exécution des plans nécessite l'utilisation d'un outil de simulation distribuée dont le modèle conceptuel, construit autour du modèle R-PAC, est décrit dans la section 2.3.

La nouvelle architecture, construite autour de quatre fonctions principales : commande, suivi, communication et synchronisation est détaillée dans la section 2.4, de même que les logiciels de simulation et d'ordonnancement sur lesquels elle s'appuie.

La fonction commande est mise en oeuvre par l'encapsulation d'un logiciel de simulation à événements discrets. Nous étudierons les mécanismes de cette encapsulation pour la conduite des activités de production dans la section 2.5. La fonction suivi est réalisée grâce à la technique d'évaluation par comparaison de profils de flux dans la section 2.6. La fonction communication permet les échanges d'informations entre les générateurs de plans dont nous souhaitons déterminer la faisabilité et notre outil de simulation. Le contenu des messages échangés entre les différents acteurs de la simulation est détaillé dans cette sec-

tion 2.7. Enfin nous présentons la fonction synchronisation qui s'intéresse aux difficultés de coordination et de respect de la règle de causalité lors de la transmission synchrone d'informations. La mise en oeuvre du protocole HLA est expliquée dans la section 2.8.

Dans la section 2.9, nous présentons les mécanismes de modélisation qui sont utilisés afin de représenter les sites Ou ateliers virtuels. Ces derniers seront simulés à l'aide de l'outil proposé.

Nous concluons sur les points forts de notre travail.

2.2 Démarche d'évaluation de la conduite d'entreprises

Nous avons défini une démarche itérative pour réaliser l'évaluation de la conduite d'entreprises. Cette démarche repose sur cinq étapes : la génération de plans distribués, la modélisation d'ateliers, la commande d'ateliers virtuels, le suivi à partir de profils de flux et l'évaluation des écarts et l'accommodation de la conduite.

Étape 1 - Génération de plans distribués

Des plans de fabrication sont générés grâce à un logiciel d'ordonnancement. Ce logiciel, que nous présenterons dans la section 2.4, met en oeuvre le modèle coopératif d'ordonnancement SCEP. Les plans sont ensuite distribués vers les différents sites. Plusieurs séries de plans, correspondants à diverses stratégies, peuvent être générées afin d'être comparées. La démarche d'évaluation doit permettre de déterminer la faisabilité de ces plans. La construction de ces plans ainsi que les messages échangés entre les acteurs de la simulation sont présentés dans la section qui concerne la fonction communication.

Étape 2 - Modélisation d'ateliers virtuels

Les ateliers sont modélisés ; il s'agit de représentations informatiques des sites étudiés. Les modèles sont modifiables et réutilisables. Il est ainsi possible d'évaluer plusieurs stratégies pour des configurations similaires d'ateliers. De plus, les modèles peuvent être facilement adaptés pour correspondre à des configurations d'ateliers qui peuvent varier au cours du temps, selon les partenaires ou les fabrications. La dernière section de ce chapitre présente en détail les spécificités de ces modélisations.

Étape 3 - Commande d'ateliers virtuels

L'exécution des plans est simulée dans ces ateliers virtuels. Un outil de simulation permettant la commande des ateliers virtuels a été développé. Il sera présenté dans les sections suivantes en insistant particulièrement sur les fonctions de commande et de synchronisation qui sont mises en oeuvre.

Étape 4 - Suivi à partir de profils de flux

Lors de l'exécution de plans dans les ateliers virtuels, tous les événements de simulation sont datés et enregistrés afin d'établir des profils de l'état de la production. Nous parlons

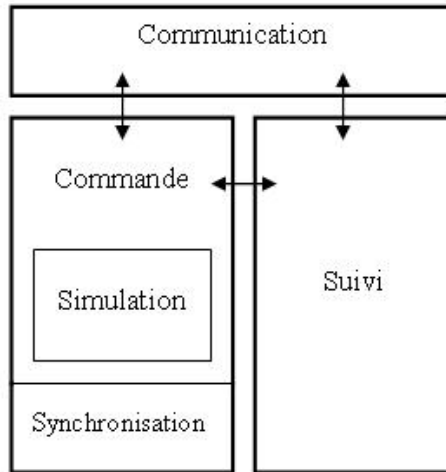


FIG. 2.1 – Structure d'un fédéré R-PAC.

de profils de flux suivis. De la même manière, des profils de flux prévus sont générés à l'initialisation de la simulation en fonction des prévisions de réalisation basées sur les plans reçus. La section traitant de la fonction suivi détaille les mécanismes déjà abordés au chapitre 1.

Etape 5 - Evaluation des écarts et accommodation de la conduite

Les profils de flux prévus et suivis sont comparés pour chaque site. Les écarts sont ainsi évalués et l'analyse permet de définir la faisabilité des plans reçus. Une accommodation est alors envisageable en faisant varier les stratégies d'ordonnancement ou les configurations d'ateliers. Par ce biais, des simulations successives permettent de déterminer une bonne configuration respectant des délais pour une production tout en minimisant le nombre de moyens de transports utilisés. Une valorisation logistique est ainsi réalisée.

A l'aide de la démarche présentée, il est possible d'évaluer la conduite de tous types de systèmes. Cette démarche repose sur l'utilisation d'un outil de simulation distribué. Dans la section suivante, nous proposons un modèle conceptuel de simulation distribuée adapté à la démarche que nous souhaitons mettre en oeuvre.

2.3 Modèle conceptuel de conduite réactive

La démarche que nous avons présenté repose sur un modèle conceptuel de conduite réactive et sur un outil de simulation distribuée capable d'exécuter des plans pour l'évaluation de la conduite de systèmes. Le modèle MS-R-PAC présenté au chapitre 1 n'étant pas satisfaisant, un nouvel outil a du être développé. Un modèle conceptuel pour l'encapsulation de l'atelier virtuel a été présenté dans [Enjalbert *et al.* , 2005].

La structure d'un fédéré R-PAC est présentée sur la Figure 2.1. Ce fédéré se compose de trois fonctions globales : la commande, le suivi et la communication.

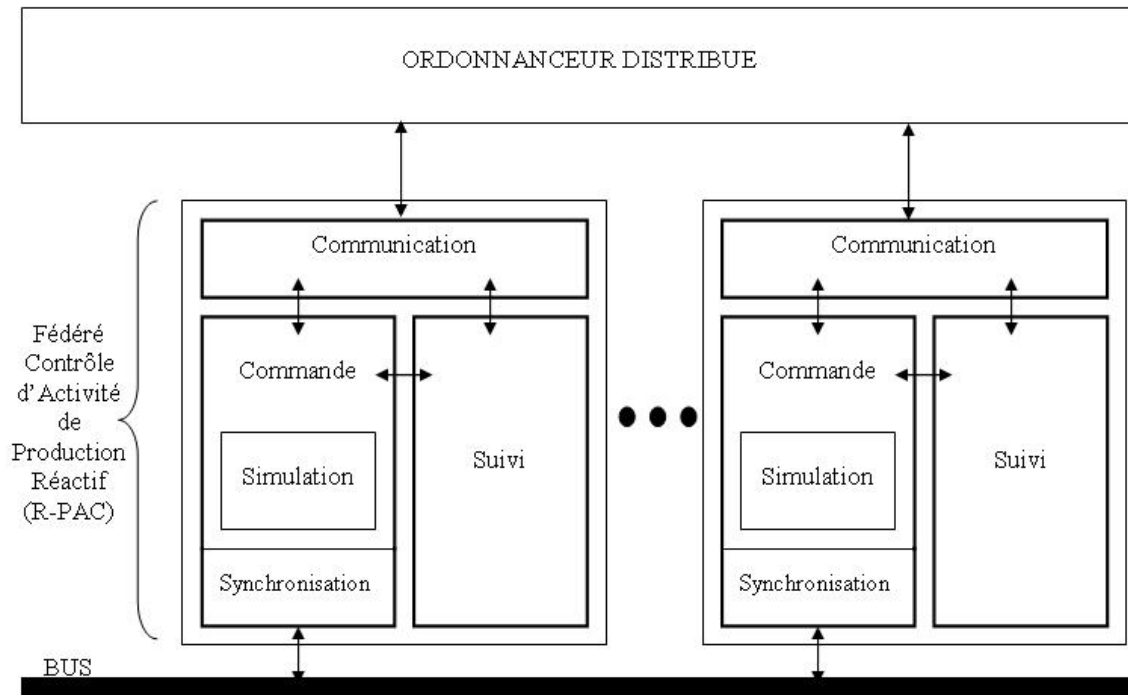


FIG. 2.2 – Modèle conceptuel F-R-PAC.

La communication est la fonction qui permet l'échange d'informations entre un ordonnanceur distribué et notre modèle. Elle met en oeuvre les mécanismes de réception et d'émissions de messages relatifs au plans distribués. Le suivi est la fonction utilisée pour l'évaluation de la conduite des entreprises. Les profils de flux sont générés automatiquement et progressivement au cours de l'exécution de la simulation. La commande encapsule la simulation ainsi que les mécanismes de synchronisation. La simulation de l'exécution des plans est effectuée sur un atelier virtuel piloté par la fonction commande. Au cours des simulations, les OF peuvent être réalisés sur plusieurs sites différents et les tâches associées sont distribuées entre ces sites. En prévision du caractère distribué de ce modèle, une fonction de synchronisation est mise en oeuvre pour permettre à différents ateliers virtuels de s'exécuter de façon synchrone.

Ce modèle est étendu aux cas multi-sites sur la Figure 2.2. Plusieurs fédérés R-PAC sont associés au sein d'une fédération F-R-PAC, acronyme de Fédération de R-PAC. Les simulations sont synchronisées via un bus de communication. D'autre part, une fonction d'ordonnancement distribué est représenté pour la génération des plans.

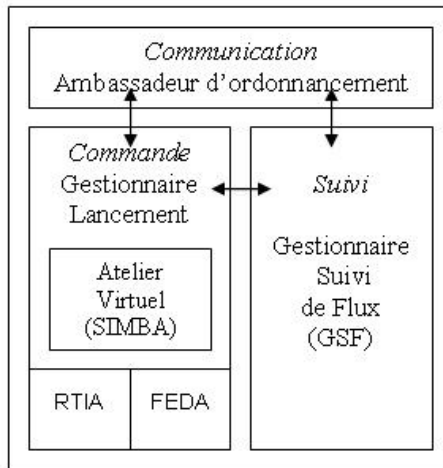


FIG. 2.3 – Fédéré R-PAC.

2.4 Mise en oeuvre de l'architecture distribuée d'évaluation de la conduite

A partir du fédéré défini précédemment, une architecture de simulation est proposée sur la Figure 2.3. Pour chaque fonction proposée, un gestionnaire ou un logiciel ont été définis. La fonction suivi est assurée par un GSF (Gestionnaire de Suivi de Flux) qui communique avec la fonction commande pour récupérer les informations issues de l'exécution virtuelle. Au sein de la fonction commande, un GL (Gestionnaire de Lancement) est développé pour distribuer les tâches du plan vers l'atelier virtuel. Chaque fédéré se différencie par le modèle d'atelier virtuel qu'il encapsule. Le logiciel SIMBA, développé par Lanner Group, est utilisé pour modéliser ces ateliers virtuels. Il ne s'agit pas ici d'un émulateur reproduisant une simulation d'atelier, mais bien d'un simulateur que nous avons encapsulé et piloté par le GL. Des ambassadeurs du RTI et du fédéré (RTIA et FEDA) constituent la fonction synchronisation de la fonction commande. Enfin, la fonction communication est mise en oeuvre par un ambassadeur d'ordonnancement qui transmet les informations sur les plans au GL et au GSF.

L'architecture F-R-PAC est présentée en Figure 2.4. L'architecture distribuée se décompose en deux parties principales : une couche d'ordonnancement et une couche de simulation distribuée. La fonction d'ordonnancement repose sur l'utilisation de R@mses (Re@ctive Multi-Site Scheduling). R@mses est un logiciel d'ordonnancement distribué qui a été développé au Laboratoire Génie de Production. Basé sur le modèle SCEP et sur le concept de gammes dynamiques, R@mses met en compétition les OF qui sont négociés pour les sites. Un bus CORBA, présenté en Figure 2.5, permet aux noyaux SCEP de s'échanger les informations en vue d'établir l'ordonnancement distribué. Une gamme de fabrication permet de décrire la succession des différentes opérations à réaliser sur un

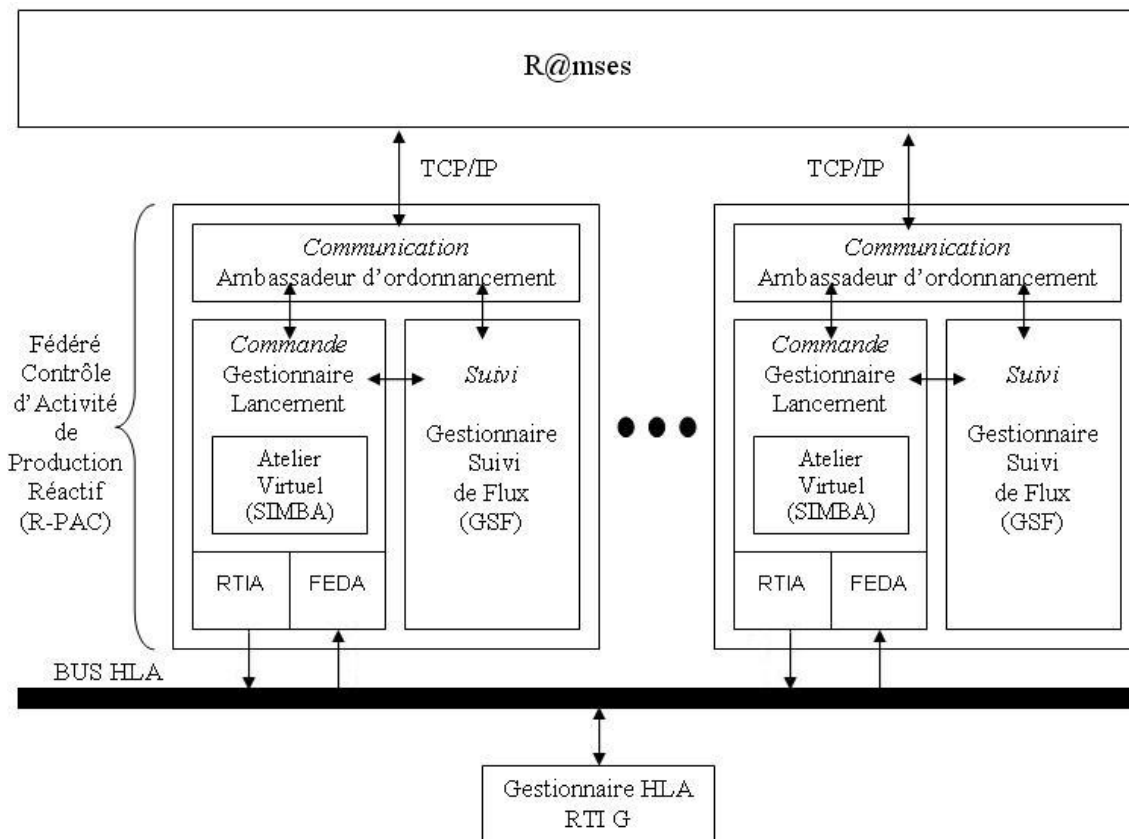


FIG. 2.4 – Architecture de simulation distribuée F-R-PAC et sa connexion à R@mses.

produit. Les opérations d'une gamme dynamique peuvent être réalisées par différentes machines, avec des durées de réalisation variables suivant les machines. Une gamme est composée de groupes d'opérations, les groupes devant être réalisés de manière séquentielle les uns après les autres dans un ordre préétabli. Un groupe d'opérations peut être permutable, les opérations du groupe n'ayant pas d'ordre de réalisation prédéfini. Il peut aussi être synchrone, les opérations du groupe ayant des contraintes sur leur date de début et/ou de fin. Enfin, un groupe d'opérations peut être séquentiel, toutes les opérations du groupe devant être réalisées de manière séquentielle selon un ordre préétabli. Chaque opération dans une gamme dynamique est décrite par une activité et une durée estimée. Une activité décrit un travail à réaliser, comme par exemple du tournage, de la peinture ou de l'assemblage, sans préciser la ressource de production nécessaire à sa réalisation. La durée estimée de l'opération correspond à la durée de l'activité si la machine la plus rapide du système de production la réalise. La notion de gamme dynamique permet une plus grande flexibilité du modèle. En effet, il n'est pas nécessaire de déterminer a priori une machine ou un type de machine particulier pour la réalisation d'une opération. Le système a une plus grande liberté de choix de machines parmi celles disponibles pour réaliser les opérations. Pour une gamme dynamique, il n'est pas nécessaire de savoir quelles

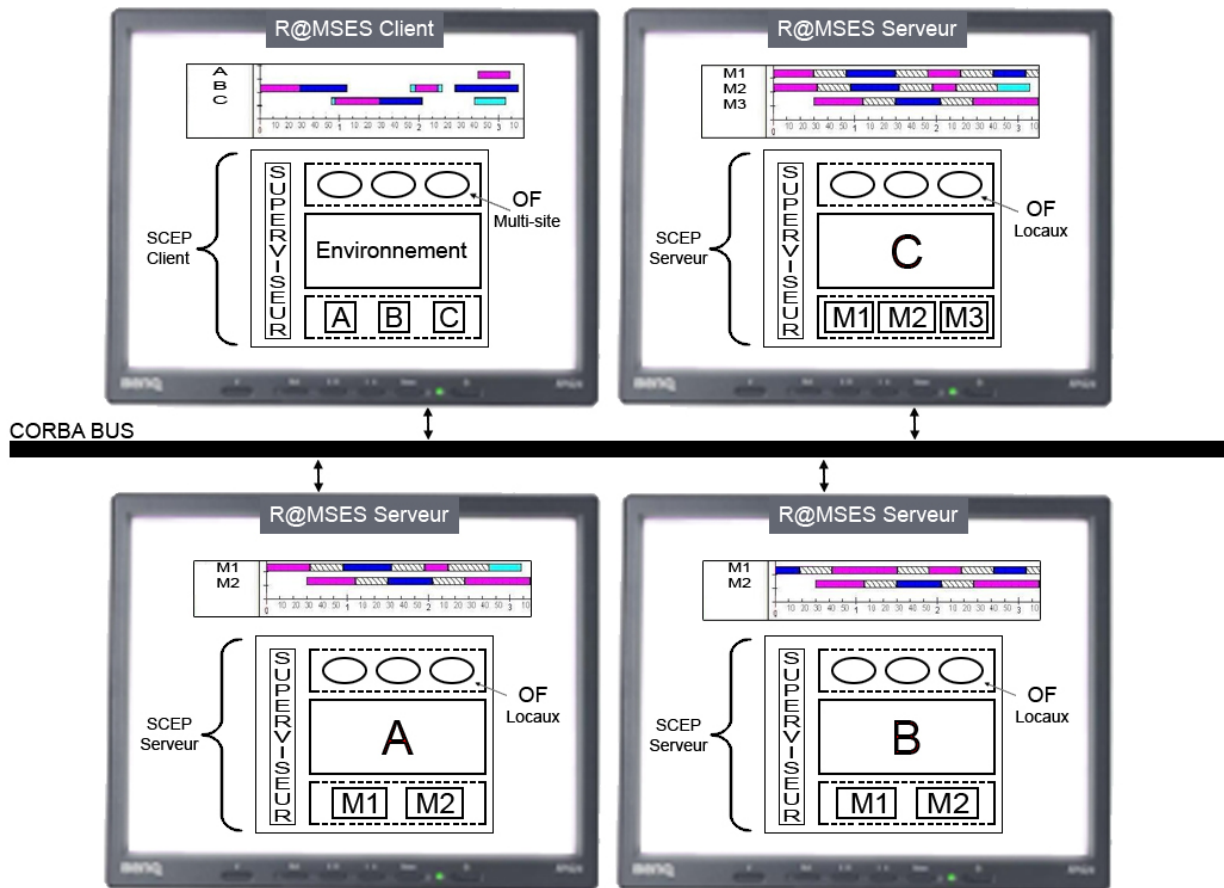


FIG. 2.5 – Ordonnancement des OF sur trois sites avec le logiciel R@mses.

sont les machines qui composent le système physique de production, seule la connaissance des activités réalisables étant nécessaire. La notion de gamme dynamique permet aussi de conférer au système des degrés de liberté qui peuvent être utilisés pour réagir aux perturbations. R@mses interagit via le protocole TCP/IP avec la couche de simulation distribuée.

La couche de simulation distribuée est ici présentée dans le cas de deux fédérés R-PAC. Un bus et un gestionnaire HLA, basés sur l'utilisation d'un RTI développé par la société Pitch et sur son implantation dans l'architecture sous la forme d'un Gestionnaire RTI (RTIG), permettent la synchronisation des fédérés selon les mécanismes de HLA décrits au chapitre 1. Les plans de production issus de R@mses sont interprétés et transcrits en langage compatible avec SIMBA. Les informations sur les plans distribués sont échangées entre les fonctions du fédéré R-PAC et la couche d'ordonnancement par l'intermédiaire de l'ambassadeur d'ordonnancement.

Une interface graphique a été réalisée afin d'assurer le pilotage des simulateurs. L'intégration des différents gestionnaires et logiciels a été réalisée logiciellement. Sur la Figure 2.6, un diagramme de classes UML (Unified Modeling Language) détaille les fonctions

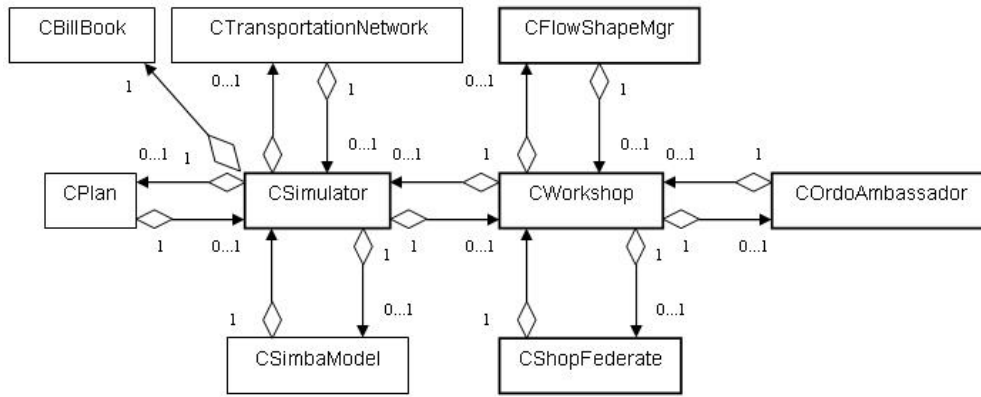


FIG. 2.6 – Diagramme de classes de F-R-PAC.

principales de la couche de simulation distribuée pour l'architecture F-R-PAC. Cinq classes principales ont été définies. CFlowShopManager réalise le suivi de flux des opérations de production. C'est l'implantation du GSF. COrdoAmbassador est la classe qui gère la liaison avec l'ordonnancement, elle correspond à la fonction communication. CShopFederate permet au fédéré R-PAC d'accéder aux mécanismes de HLA pour la fonction synchronisation. CWorkshop représente une base de donnée alimentant les différentes classes avec les différentes informations nécessaires à l'exécution virtuelle. CSimulator permet l'encapsulation du simulateur. Elle correspond à la commande de SIMBA par le GL.

Des classes annexes sont associées à CSimulator. CSimbaModel intègre les mécanismes SIMBA nécessaires au pilotage. CTransportationNetwork permet le traitement des informations relatives aux transports. CBillBook est un échéancier local des opérations à traiter sur le simulateur. CPlan fournit les mécanismes capables de faire évoluer cet échéancier lors de la simulation.

Le principe des échanges de messages ayant lieu lors d'une simulation basée au sein de cette architecture est présenté en Figure 2.7 sur un diagramme de séquences pour un fédéré R-PAC. A l'initialisation de la simulation, un ordonnancement est envoyé à chaque fédéré par R@mses. Celui-ci est reçu et traité par l'ambassadeur d'ordonnancement. Les informations du plan sont transmises au GL et au GSF. Le GL transforme ces informations grâce aux mécanismes fournis par les classes présentées précédemment. Le GSF peut, dès le début de la simulation, générer le profil de flux prévu. Périodiquement, le GL stoppe l'exécution et transmet les mesures de la simulation au GSF. Le GSF peut alors mettre à jour le profil de flux suivi. Le GL transmet son temps de simulation au RTIG et demande une autorisation pour poursuivre la simulation. Celui-ci, en accord avec les avances de temps des autres fédérés de la simulation, autorise la reprise de la simulation. Un nouveau cycle est alors lancé jusqu'à la fin du traitement de toutes les tâches du plan.

L'architecture distribuée d'évaluation de la conduite repose sur plusieurs fonctions que nous détaillons dans les sections suivantes.

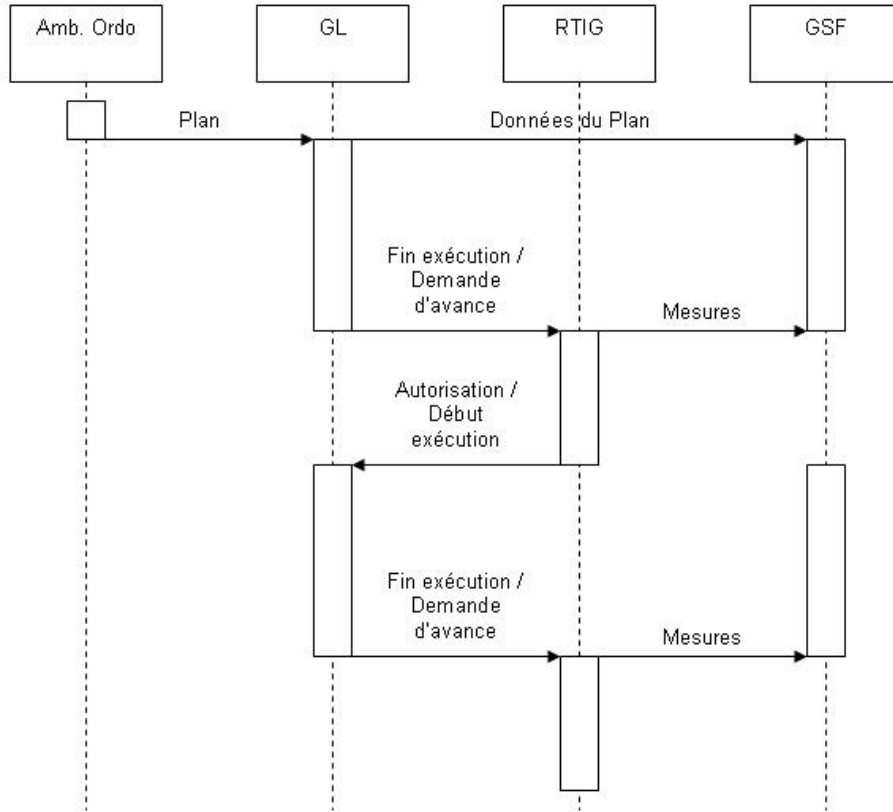


FIG. 2.7 – Diagramme de séquences pour un fédéré R-PAC.

2.5 Fonction commande

Le lancement de l'exécution des activités de production est mis en oeuvre par la fonction commande implantée dans le GL. Son algorithme défini dans [Enjalbert *et al.*, 2004b], pilote l'exécution des plans en synchronisant les activités et en lançant les tâches dans les ateliers virtuels.

Sur la Figure 2.8, un diagramme de séquences permet l'analyse précise des échanges d'informations et de la synchronisation au sein d'un GL durant une simulation. Lors du déroulement de la simulation, en accord avec le diagramme de séquences présenté pour un fédéré R-PAC, les événements de production sont exécutés sur l'atelier virtuel modélisé par SIMBA. A intervalles de temps réguliers, SIMBA est stoppé par le GL. Les mesures de la simulation sont envoyés au GSF. La fonction synchronisation est alors utilisée. Les informations datées de SIMBA sont traduites au formalisme HLA par le RTIA qui communique l'état de la simulation au RTIG et demande la poursuite de la simulation. Celui-ci répond et autorise la reprise de la simulation en envoyant un message au FEDA. Ce dernier traduit le message pour tenir informer SIMBA de la reprise de la simulation. Le cycle se poursuit tant que toutes les tâches du plan ne sont pas achevées de simuler. Il est important de comprendre que la fonction de synchronisation n'a de sens que lors de

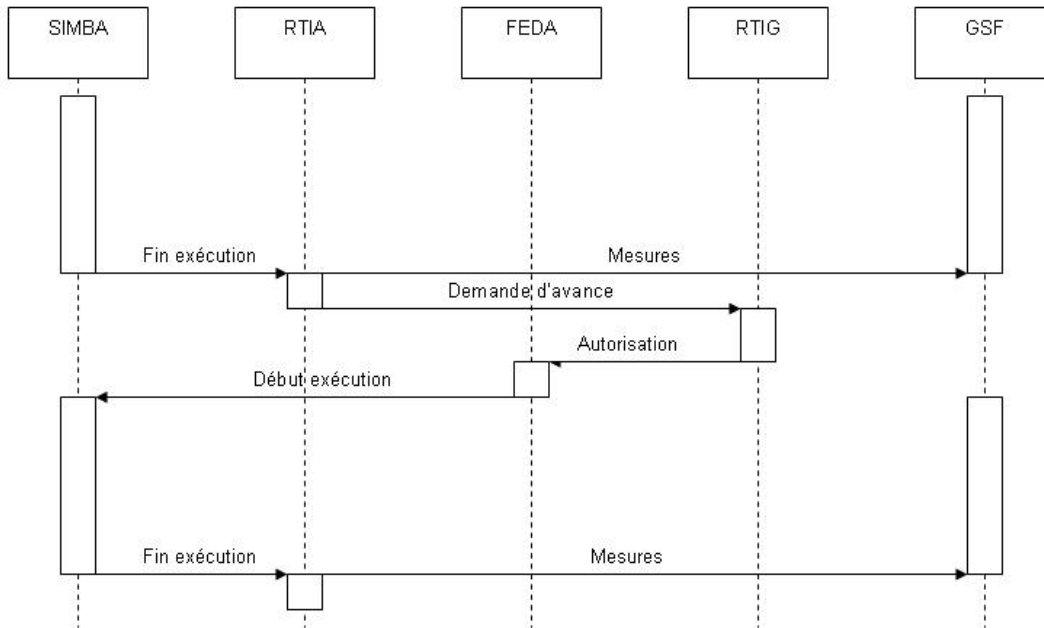


FIG. 2.8 – Diagramme de séquences pour un GL.

la participation de plusieurs fédérés à la simulation. Les mécanismes brièvement décrits ici seront plus détaillés dans la section traitant de la fonction synchronisation.

A chaque fédéré est associé un GL qui est le principal gestionnaire de cette architecture. L'algorithme principal du GL, présenté en Figure 2.9, est construit autour du formalisme de HLA pour la coordination et la synchronisation des événements entre les fédérés. Dans la terminologie HLA [DMSO, 1996], des événements peuvent se produire durant la simulation. Un *NO* (Nouvel Ordonnancement) à exécuter peut être reçu à tout instant par l'ambassadeur d'ordonnancement. L'événement correspondant est noté *NOevent*. De plus, deux types d'ordonnancements doivent être distingués : l'*OP* (Ordonnancement Prévu) et l'*OE* (Ordonnancement Exécuté). Des différences entre l'*OP* à exécuter et l'*OE* peuvent exister. Si l'*OP* correspond au plan initialement reçu, l'*OE* se réfère à l'échéancier local du simulateur (CBillBook) qui peut être modifié si des perturbations viennent modifier les opérations lors de la simulation. Trois types de tâches doivent être considérés pour permettre de passer de l'un à l'autre : l'ensemble des *NT* (Nouvelles Tâches), l'ensemble des *TS* (Tâches à Supprimer) et l'ensemble des *TR* (Tâches Restantes). Le *TR* se compose de toutes les tâches qui appartenaient à l'ordonnancement précédent et qui n'ont pas été supprimées ou renouvelées. L'événement *NOevent* est reçu par le GL pour les tâches $\{NT \cup TR\}$.

L'événement *TSOMessageEvent* (Time Stamp Ordered Message Event) correspond à l'envoi ou à la réception d'un message *TSO* daté dans le temps. Les fédérés sont régulés et contraints. Ils peuvent respectivement émettre et recevoir des messages *TSO*. Ces messages garantissent qu'un fédéré doit réguler l'avance des autres fédérés mais qu'il est

Tant que <simulation en cours> **faire**
 Requête d'avance de temps auprès du RTI pour $T^2 = \min(\text{clock} + L, D_{\min})$
 Attente d'un nouvel événement noté <event>
Si <event> = *RAV*(T^1) **ou** *Ievent*(T^1),
 Sauver les valeurs d'attributs ; $D_{\min} = \min(D_{\min}, T^1)$
Sinon
 Selon le cas <event>
 Soit *NOevent*:
 GL reçoit *NO* pour les tâches {*NT* U *TR*}; $TS = OE - \{NT \text{ U } TR\}$
 Supprimer les tâches *TS* de l'*OE*; Supprimer les objets HLA associés.
 Ajouter les *NT* à l'*OE*; Créer les objets HLA associés.
 Mettre à jour les valeurs du plan *OE*.
 Soit *TAG*(T^2):
 Traiter les événements locaux; Exécution des tâches sur le simulateur
 entre le temps *clock* et T^2 .
 Mettre à jour la valeur de l'horloge ; $\text{clock} = T^2$
 Intégrer les valeurs des attributs des *RAV* ou *Ievent* datés T^2 .
 Soit *Perturbation*:
 Mettre à jour l'*OE*.
 Si nécessaire *UAV* des objets HLA. // Réflexion vers les autres fédérés R-PAC.
 Mettre à jour l'échéancier local.

FIG. 2.9 – Algorithme principal du GL.

aussi contraint par eux, assurant ainsi la synchronisation entre les fédérés.

L'événement *Ievent* (Interaction) correspond à un fédéré recevant une interaction depuis un autre fédéré. Le service d'envoi d'interaction envoie un message à la fédération, le service de réception d'interaction transmet l'interaction aux fédérés concernés. Finalement, les événements les plus fréquents pour le GL sont l'ensemble $GL_{event} = \{NOevent, TSO_{MessageEvent}, Ievent\}$.

De plus, les définitions de certains services HLA [DMSO, 1998] sont indispensables pour comprendre l'algorithme principal du GL. Le service *NER* (Next Event Request) de requête de prochain événement demande une avance de temps logique pour le fédéré jusqu'au prochain message *TSO* daté qui doit être délivré au fédéré. Ainsi, nous obtenons l'assurance que des messages avec une date inférieure au temps logique spécifié dans la requête ne sont pas omis. Les services *UAV* (Update Attribute Value) de mise à jour de valeur d'attribut et *TAG* (Time Advance Grant) d'autorisation d'avance de temps sont deux mécanismes communs à tous les fédérés. Le service *UAV* rend accessible à la fédération les valeurs courantes des attributs qui appartiennent et sont gérés par les fédérés. Le service *TAG* est une autorisation donnée par la fédération au fédéré de se rendre à la date du prochain événement.

Le fédéré a le pouvoir de modifier les valeurs d'attributs comme spécifié dans le FED. Le service *UAV*, couplé avec le service *RAV* (Reflect Attribute Value), est le principal mécanisme d'échange de données supporté par le RTI. Le service *RAV* de réflexion de valeur d'attribut permet la réception de la mise à jour des attributs pour un fédéré.

L'utilisation du service *TAG* indique que les requêtes précédant l'avance du temps logique du fédéré ont été honorées. L'argument de ce service indique que la date logique du fédéré a été avancée à cette valeur. Si l'autorisation intervient en réponse à l'invocation d'un *NER*, le RTI garantit qu'aucun *TSO* message sera délivré dans le futur avec une date inférieure ou égale à cette valeur. A tout moment durant l'exécution de la fédération, la valeur *L* du *lookahead* empêche un fédéré de produire un événement daté avant son propre temps logique plus la valeur *L*. De ce fait, les fédérés ne peuvent envoyer de messages dans le passé des autres fédérés.

Finalement, d'autres variables doivent être introduites pour expliquer le fonctionnement de l'algorithme du GL. On notera le temps logique du fédéré *clock*, celui-ci pouvant être différent pour tous les fédérés. La date du prochain événement local correspondant au minimum des dates ordonnancées est appelé D_{min} .

La commande des simulateurs est à présent implantée et l'exécution des ateliers virtuels peut être réalisée. Le suivi des simulations nécessaire à l'évaluation de la conduite des réseaux d'entreprises est présenté dans la section suivante.

2.6 Fonction suivi

La définition d'indicateurs de suivi de l'évolution de la simulation et d'évaluation des performances doit permettre d'obtenir "des données quantifiées qui mesurent l'efficacité d'un système simulé par rapport à un plan ou un objectif" [AFGI, 1992]. Un indicateur de performance est une donnée quantifiée qui mesure l'efficacité d'un système par rapport à un plan ou à un objectif déterminé dans le cadre d'une stratégie d'entreprise. La fonction suivi est la fonction qui va permettre de déterminer de la faisabilité des plans que nous évaluons grâce à notre méthode [Enjalbert *et al.*, 2005]. Cette fonction est assurée par le GSF et correspond à l'implantation de la classe *CFlowShapeManager*. Le GSF assure le suivi de l'état de la production. A chaque occurrence d'événements, les messages datés échangés entre la fédération et le GL sont scrutés et les informations relatives à la charge des ateliers virtuels sont enregistrées. Ainsi, des profils de flux peuvent être générés.

La figure 2.10 illustre un suivi de la production sur trois sites par la génération de profils de flux à partir des occurrences de dates de début et de fin d'opération. L'ordonnancement initial est disponible grâce aux classes *COndoAmbassador* et *CWorkshop* pour le transfert et la traduction des informations. Un profil de flux prévu est donc généré pour les trois sites étudiés, respectivement (2.10.a,.b et c). Lors de la simulation, les valeurs suivies par scrutation périodique sont utilisées pour la génération progressive et automatique des profils de flux suivis, respectivement (2.10.d, e et f). L'intervalle de scrutation est déterminé par la valeur *L* du *lookahead* introduit précédemment. Pour réduire les temps de détection, les profils de flux des machines d'un même atelier sont agrégés selon les mécanismes présentés au chapitre 1.

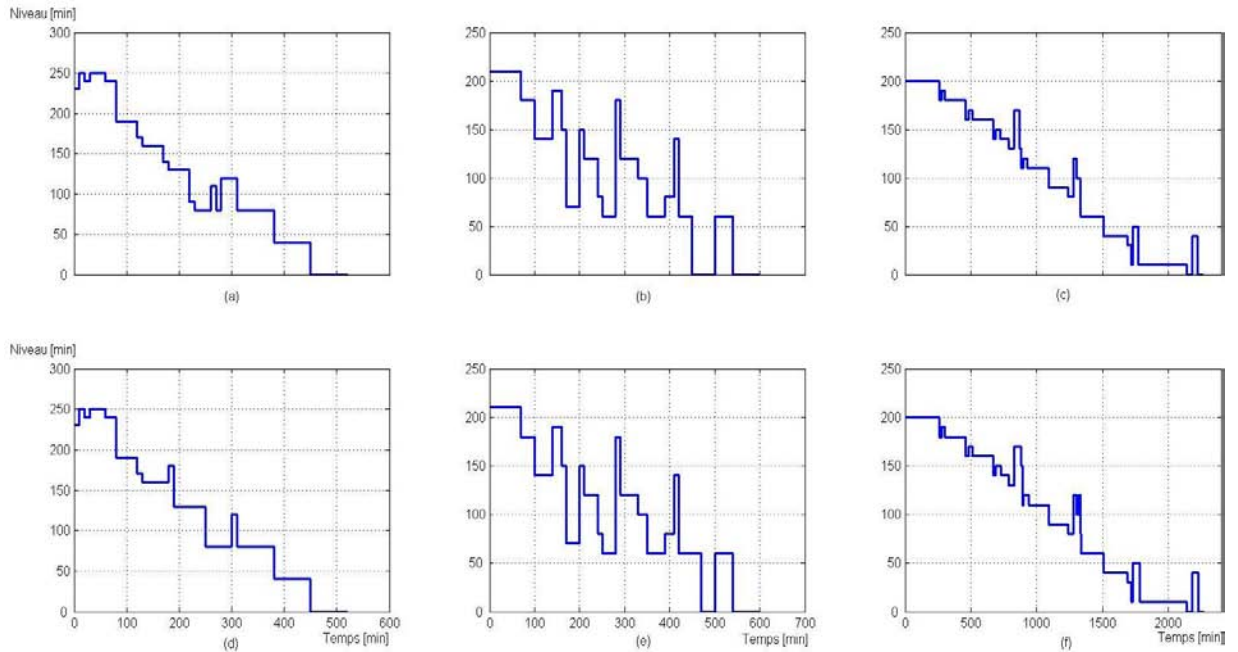


FIG. 2.10 – Exemple de profils de flux sur (a), (b) et (c) prévus et (d), (e) et (f) suivis sur trois sites différents.

Deux caractéristiques permettent l'analyse des profils de flux : le niveau de charge et la couleur. Le niveau représente la somme exprimée en minutes (en dizaines de minutes sur la Figure 2.10) des tâches dont le lancement est prévu dans l'atelier. Un accroissement indique une augmentation de la charge globale de l'atelier alors que le niveau zéro signifie qu'aucune tâche n'est programmée. Les couleurs sont associées aux OF ou aux machines. Ainsi, il est possible de déterminer aisément quel OF vient de débiter lors de la baisse du niveau de charge et ce malgré les mécanismes d'agrégation mis en oeuvre.

Dans la pratique, le plan de production diffère toujours du plan effectif car l'ordonnancement est réalisé à partir d'une simplification de la réalité. Les écarts entre les profils prévus et réels sont analysés à chaque occurrence d'événement afin d'évaluer les performances du plan. Ils peuvent être dus à des contraintes non prises en compte ou à des aléas de production. L'analyse de ces écarts permet de déterminer la faisabilité de plans tout en satisfaisant les performances. En cas de non respect des critères d'acceptabilité donnés par le client, une autre solution doit être proposée afin d'absorber les plans. Une accommodation de la conduite doit alors être effectuée afin de trouver une bonne configuration.

2.7 Fonction communication

L'ambassadeur de communication met en oeuvre un lien entre la plate-forme de simulation distribuée et la couche d'ordonnancement distribué. L'ambassadeur de communica-

tion est décrit dans la classe COrdoAmbassador. Il permet d'envoyer à l'ordonnanceur des informations relatives aux aléas de production ou de transport qui ont été détectés par le GSF et est à l'écoute de l'ordonnanceur pour recevoir à tout instant un nouvel ordonnancement. Ces fonctionnalités ont été implantés en vue d'automatiser l'accommodation de la conduite.

Le noeud central entre ces différents gestionnaires est représenté par la classe CWorkshop qui récupère toutes les informations de la simulation et les stocke dans ses bases de données. CWorkshop demande les informations sur l'ordonnancement initial par sa liaison avec COrdoAmbassador. Les dates des messages relatifs aux tâches sont à disposition de CShopFederate dans le formalisme HLA. De même, une base de donnée est accessible au GL par l'intermédiaire de la classe CSimulator afin d'alimenter le simulateur. Enfin, CWorkshop est en contact avec CFlowShapeMgr afin de donner les informations relatives à l'ordonnancement initial pour prévoir les profils de flux. CWorkshop est la classe mettant à disposition de la simulation les informations nécessaires à la synchronisation des fédérés.

Cette fonction communication met en oeuvre les mécanismes pour la transmission des messages. Dans notre architecture et pour le fonctionnement de notre outil, deux types de messages cohabitent.

Nous avons vu précédemment dans la fonction commande que le GL a besoin de l'accord du RTI pour pouvoir lancer les simulations. Les messages au formalisme HLA pour la commande des simulateurs que nous avons détaillé sont utilisés. L'accord de lancer la simulation à une date prédéfinie lors de l'ordonnancement est donné par le RTI à un GL. Néanmoins, si des perturbations surviennent, le GL doit être capable d'identifier les tâches qui vont être décalées temporellement. Les messages envoyés lors de l'ordonnancement par R@msec vers le GL doivent donc contenir les informations nécessaires au traitement des perturbations. Le GL doit être capable d'identifier les tâches qui sont exécutées sur le simulateur.

Les messages relatifs aux communications entre l'ordonnanceur et les fédérés R-PAC sont des messages concernant les gammes de fabrication. Ils sont de la forme $OFwGRxOPySz$. w représente le numéro de l'OF, x le numéro du groupe si l'OF est découpé en plusieurs phases. Le numéro de la tâche est représenté par y . Si une opération de fraisage intervient en quatrième position lors de la fabrication, y sera égal à quatre. Enfin z est le numéro qui correspond au site où se déroule la fabrication. Il est donc possible d'interpréter le message $OF3GR1OP4S2$ en disant que l'événement attendu correspond à la quatrième tâche de la première phase du troisième OF sur le deuxième site. Ces messages sont envoyés par l'ordonnanceur au GL qui les interprète. Chaque simulateur reconnaît ainsi la tâche qui doit être exécutée sur l'atelier virtuel. En cas de perturbation, le GL est en mesure de décaler les opérations qui ne peuvent se dérouler selon l'ordonnancement initialement prévu. La synchronisation des tâches au sein d'un fédéré entre le GL et le simulateur est

assurée. Les mécanismes de synchronisation sont décrits dans la section suivante.

2.8 Fonction synchronisation

La synchronisation des événements et le respect de la règle de causalité pour les messages sont deux difficultés majeures de la simulation distribuée. Le fonctionnement de F-R-PAC requiert la cohabitation de deux types de synchronisation : la synchronisation inter fédérés R-PAC et la synchronisation intra fédéré.

La synchronisation inter fédéré, gérée par HLA, repose sur un mécanisme de publication/abonnement. En cours de simulation, les fédérés R-PAC coopèrent et réagissent aux événements qui se produisent et qui transitent sur le réseau à l'aide de messages datés. Ces messages datés assurent un fonctionnement régulé et contraint pour tous les fédérés.

La synchronisation intra fédéré concerne la liaison entre le GL et l'atelier virtuel. Elle est basée sur l'établissement de points de rendez-vous auxquels le simulateur doit se rendre pour se synchroniser avec le GL.

En réalité, la difficulté réside dans la cohabitation de ces deux niveaux de synchronisation. En effet, le GL, structure de commande du fédéré, doit satisfaire le RTI afin d'avancer en tenant compte des autres fédérés. Il doit par ailleurs s'assurer qu'un point de rendez-vous n'est pas trop éloigné afin d'éviter une désynchronisation du simulateur. L'exemple de la figure 2.11 illustre la gestion du temps et la règle de causalité pour la cohabitation des deux niveaux de synchronisation. Afin de garantir la bonne exécution du plan, le GL doit déterminer la date de l'événement le plus proche dans le temps en fonction des informations recueillies auprès du simulateur et des informations extraites de son propre échéancier. La date souhaitée du prochain rendez-vous est ainsi fixée par le GL en fonction des informations locales. Cette date peut être un début ou une fin d'opération planifiée, un début ou une fin de transport, ou encore une date correspondante à un événement attendu mais retardé. Le fédéré fait une requête *NER* au RTI pour avancer le simulateur à cette date. Si le RTI considère que jusqu'à cette date aucun événement extérieur ne viendra perturber le fédéré, alors il autorise (*TAG*) l'avancement dans le temps du simulateur. Si au contraire le RTI refuse l'avancement à la date souhaitée de rendez-vous, il propose un nouveau point de rendez-vous à une date antérieure correspondante au prochain événement extérieur concernant le fédéré. Le GL peut alors avancer le simulateur jusqu'à la date retenue de rendez-vous. Il est à noter que jusqu'à cette date de rendez-vous, plusieurs relances du simulateur sont possibles. Cela peut être dû aux arrêts du simulateur pour cause de dysfonctionnements. Une fois le point de rendez-vous atteint, le GL réactualise son échéancier, transmet des messages datés sur son état au RTI et recommence le cycle en proposant une nouvelle date souhaitée de rendez-vous. Dans l'exemple étudié, la première synchronisation a lieu à la date u . Un événement *CDE* (Current Date Event) concernant la date courante est envoyé par le simulateur au GL. Celui-ci corres-

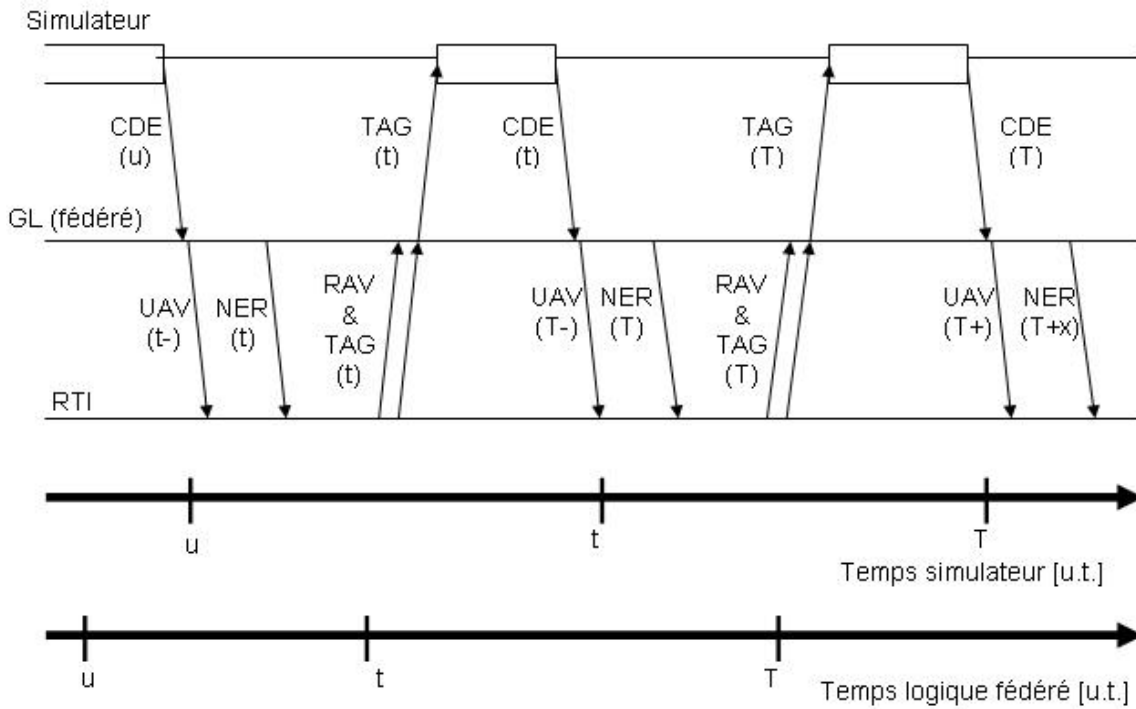


FIG. 2.11 – Communications au sein d'un fédéré R-PAC.

pond à une date de rendez-vous retenue préalablement. Le fédéré transmet au RTI des messages *UAV* concernant l'état des objets simulés localement. Il demande ensuite une nouvelle avance dans le temps vers la prochaine date souhaitée de rendez-vous. La requête d'avance de temps doit conduire le simulateur à la date t . Le RTI s'assure préalablement qu'aucun événement ne pourra intervenir avant la date retenue (t) pour le fédéré. Une fois l'autorisation *TAG* accordée et après avoir reçu les messages *RAV* concernant l'état des objets simulés par les autres fédérés, le GL transmet l'information au simulateur piloté qui peut à nouveau avancer à la date t . Le mécanisme est reconduit jusqu'à la simulation complète de tous les événements planifiés.

Chaque fédéré à son propre temps logique, les services de gestion du temps devant coordonner l'avance de tous les temps logiques des fédérés. La fédération n'a pas de temps logique propre. Un fédéré peut aussi avoir différents niveaux d'implication pour la gestion du temps. Certains fédérés sont peu ou pas concernés par les données temporelles. Si un fédéré représente un bâtiment, il est possible de supposer que son état va peu évoluer au cours du temps. En revanche, si un fédéré représente une machine, son état va évoluer à chaque changement de pièce ou de type de fabrication sur la machine. Un fédéré temps régulé est un fédéré dont l'avance de temps logique régule le reste de la fédération. Un fédéré temps contraint est un fédéré dont l'avance de temps logique est contrainte par le reste de la fédération. Un fédéré régulé et contraint joue donc un rôle essentiel pour la gestion du temps, il est synchronisé. Son temps logique ne peut pas s'écarter de celui

du reste des participants de la fédération. Dans une fédération, les effets des services de gestion du temps sont considérés comme des événements. Un fédéré peut envoyer des événements comme par exemple un *UAV* de demande de mise à jour de valeurs d'attribut ou *SE* (SEnd interaction) d'envoi d'interaction. De même, un fédéré reçoit des événements comme *RAV* lors de la réception de mise à jour de valeurs d'attribut ou *RE* (REceive interaction) quand il reçoit une interaction. Le RTI fournit donc les services de gestion du temps nécessaires à l'émission ou réception de ces messages qui ont une signification temporelle. De plus, ces messages reçus sont *TSO* dans le cadre de fédérés régulés et contraints. L'utilisation de messages *TSO* est la garantie, par le RTI, de la réception de messages datés dans le temps. L'ordre d'envoi des messages n'est pas pris en compte, seule l'arrivée de messages chronologiquement datés importe. Afin de ne pas recevoir de messages antérieurs à sa date logique, la valeur L du *lookahead* est définie pour chaque fédéré. Le RTI empêche tout fédéré d'envoyer un événement avec une date supérieure à son temps logique plus la valeur L du *lookahead*. Sans *lookahead*, la fédération serait bloquée car aucun fédéré ne pourrait recevoir de message du RTI, celui-ci étant bloqué à la date logique des fédérés pour ne pas manquer l'envoi d'un message à la même date. La valeur L du *lookahead* dépend par exemple de la vitesse de réaction du modèle à un événement extérieur ou de l'utilisation d'incrémentations de temps uniformes pour les fédérés.

Enfin, lors de l'exécution d'une simulation, le RTI doit autoriser les fédérés à avancer dans le temps. D'abord un fédéré va faire une requête, *TAR* (Time Advance Request) ou *NER* d'avance de temps. L'utilisation de l'une ou de l'autre de ces requêtes dépend du type de fédéré ; un fédéré périodique va demander une simple avance de temps équivalente au pas de simulation alors qu'un fédéré événementiel va lui demander à se rendre au prochain événement. Le RTI va alors devoir s'assurer qu'aucun message antérieur à la date de demande d'avance de temps ne puisse être délivré à ce fédéré avant d'accepter son avancement à l'aide de l'autorisation *TAG*.

Nous pouvons illustrer ce mécanisme de coordination par un exemple simple de trois ateliers I, II, III. Sur la Figure 2.12, le diagramme Gantt montre neuf OF ordonnancés sur les ateliers I, II et III pour la fabrication des produits a et b . Les OF sont notés xTi avec x le nom du produit et $i=1$ à n (n , le numéro de la tâche). Pour la compréhension de cet exemple, les ateliers ne sont pas perturbés et les durées de transport sont nulles. Les *FLT*, le *wallclock* et la *LBTSS* (Lower Bound on Time Stamp) sont exprimés en unités de temps notées $u.t$. Au temps 0 $u.t$, l'atelier I lance la fabrication de la tâche $aT1$ alors que l'atelier II attend 3 $u.t$ pour lancer $bT1$. La tâche $aT1$ est achevée au temps 12 $u.t$ et l'atelier I attend le retour du produit a au temps 20 $u.t$ pour exécuter la tâche $aT3$. La tâche $aT3$ s'achève au temps 26 $u.t$ et l'atelier attend le temps 33 $u.t$ pour lancer $aT5$. Les tâches $bT1$ et $bT2$ se succèdent sur l'atelier II de 3 $u.t$ à 20 $u.t$ puis $aT4$ est fabriquée entre 26 $u.t$ et 33 $u.t$. L'atelier III produit la tâche $aT2$ entre 12 $u.t$ et 20 $u.t$ puis les tâches $bT3$ et $bT4$ se succèdent de 20 $u.t$ à 40 $u.t$. Les ateliers I, II et III sont associés à trois fédérés

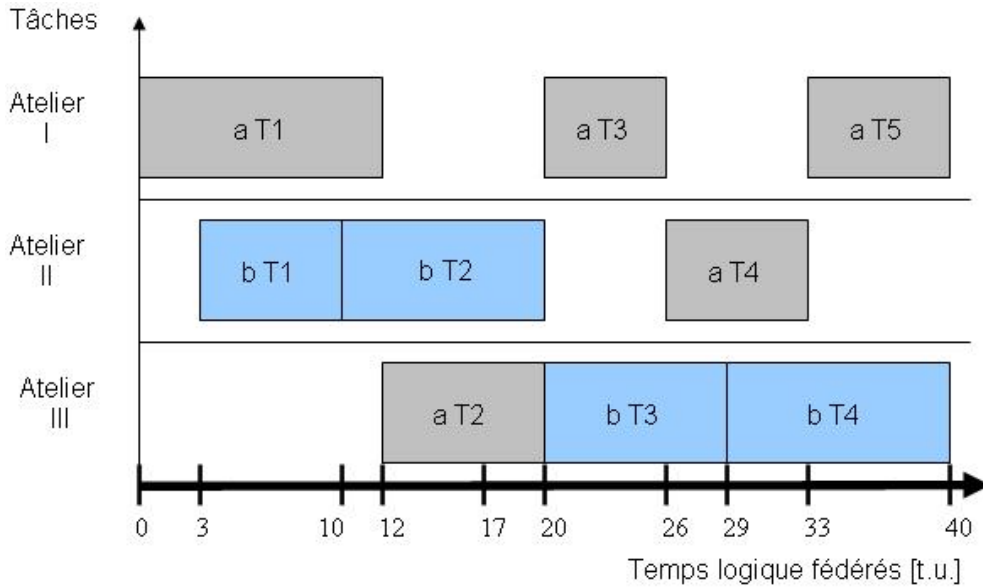


FIG. 2.12 – Gantt des ateliers I, II et III.

évènementiels. Pour l'exemple de la Figure 2.12, les valeurs du *lookahead* sont $L_I = 4$ pour le fédéré I, $L_{II} = 5$ pour le fédéré II, $L_{III} = 6$ pour le fédéré III et $L_w = 5$ pour le *wallclock*. En pratique, L correspond à la durée maximum acceptable d'une perturbation sans conséquence sur l'exécution de la fédération. La *LBTS* est une date correspondant au minimum de la somme des temps logiques de chaque fédérés plus leur avancement possible. Par exemple, si le fédéré I a une date exprimée FLT_I , la *LBTS* ne peut être supérieure à la date $FLT_I + L_I$. Pour la fédération, on considère le temps *wallclock*. En déterminant la date minimale, nous sommes assurés que la *LBTS* correspond au prochain événement daté pour l'ensemble de la fédération. Un fédéré abonné aux informations relatives à cet événement sera donc informé de son état avant de se rendre à prochain événement le concernant. La *LBTS* est exprimée par la relation :

$$LBTS = \min(wallclock + L_w, FLT_I + L_I, FLT_{II} + L_{II}, FLT_{III} + L_{III}) \quad (2.1)$$

La Figure 2.13 donne l'exemple des communications qui ont lieu entre les fédérés I, II et III et le RTI. Les fédérés II et III souscrivent et publient les informations qui concernent les tâches des produits *a* et *b* alors que le fédéré I seulement pour le produit *a*. Au début, les fédérés I, II et III dont une requête *NER* pour synchroniser leur horloge avec les autres fédérés [DMSO, 1996] afin de démarrer la simulation des ateliers. Quand le RTI est assuré que les fédérés ne recevront pas de messages avant la date demandée, le RTI envoie un *TAG* au fédéré qui autorise son avance dans le temps à cette date. Quand le fédéré reçoit un *RAV* ou un *TAG*, des modifications d'ordonnancement, dues à l'exécution, vont parfois nécessiter la publication de la valeur des attributs à la fin du traitement. Au temps *wallclock* 3 u.t, les temps logiques fédérés sont $FLT_I = 5$ u.t, $FLT_{II} = 4$ u.t et $FLT_{III} =$

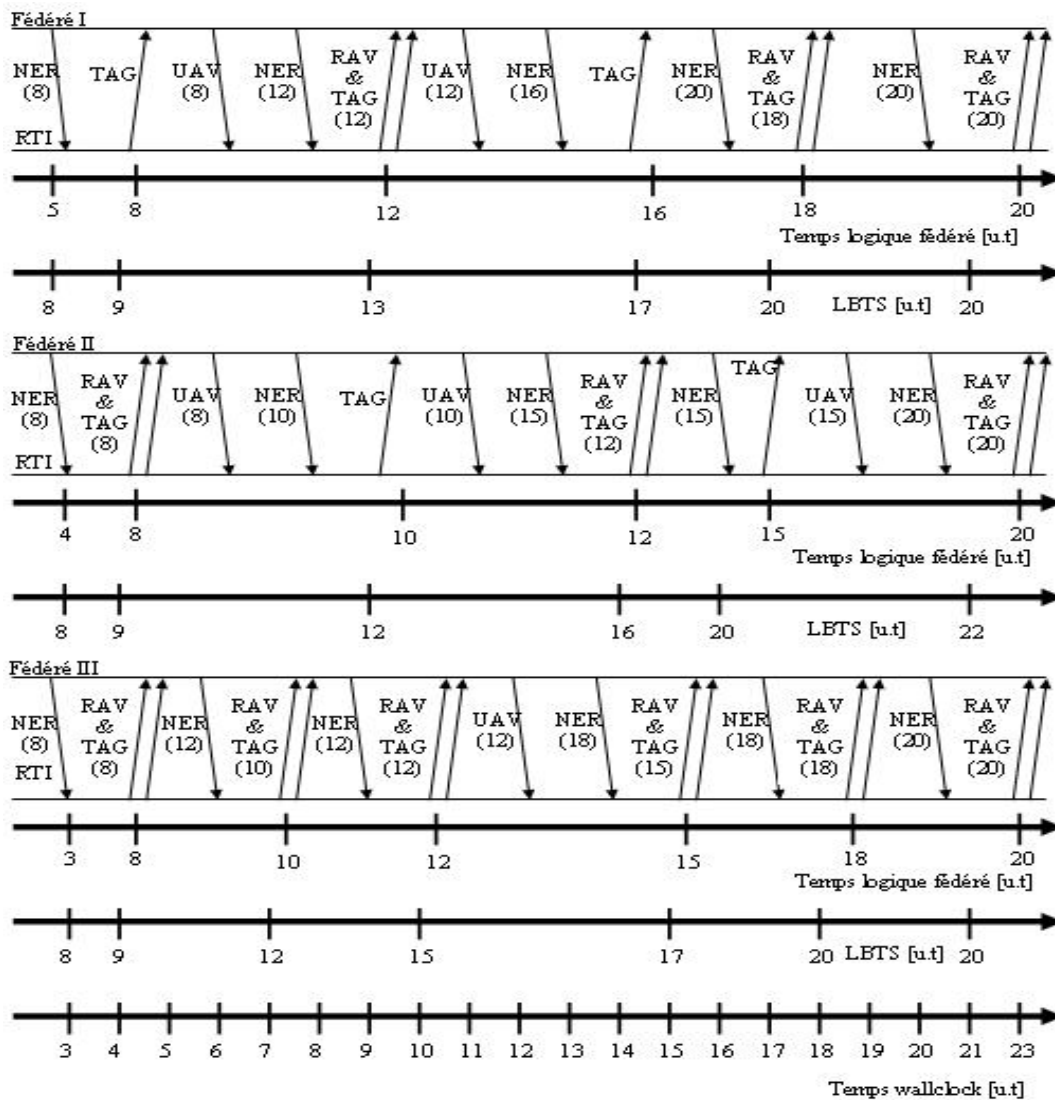


FIG. 2.13 – Communications entre le RTI et les fédérés I, II et III.

3 u.t. une requête NER est envoyé par les trois fédérés vers le RTI qui autorise leur avance respective au temps 8 u.t. A partir de ce moment, les horloges logiques des fédérés vont être incrémentées en fonction de l'algorithme du GL. Quand il n'y a pas de tâche en cours d'exécution dans un atelier, aucun UAV n'est envoyé par le fédéré vers le RTI. Les ateliers I et II poursuivent la production de $aT1$ et $bT1$, les fédérés I et II envoient un UAV au temps 8 u.t. Comme $L_I = 4$ (respectivement $L_{II} = 5$), le fédéré I (respectivement le fédéré II) fait une requête d'avancement au prochain événement NER au temps 12 u.t. (respectivement au temps 10 u.t, car $bT1$ s'achève à cette date). Au temps 12 u.t un message TAG est délivré au fédéré I qui procède à la simulation de toutes les actions antérieures sur l'atelier I. Puis, il renvoie un UAV au RTI. Tant que l'ordonnancement distribué n'a pas été entièrement traité, ce mécanisme est reconduit.

En pratique, ces mécanismes sont automatisés au sein du pRTI, développé par la

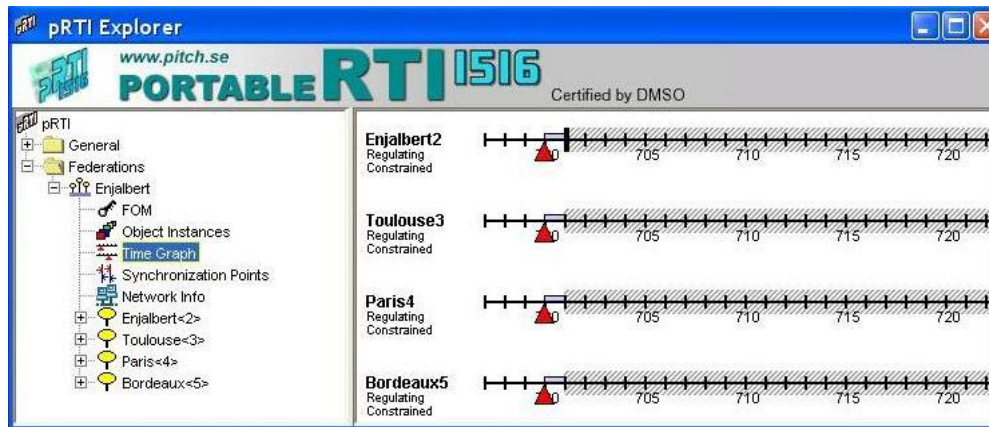


FIG. 2.14 – Gestion du temps avec le pRTI.

société suédoise Pitch. Un exemple de gestion du temps dans le cas de quatre fédérés est présenté sur la Figure 2.14. Sur cet exemple, les quatre fédérés ont leur position (temps logique) symbolisée par le curseur triangulaire rouge. Ils sont synchronisés au temps 700 u.t. Les quatre fédérés ont une valeur L commune égale à un. De ce fait, à chaque pas de simulation les fédérés sont synchronisés. Les zones hachurées au delà du temps 701 u.t ne peuvent être atteintes puisque la somme de L et de leur temps logique égale 701 u.t. Le rectangle gris symbolise l'avance de temps qui a été demandée par les différents fédérés.

2.9 Modélisation des réseaux d'entreprises

L'implantation de la méthode proposée requiert l'utilisation de l'architecture de simulation définie précédemment. Cette architecture met en oeuvre l'encapsulation d'ateliers virtuels. Selon les résultats issus de la simulation, des décisions pourront être prises sur la conduite du système réel. Ainsi, il est indispensable d'évaluer notre méthode en proposant différents scénarios de fonctionnement reposant sur des configurations d'ateliers. Pour la réalisation de la méthode de conduite, nous devons disposer de modèles d'ateliers et de réseaux d'entreprises.

Pour la modélisation, il est nécessaire de procéder progressivement depuis le plus bas niveau jusqu'à une représentation globale du réseau d'entreprises. Pour la conduite d'activités de production, le plus bas niveau modélisé est celui des machines. Les lignes de fabrication viennent ensuite à un niveau supérieur, puis les ateliers et enfin les relations inter-ateliers. Un modèle de référence basé sur les primitives du langage de modélisation du logiciel SIMBA est représenté sur la Figure 2.15. Pour chaque machine, un garage ainsi que deux postes, respectivement de chargement et déchargement, sont associés. Les pièces sont transportées vers la machine par l'intermédiaire de chariots au sein d'un atelier. Sur le poste de déchargement, la pièce est envoyée en fabrication sur la machine alors que

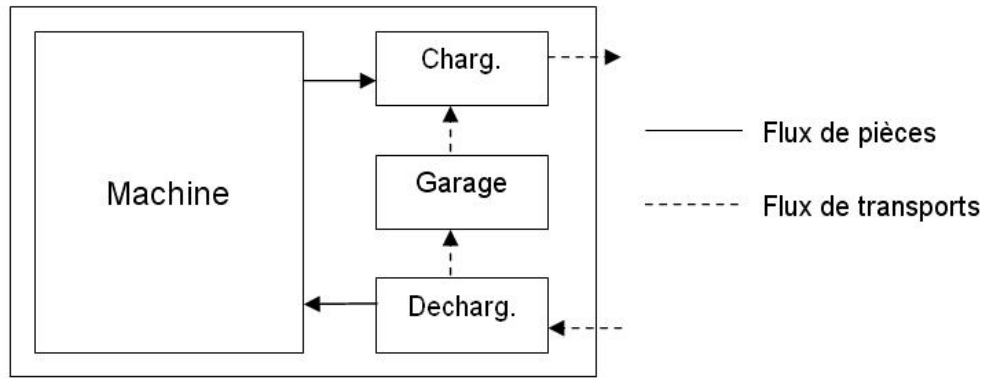


FIG. 2.15 – Définition du modèle de référence d'une machine pour la simulation.

le chariot est tenu à la disposition de l'atelier au garage. Dès la fin de l'opération de fabrication, la pièce et un chariot sont envoyés sur le poste de chargement. Le chariot peut à présent transporter la pièce vers la prochaine destination selon la gamme de fabrication.

Le même type de représentation va être utilisé pour tous les niveaux que nous devrions simuler. En effet, il est possible de considérer que la "machine" représente une chaîne d'assemblage ou un atelier complet. Selon les degrés d'agrégation, une vision seulement partielle sera donnée à l'utilisateur. L'intérêt de cette technique de modélisation repose sur la réutilisation des modèles. Sur la Figure 2.16 est présenté l'exemple de trois ateliers I, II et III possédant chacun trois machines A, B et C. Quatre modèles sont nécessaires à la représentation du réseau. Le modèle 0 est le modèle macroscopique le plus élevé. Il présente les trois sites I, II et III reliés par des pistes. Les modèles I, II et III sont identiques. Ils modélisent chacun le fonctionnement d'un atelier avec trois machines reliés par des pistes. Les quatre modèles ne se différencient que dans la configuration de leur propriété, leur construction est identique. Par un mécanisme d'imbrication des modèles, on peut ainsi conserver une représentation complète et fine de l'atelier en distribuant les simulations.

Pour l'adaptation logistique que nous souhaitons développer, les transports et leur représentation ont une grande importance. Des pistes sont utilisées pour relier les différents sites. Dans le cas de deux sites A et B, deux pistes, une pour aller de A vers B et une de B vers A, sont nécessaires pour relier les sites. Dans le cas de trois sites, trois pistes sont utilisées pour relier A vers B, B vers C et C vers A. Trois autres pistes relient A vers C, C vers B et B vers A. Six pistes sont donc nécessaires dans le cas de trois sites A, B et C. Il est possible d'établir une relation permettant de déterminer le nombre x de pistes nécessaires dans le cas d'une représentation de n sites. A partir de quatre sites, à chaque fois qu'un site est ajouté, le nombre de pistes augmente de la somme des $2n - (i - 1)$ où i varie entre quatre et le nombre n de sites connectés. Nous avons généralisé ce calcul qui

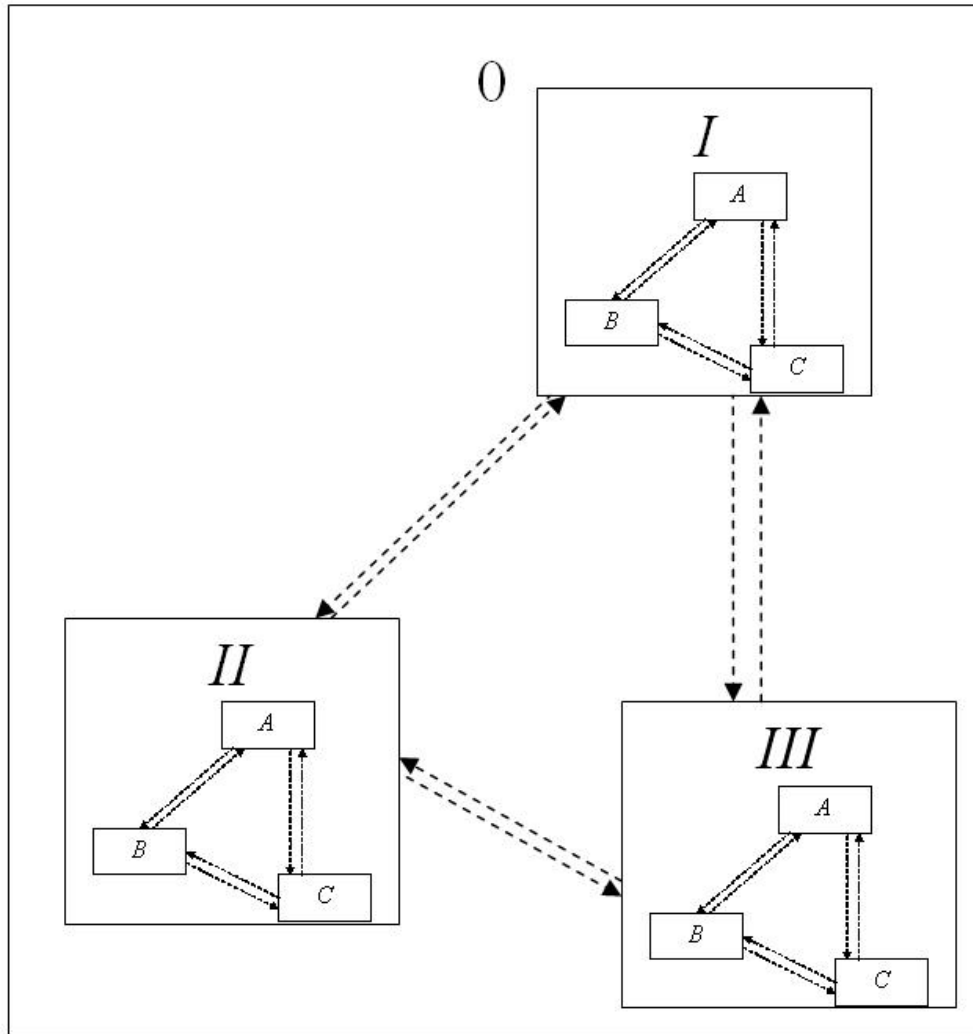


FIG. 2.16 – Modélisation d'un exemple de réseau de trois sites ayant chacun trois machines.

peut s'exprimer par la relation 2.2.

$$x = 2n + 2(n - 3) + \sum_{i=4}^n 2(n - (i - 1)) \quad (2.2)$$

Le nombre de pistes augmente rapidement avec le nombre de sites. L'ordonnement qui prend en compte les différentes possibilités des transports est plus long à réaliser compte tenu de la combinatoire qui augmente. La modélisation, bien que réutilisable, est elle aussi plus lente à réaliser. Ainsi, le nombre de site par modèle doit être limité. En revanche, il est possible de multiplier les modèles. Les modélisations les plus complexes doivent donc être réalisées progressivement, par décompositions successives du niveau agrégé le plus fin souhaité vers le niveau global le plus élevé.

Un routage est effectué pour piloter les déplacements des chariots au sein des simulateurs. Ce routage permet d'indiquer quelle piste un moyen de transport doit emprunter pour se rendre d'un site à un autre ou d'une machine à une autre. Le routage correspond

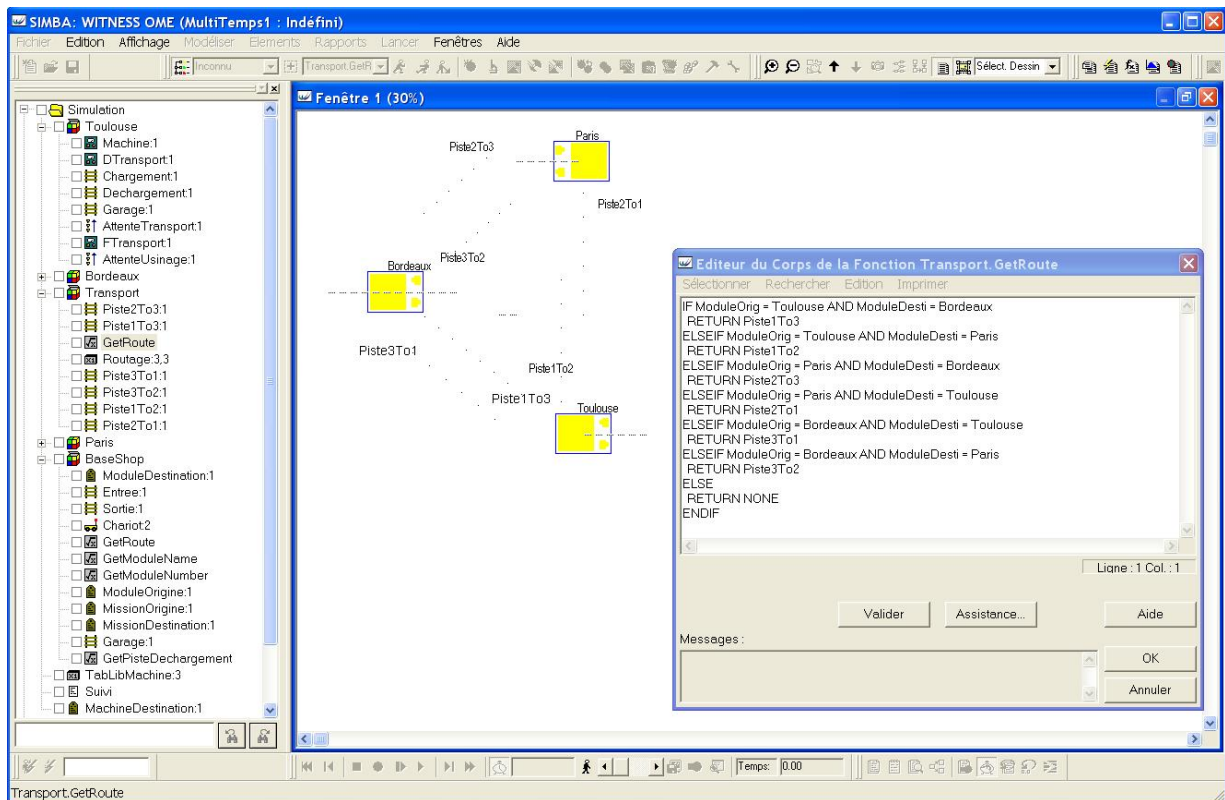


FIG. 2.17 – Modélisation d’un réseau d’entreprises sous SIMBA pour F-R-PAC.

à la définition des trajets prioritaires pour relier les différents sites au sein des modèles. Les temps de transport ainsi que les pistes à emprunter sont définis pour le pilotage automatique des transports. A ce niveau, il est nécessaire de prendre des précautions afin de s’assurer que les temps de déplacement des transports vont être identiques sur le modèle et sur l’ordonnancement. Le pas de temps de simulation ainsi que la vitesse des transports du modèle doivent correspondre.

L’encapsulation de ces modèles SIMBA au sein de l’architecture F-R-PAC est présentée sur la Figure 2.17. Nous constatons dans cet exemple que les trois sites sont connectés via six pistes sur lesquelles peuvent se déplacer des transports. Dans le cadre de transports inter-sites, il s’agit de camions. Pour les cas intra sites, ce sont des chariots. La modélisation de ces moyens de transport est identique sous SIMBA. Les fonctionnalités offertes par SIMBA permettent de représenter de cette façon tous les cas de réseaux d’entreprises envisageable. D’autre part, la fenêtre présentant la notion de routage introduite précédemment permet de visualiser les différentes opportunités offertes pour le déplacement des chariots ou camions.

Le modèle est construit autour de trois sites identiques. Pour chaque modèle, il est nécessaire de recourir à deux modules afin d’organiser la simulation : le module transport et le module baseshop. Le module transport comporte toutes les informations relatives

aux pistes (durées des trajets, nombre de véhicules pouvant circuler en même temps sur la même piste, etc.), au routage des moyens de transport et à l'identification des sites ou machines représentés. Le module *baseshop* contient les informations qui permettent aux moyens de transport de se positionner géographiquement et de savoir vers quelle destination se rendre. Il comporte aussi les informations nécessaires à l'initialisation des simulateurs (nombre de chariots, position initiale des chariot, etc.).

Il est aussi possible de déclarer des pannes pour les différents blocs utilisés. Il est ainsi possible de perturber le fonctionnement de la simulation lors de son exécution. Les pannes peuvent aussi bien porter sur les machines que sur les transports. Des évolutions relatives à la palettisation des pièces ou à une gestion plus évoluée des zones de chargement et déchargement ont été spécifiées pour le développement de futurs modèles mais non implantés car nécessitant d'importantes modifications sur le routage des transports.

2.10 Conclusion

Nous avons proposé une méthode d'évaluation de la conduite de réseaux d'entreprises s'appuyant sur une démarche et un outil distribué de simulation. Dans le cadre des réseaux d'entreprises, trois phases sont nécessaires pour l'évaluation des performances. Après la formalisation des objectifs et des ressources mises en jeu, la première phase se décompose en deux étapes de représentation du système étudié sous forme de modèle informatique et de génération de plans distribués sur un ordonnanceur externe. La deuxième phase consiste en la définition et l'implantation d'indicateurs de suivi de l'évolution de la simulation et d'évaluation des performances. Dans notre étude, afin de s'assurer du respect de l'objectif fourni par le plan de production, les indicateurs mesurent les dates d'entrée et sortie de pièces sur les machines dans l'atelier. Enfin, dans une troisième phase, la simulation de l'exécution des tâches du réseau d'entreprises permet l'évaluation sur la plate-forme F-R-PAC des écarts entre les objectifs fixés par les plans de production initialement prévus et les mesures issues de la simulation.

Nous avons proposé un modèle conceptuel de conduite réactive à partir de travaux précédents. Celui-ci a servi de base à l'implantation d'un outil de simulation reposant sur une architecture distribuée. Cet outil fait coopérer différents logiciels et protocoles afin d'assurer la commande, le suivi, la communication et la synchronisation des opérations de production simulées au sein de l'atelier virtuel qu'il encapsule.

La commande et l'encapsulation des ateliers virtuels ont nécessité la définition d'un gestionnaire dont le rôle est d'assurer la bonne exécution des tâches sur le simulateur. Ce simulateur encapsulé représente une véritable innovation dans le sens où tous les paramètres et modules logiciels, toutes les données permettant une simulation afin de déterminer la faisabilité de plans, sont à présent réellement distribués.

Le suivi est réalisé par l'utilisation de profils de flux que nous proposons pour évaluer

la faisabilité des plans exécutés. Les profils de flux déjà utilisés dans les travaux sur MS-R-PAC ont du être adaptés au suivi de nombreux OF sur différents sites. L'intégration des profils de flux dans F-R-PAC et la gestion d'un plus grand nombre d'OF ont été réalisées.

Une interface de communication a été développée afin d'assurer les échanges entre un ordonnanceur externe et notre outil. L'outil de simulation proposé exclut la fonction d'ordonnancement afin de pouvoir tester, sous réserve de compatibilité des messages informatiques, n'importe quel ordonnancement. L'outil d'ordonnancement retenu R@mises a été utilisé sans que aucune modification n'ait été nécessaire. L'évaluation de n'importe quel plan provenant d'un ordonnanceur distribué est possible sous réserve de compatibilité des informations contenues dans les messages échangés.

Le choix du protocole distribué que nous avons retenu et que nous avons implanté permet de garantir la synchronisation des événements lors de l'exécution de simulations. De plus, la confidentialité des informations est assurée puisqu'il n'est pas nécessaire de centraliser les informations. Seules celles nécessaires à la réalisation des ordonnancements et relatives aux capacités des machines sont mises en commun. La technique de représentation développée permet de modéliser rapidement et précisément tout ou partie d'un réseau d'entreprises et de faire communiquer les différents acteurs.

La gestion des transports intra et inter-sites peut à présent être étudiée grâce à l'utilisation de la méthode et de l'outil que nous avons définis. Notre outil de simulation va permettre de faciliter la prise de décision lorsque la configuration des ateliers et des transports doit être adaptée à d'éventuelles perturbations. Il est ainsi possible d'envisager l'évaluation de performances pour l'accommodation de la conduite d'entreprises multi-sites.

Chapitre 3

Application à l'évaluation de performances pour l'accommodation de la conduite d'entreprises multi-sites

3.1 Introduction

Nous souhaitons montrer comment réaliser l'évaluation de performances pour l'accommodation de la conduite d'entreprises multi-sites. Par performance, nous désignons ici la qualité avec laquelle les objectifs sont satisfaits par un réseau d'entreprises pour un ordonnancement multi-site. Dans des travaux précédents, nous avons successivement évalué, sur des exemples différents, l'influence de perturbations sur un site dans [Enjalbert *et al.* , 2006a] et sur le réseau de transports entre les sites dans [Enjalbert *et al.* , 2006b]. L'évaluation d'un ordonnancement a aussi été réalisée dans le cadre de perturbations multiples dans [Enjalbert *et al.* , 2006c]. Ce chapitre est consacré à la description de la structure des simulateurs expérimentaux mis en oeuvre. Nous décrivons également la conception des fichiers expérimentaux développés, le prototype de test et les résultats obtenus.

Dans la section 3.2, une définition complète et exhaustive du réseau d'entreprises considéré et du projet qu'il doit réaliser est effectuée. Les hypothèses de simulation ainsi que les paramètres des divers modèles sont exprimés et détaillés.

La section 3.3 sert de référence pour notre projet. Les plans à réaliser en fonction des objectifs et des stratégies de gestion sont générés. Les simulations sans perturbation du réseau permettent de déterminer des configurations logistiques recommandées pour la réalisation du projet.

Dans les sections 3.4 et 3.5, des perturbations sur un site et inter-sites sont étudiées. Dans chaque cas et pour chaque stratégie, une bonne configuration peut être retenue

comme solution à la réalisation du projet.

Dans la section 3.6, l'ensemble des perturbations précédemment étudiées sont simulées. Le projet pour le réseau d'entreprises est ainsi réalisé dans le cas le plus défavorable. Les résultats de cette simulation doivent nous permettre d'accommoder la conduite de ces entreprises, de décider quelle stratégie et quelle configuration retenir comme bonne solution au projet. C'est par itérations successives de la démarche proposée dans la méthode du chapitre 2 que l'accommodation de la conduite est réalisée.

Enfin, les performances de l'outil de simulation sont analysées pour déterminer l'efficacité de la méthode proposée dans la section 3.7.

Dans la conclusion, un bilan sur l'utilisation de la méthode proposée et de l'outil développé est dressé et des perspectives de modifications sont avancées.

3.2 Modélisation d'un projet réalisé par un réseau d'entreprises

Un projet didactique est présenté pour montrer la mise en oeuvre de la méthode d'évaluation de performances. Un produit doit être réalisé et un réseau d'entreprises est défini à cet effet. Ainsi, nous pouvons mettre en évidence les mécanismes de détection et d'interprétation des effets de diverses perturbations et définir une meilleure stratégie de conduite correspondant à une configuration de réseau adaptée. La complexité du projet doit être suffisante pour permettre l'évaluation de différentes stratégies logistiques relatives à diverses politiques de gestion de taille de lots en présence de perturbations de différents types. L'étude menée concerne au minimum trois entreprises géographiquement réparties afin d'étudier l'influence de la logistique des transports. L'exemple retenu est celui d'une chaîne de fabrication d'un meuble en kit type "table basse", dont une représentation est donnée sur la Figure 3.1. La table, de type ovoïde, est constituée de 4 pieds, d'un plateau supérieur et d'un plateau inférieur. Le plateau supérieur est en bois sur l'extérieur, en verre au centre. La chute centrale de bois forme le plateau inférieur.

Sept OF sont nécessaires pour réaliser cette table. Ceux-ci sont distribués sur trois sites de production situés à Toulouse, Paris et Bordeaux. Le site de Toulouse fournit le bois pour la préparation des pieds ainsi que des plateaux. Le site de Paris prépare les plateaux en verre. Le site de Bordeaux s'occupe des perçages du bois pour le montage et de la conception du kit pieds et visserie. L'assemblage du plateau supérieur et l'assemblage final du meuble en kit (quatre pieds et visserie, plateau supérieur complet et plateau inférieur) sont aussi effectués à Bordeaux. Les sept gammes de fabrication et les durées de chacune des activités sont résumées sur le Tableau 3.1. Les machines qui composent ces sites sont différentes et connaissent des fonctionnements propres qui montrent la diversité du parc de machines disponibles dans un atelier. L'utilisation du protocole HLA et des



FIG. 3.1 – Modèle de table basse à réaliser.

gammes dynamiques de Ressources pour l'ordonnement permettent aux entreprises en réseau de ne partager que les informations relatives aux capacités des machines et aux activités associées. Seules les informations utiles à la coopération du réseau d'entreprises sont nécessaires, garantissant une plus grande protection des savoir-faire de chaque partenaire. Machines et activités sont décrites sur le Tableau 3.2. Le client de ces entreprises désire prendre possession des quatre tables sur le site de Bordeaux, au temps 3250 minutes après le lancement de la production. Les entreprises concernées prévoient initialement trois stratégies à étudier. La production peut être soit de type unitaire, soit par deux lots de deux pièces ou encore par un lot de quatre pièces. Pour chacune de ces configurations un ordonnancement est prévu.

L'organisation des flux logistiques inter-sites est présentée sur la Figure 3.2. Nous constatons que, compte tenu des gammes de fabrication, les produits issus des sites de Paris et Toulouse doivent être véhiculés vers Bordeaux pour l'assemblage final. Aucune pièce n'est en transit entre les sites de Paris et Toulouse. Cependant, cet axe pourra être utilisé par la suite dans le cas de perturbations. L'influence de la distribution des OF entre ces sites peut être évaluée grâce à la modélisation des moyens de transport réalisée dans cet exemple. La même modélisation sera utilisée et adaptée dans le cas intra-site, les machines remplaçant dans ce cas les sites. (Il est à signaler que toutes les pièces convergent en fin de fabrication vers Bordeaux qui regroupe les activités d'assemblage final.) Les durées de transport inter-sites sont définies dans le Tableau 3.3. Huit camions, transportant chacun une pièce, seront mis en commun par les entreprises pour la réalisation de ce projet. Dans le cadre des différentes stratégies de tailles de lots proposées, la logistique des transports est étudiée. Nous considérerons huit camions pour les quatre tables produites à l'unité.

TAB. 3.1 – Description des ordres de fabrication.

OF	Activité	Durée
OF1 (pieds)	Sciage pieds	10 min
	Polissage pieds	20 min
	Perçage pieds	20 min
	Assemblage kit	10 min
OF2	Sciage plateaux	50 min
OF3 (préparation plateau supérieur)	Polissage plateau supérieur	40 min
	Perçage plateau supérieur	20 min
OF4 (préparation plateau verre)	Sciage verre	70 min
	Polissage verre	40 min
	Gravure verre	80 min
	Teinture verre	60 min
	Préparation collage	10 min
OF5	Collage verre	30 min
OF6 (préparation plateau inférieur)	Polissage plateau inférieur	30 min
	Perçage plateau inférieur	20 min
OF7	Assemblage final	40 min

Dans la mesure où chaque camion ne peut transporter qu'une seule pièce par voyage, il est nécessaire d'établir des flottes de deux et quatre camions respectivement pour les stratégies de taille de lot de deux et quatre pièces. Quatre flottes de deux camions et deux flottes de quatre camions sont donc disponibles suivant la stratégie évaluée. Pour des facilités de compréhension, nous parlerons dans ces cas respectivement de quatre et de deux camions disponibles. Les durées de transport intra-site sont respectivement présentées pour Toulouse dans le Tableau 3.4, pour Paris dans le Tableau 3.5 et pour Bordeaux dans le Tableau 3.6. Deux chariots, transportant chacun une pièce, seront disponibles dans le cadre des transports intra sites pour chacun des partenaires du projet.

Il est possible à ce stade de modéliser les ateliers virtuels. Le site de Bordeaux est présenté sur la Figure 3.3. Ce modèle a servi de base à la réalisation des différentes simulations en fonction des particularités de chaque site. Les trois machines M6, M7 et M8 ne connaissent aucune perturbation et sont modélisées comme défini au chapitre 2. L'atelier de Toulouse est présenté sur la Figure 3.4. Le site de Toulouse est modélisé en réutilisant le site de Bordeaux déjà présenté. Seules les machines M1 et M2, correspondantes à la réalité du site toulousain, sont modélisées. Le site de Paris est modélisé à l'identique de celui de Bordeaux, les spécificités des machines étant évidemment différentes.

Les trois ateliers modélisés ainsi que le modèle inter-sites sont encapsulés dans notre

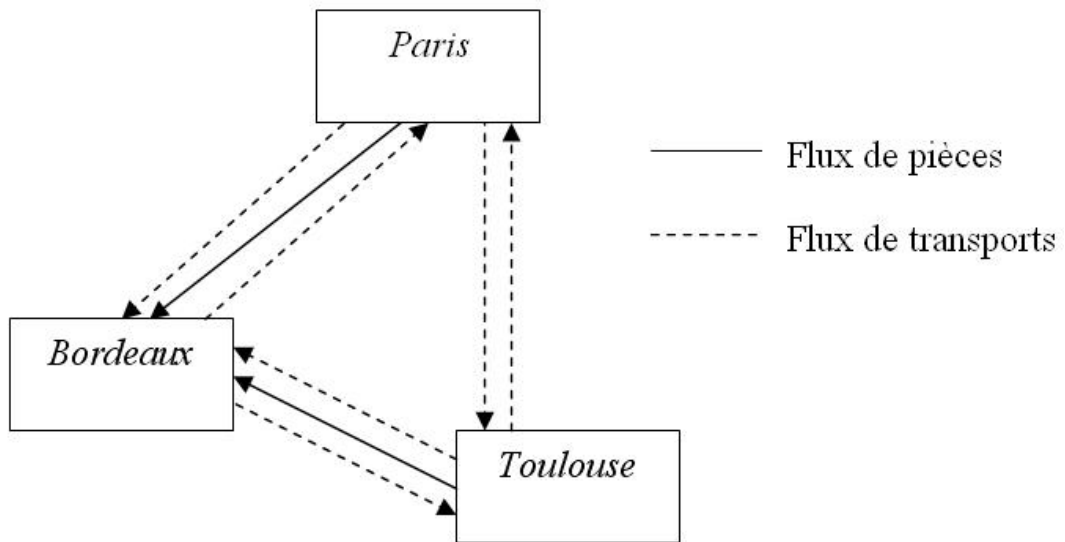


FIG. 3.2 – Organisation des flux logistiques inter-sites.

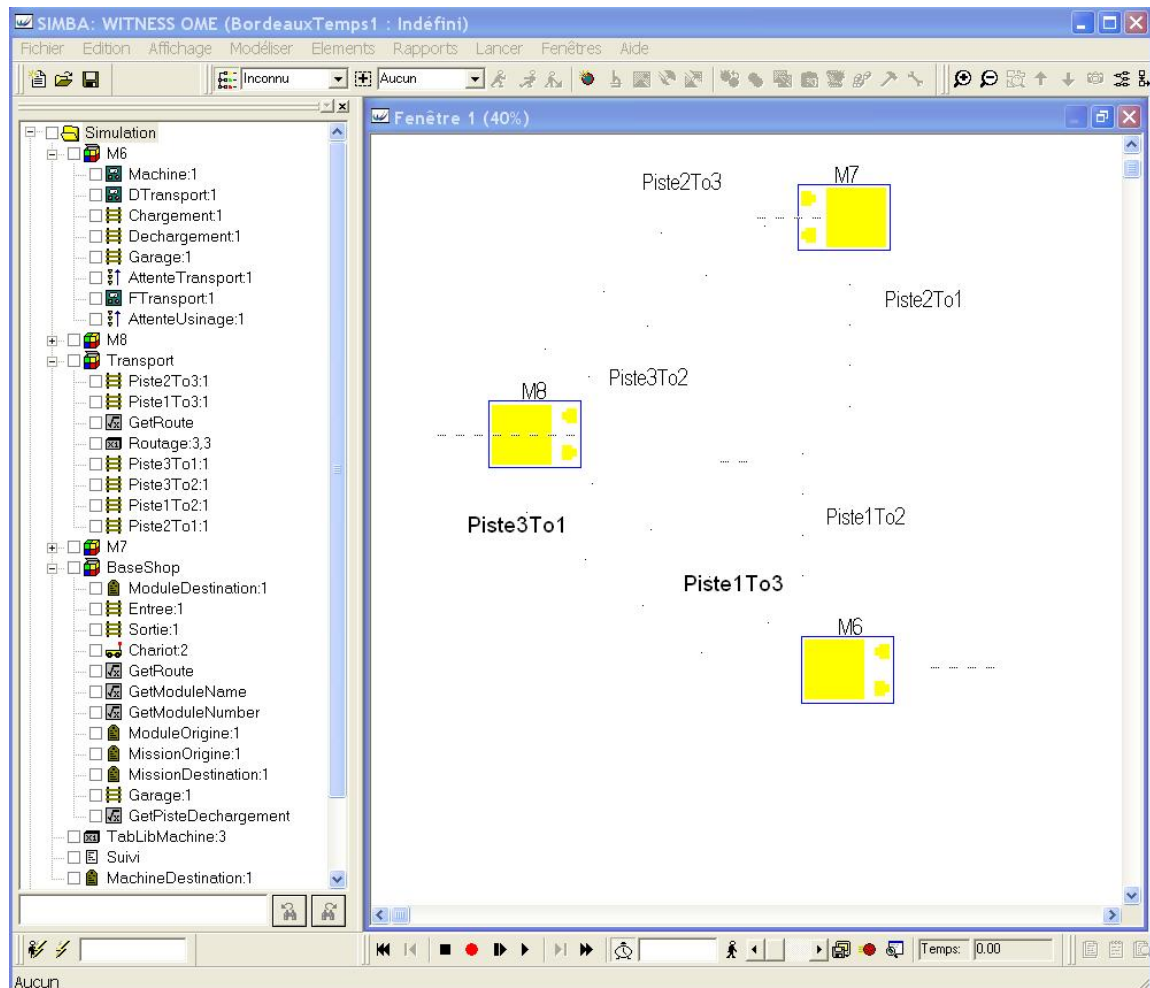


FIG. 3.3 – Modélisation de l'atelier de Bordeaux.

TAB. 3.2 – Machines et activités sur les sites.

Site	Machine	Activité	
Toulouse	M1	Sciage pieds	
		Sciage plateaux	
	M2	Polissage pieds Polissage plateau supérieur Polissage plateau inférieur	
Paris	M3	Sciage verre	
	M4	Polissage verre Teinture verre	
		M5	Gravure verre
Bordeaux	M6	Perçage pieds Perçage plateau supérieur Perçage plateau inférieur	
		M7	Préparation collage Collage
			M8

outil. Les quatre fédérés résultants sont représentés au sein d’une fédération HLA dans le pRTI sur la Figure 3.5. Le site Transport représente le réseau d’entreprises et gère les communications inter-sites alors que les sites de Toulouse, Paris et Bordeaux sont les trois ateliers dont l’évaluation nous intéresse.

Enfin il est nécessaire d’introduire les hypothèses de travail qui permettent de réaliser les simulations. Pour des raisons pratiques liées au temps de simulation, et qui seront détaillées dans la dernière section de ce chapitre sur les performances de l’outil de simulation, nous avons déterminé un pas de temps de simulation et d’ordonnancement égal à dix minutes. Nous recommandons une valeur L du *lookahead* fixée à un, soit 10 minutes simulées, lors des simulations pour tous les fédérés. C’est le temps incompressible

TAB. 3.3 – Durées des transports inter-sites.

De / Vers	Toulouse	Paris	Bordeaux
Toulouse	-	500 min	200 min
Paris	500 min	-	440 min
Bordeaux	200 min	440 min	-

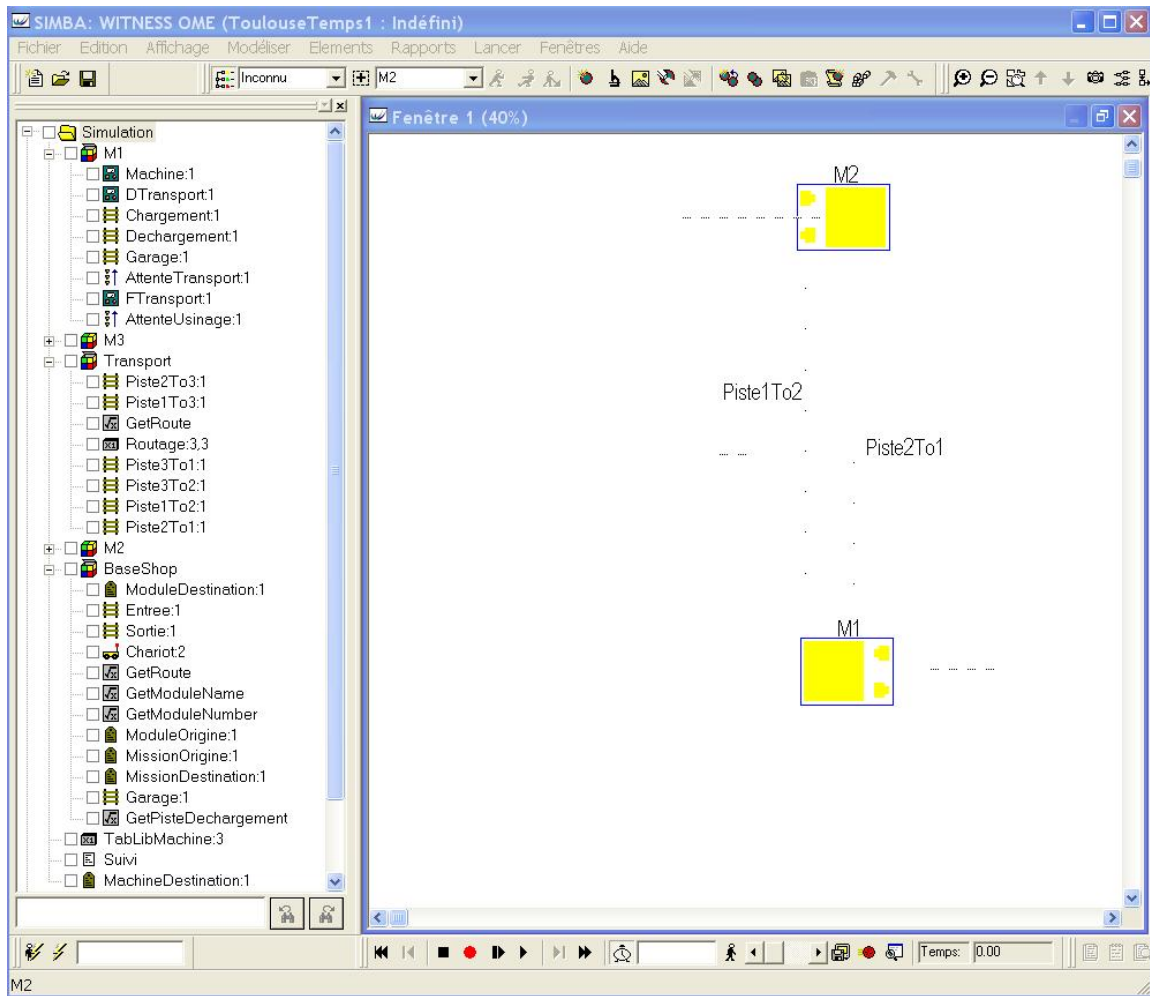


FIG. 3.4 – Modélisation de l’atelier de Toulouse.

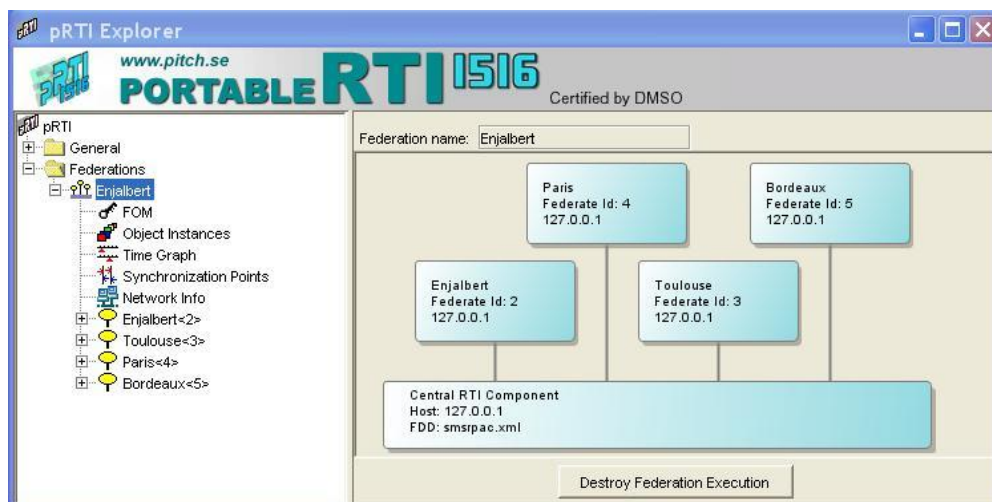


FIG. 3.5 – Exécution d’une fédération dans le pRTI.

TAB. 3.4 – Durées des transports intra-site à Toulouse.

De / Vers	M1	M2
M1	-	20 min
M2	10 min	-

TAB. 3.5 – Durées des transports intra-site à Paris.

De / Vers	M3	M4	M5
M3	-	20 min	10 min
M4	10 min	-	30 min
M5	10 min	30 min	-

de détection et de réaction lors de l'apparition d'une perturbation. La *LBTS* va donc progresser d'incrément en incrément de temps lors des simulations. Toute perturbation peut ainsi être détectée en moins de dix minutes lors de l'exécution des simulations et permettre une conduite réactive des entreprises multi-sites.

Dans un premier temps, nous allons évaluer les possibilités de respecter le délai imparti pour les trois stratégies. Ensuite, nous introduirons une panne sur une machine sur un poste goulot afin de déterminer l'influence de ce type de perturbation. Puis nous effectuerons les mêmes simulations dans le cadre de perturbations inter-sites sur un trajet entre Paris et Bordeaux. Enfin, nous déterminerons la configuration optimale en cas de perturbations multiples pour réaliser cette production.

3.3 Recherche d'une meilleure configuration logistique du réseau d'entreprise

Dans cette première partie, nous cherchons à déterminer quelle configuration de transports intra-site (chariots) et inter-sites (camions) pour le cas défini précédemment permet

TAB. 3.6 – Durées des transports intra-site à Bordeaux.

De / Vers	M6	M7	M8
M6	-	20 min	20 min
M7	10 min	-	30 min
M8	10 min	10 min	-

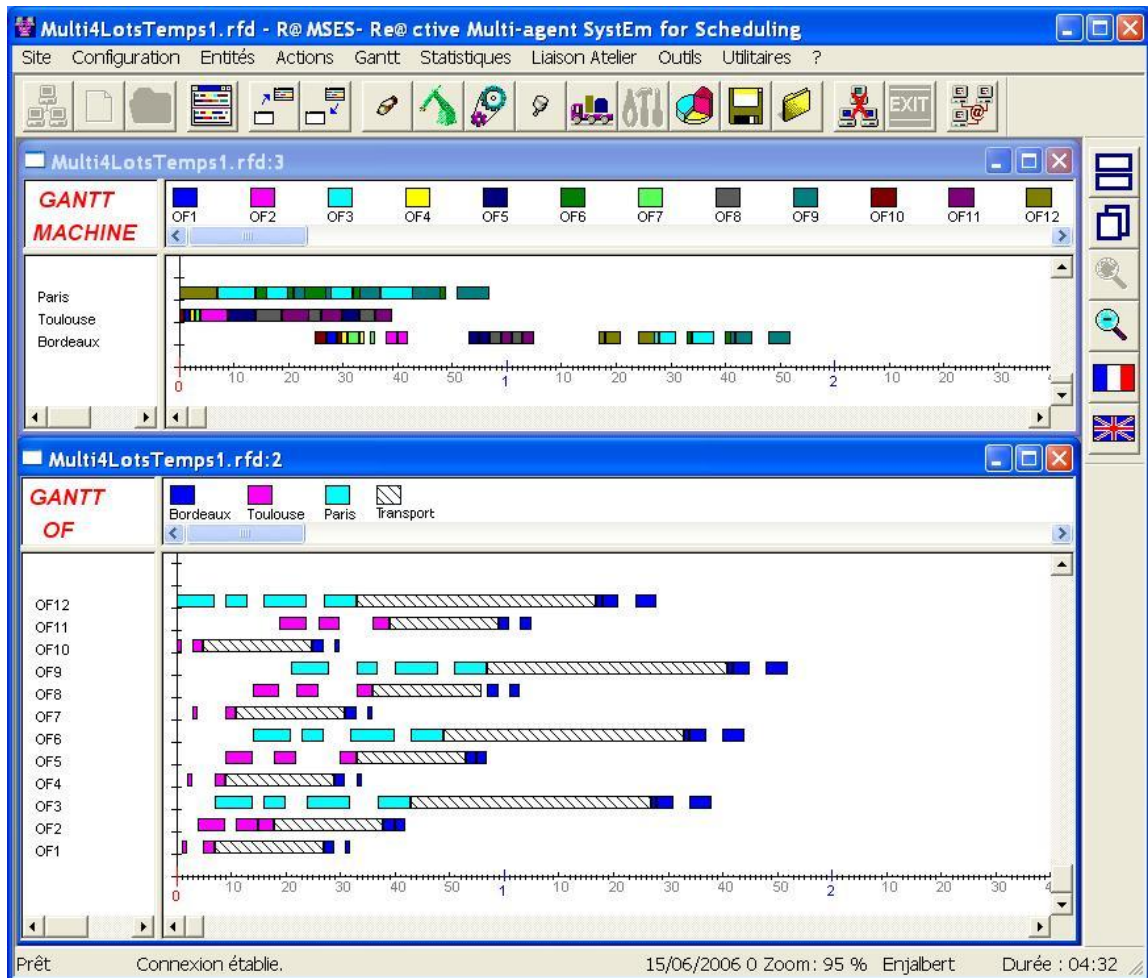


FIG. 3.6 – Diagramme de Gantt prévu pour la production des tables en quatre lots de une pièce.

la meilleure réalisation des ordonnancements prévus. Il est nécessaire de fixer un cadre de simulation avant d'évaluer par la suite, dans la partie 3.4, l'influence de perturbations. Ainsi, pour différentes stratégies prenant en compte les variations de la taille des lots, nous allons fixer le nombre de chariots pour les transports intra-site et de camions pour les transports inter-sites. L'évaluation de cette configuration sera effectuée sans perturbation. Pour un nombre illimité de transports inter-sites, nous allons préalablement fixer le nombre de chariots. Puis nous minimiserons le nombre de camions nécessaires.

A - Configuration intra-site du nombre de chariots

Pour la réalisation de ces quatre tables, les entreprises prévoient tout d'abord une production unitaire, soit quatre lots de une pièce à produire. Selon la démarche de la méthode proposée au chapitre 2, la première étape consiste en la génération de plans distribués. L'ordonnancement prévu est présenté en Figure 3.6. Dans cet ordonnancement effectué avec le logiciel R@mses, les OF représentent des groupes de tâches correspondant

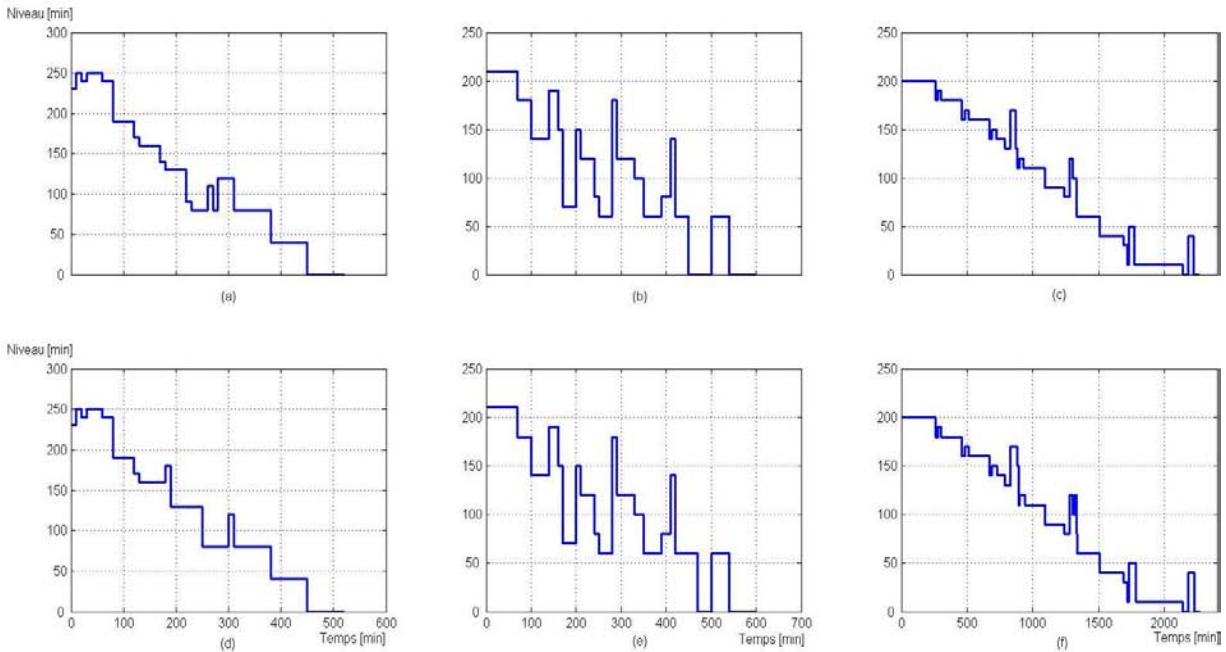


FIG. 3.7 – Profils de flux prévus pour les sites de (a) Toulouse, (b) Paris et (c) Bordeaux, et suivis avec (d) 2 chariots pour Toulouse, (e) 2 chariots pour Paris et (f) 2 chariots pour Bordeaux.

aux gammes de fabrication. Ils regroupent plusieurs OF tels que définis précédemment. Chaque table nécessite trois groupes d'OF pour être fabriquée et douze OF sont donc planifiés. Les temps de transports intra et inter-sites sont pris en compte dans l'ordonnancement et représentés par des zones hachurées. Cette première série de simulation vise à déterminer le nombre de chariots nécessaires pour les trois sites. Les résultats présentés sur la Figure 3.7 montrent la configuration du nombre optimal de chariots pour chaque site. Pour le site de Toulouse, le profil suivi (3.7.d) est similaire au profil prévu (3.7.a) jusqu'à la date 180 min. Des différences apparaissent alors entre ces deux profils. Cependant, la fin des tâches sur le site de Toulouse apparaît dans ces deux cas au temps 520 min lorsque trois chariots sont utilisés. Pour le site de Paris, le profil suivi (3.7.e) et prévu (3.7.b) sont rigoureusement identiques et les opérations s'achèvent à la date 600 min avec deux chariots utilisés. Enfin, tout comme le site de Toulouse, le profil suivi (3.7.f) du site de Bordeaux est identique à celui prévu (3.7.c) jusqu'à la date 1130 min. La fin du traitement s'achève à la même date 2270 min. Une configuration avec trois chariots pour Toulouse et deux chariots pour chacun des sites de Paris et Bordeaux permet donc une réalisation sans retard du plan prévu. Dans la mesure où seulement deux chariots seraient disponibles sur chacun des sites, il est à prévoir un retard lié à l'absence d'un nombre suffisant de chariots.

La stratégie de deux lots de deux pièces est alors envisagée. Un nouvel ordonnancement

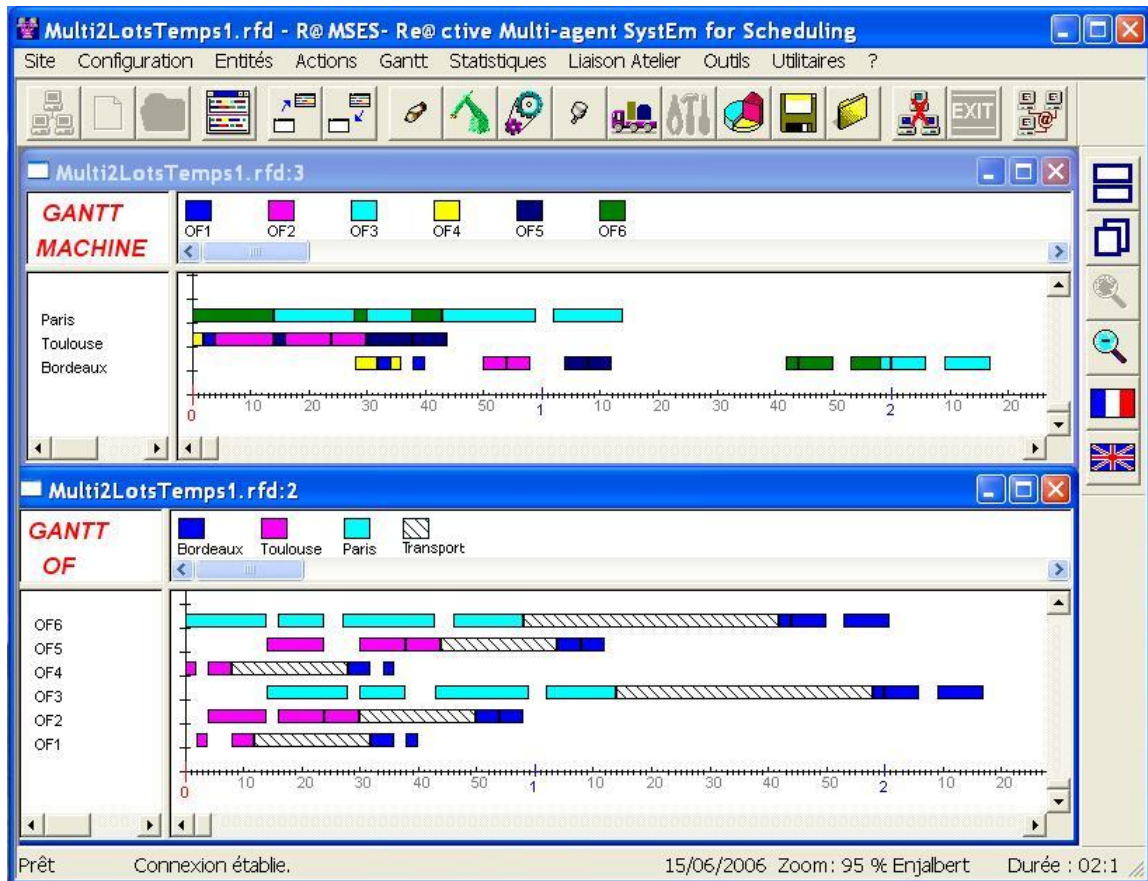


FIG. 3.8 – Diagramme de Gantt prévu pour la production des tables en deux lots de deux pièces.

est nécessaire. Celui-ci est présenté en Figure 3.8. Cet ordonnancement comprend six OF, soit deux fois deux lots de deux pièces. Le nombre de trajets nécessaires est moindre que dans le cas précédent. Cette différence sera évaluée lors de la détermination du nombre optimal de camions. Pour le choix du nombre de chariots, deux séries de simulation ont été nécessaires et comparées au profil prévisionnel sur la Figure 3.9. Une première simulation avec un chariot sur chacun des sites est comparée aux profils prévus. Le profil suivi du site de Toulouse (3.9.d) respecte parfaitement l'ordonnancement prévu (3.9.a) sans aucune différence à signaler. Le traitement des tâches s'achève à la date 460 min. Il en va de même pour Bordeaux dont le profil suivi avec un chariot (3.9.f) est identique au profil prévu (3.9.c) et se termine à la date 1390 min. En revanche, nous pouvons constater un léger retard pour le site de Paris lors de l'utilisation d'un seul chariot. Au temps 590 min, le profil suivi (3.9.e) est au niveau 120 pendant 60 minutes contre 30 min pour le profil prévu (3.9.b). Ce retard lié à une attente pour cause d'indisponibilité de chariot afin d'effectuer un transport au sein du site de Paris provoque la fin des opérations au temps 770 min au lieu des 740 initialement prévues. Une deuxième simulation est alors nécessaire avec un

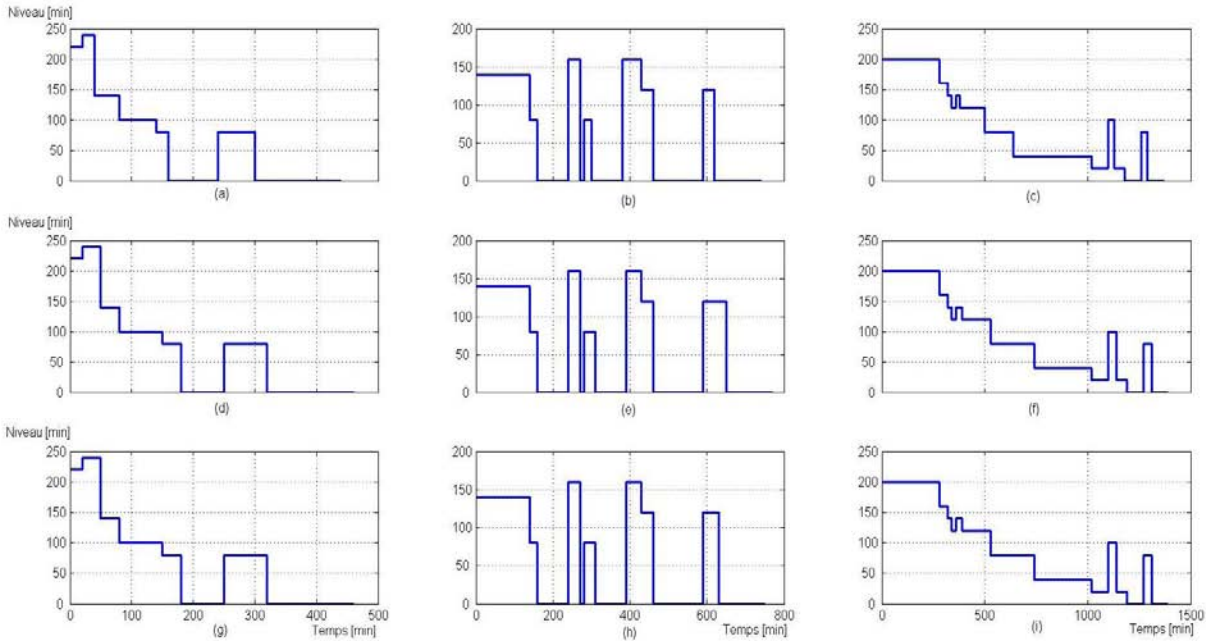


FIG. 3.9 – Profils de flux prévus pour les sites de (a) Toulouse, (b) Paris et (c) Bordeaux, suivis avec 1 chariot pour les sites de (d) Toulouse, (e) Paris et (f) Bordeaux, et suivis (g) avec 1 chariot pour le site de Toulouse, (h) 2 chariots pour Paris et (i) 1 chariot pour Bordeaux.

chariot respectivement pour Toulouse et Bordeaux et deux chariots sur le site de Paris. A nouveau, les flux suivis de Toulouse (3.9.g) et Bordeaux (3.9.i) sont identiques aux prévisions. Pour le site de Paris, le profil suivi (3.9.h) ne rencontre plus le retard détecté dans le cas d'un chariot et les opérations s'achèvent au temps 750 min. Si la présence d'un seul chariot sur le site de Paris, dans cet exemple, ne perturbe pas la fin du traitement des opérations sur le site de Bordeaux, il est néanmoins nécessaire de fixer à deux le nombre de chariots afin de ne pas cumuler des retards lors de l'apparition de perturbations. Une configuration avec un chariot pour les sites de Toulouse et de Bordeaux et deux chariots pour le site de Paris est donc appropriée pour satisfaire les performances retenues.

Nous traitons enfin le cas d'un seul lot de quatre pièces. Un dernier ordonnancement est généré en fonction de cette nouvelle stratégie. Il est présenté en Figure 3.10. Trois OF sont planifiés sur les différents sites pour la fabrication des quatre tables. A nouveau, le nombre de trajets est réduit mais la date de fin des opérations est plus tardive que dans le cas précédent. L'impact de ces stratégies sur la logistique des transports sera évalué une fois fixé le nombre optimal de chariots pour chaque site et pour chaque cas de figure. Les courbes issues de la simulation de cette stratégie sont présentées en Figure 3.11. Avec un chariot pour chaque site, les profils suivis de Paris (3.11.e) et Bordeaux (3.11.f) respectent l'ordonnancement prévu, respectivement (3.11.b) et (3.11.c). Pour le site de Toulouse, une

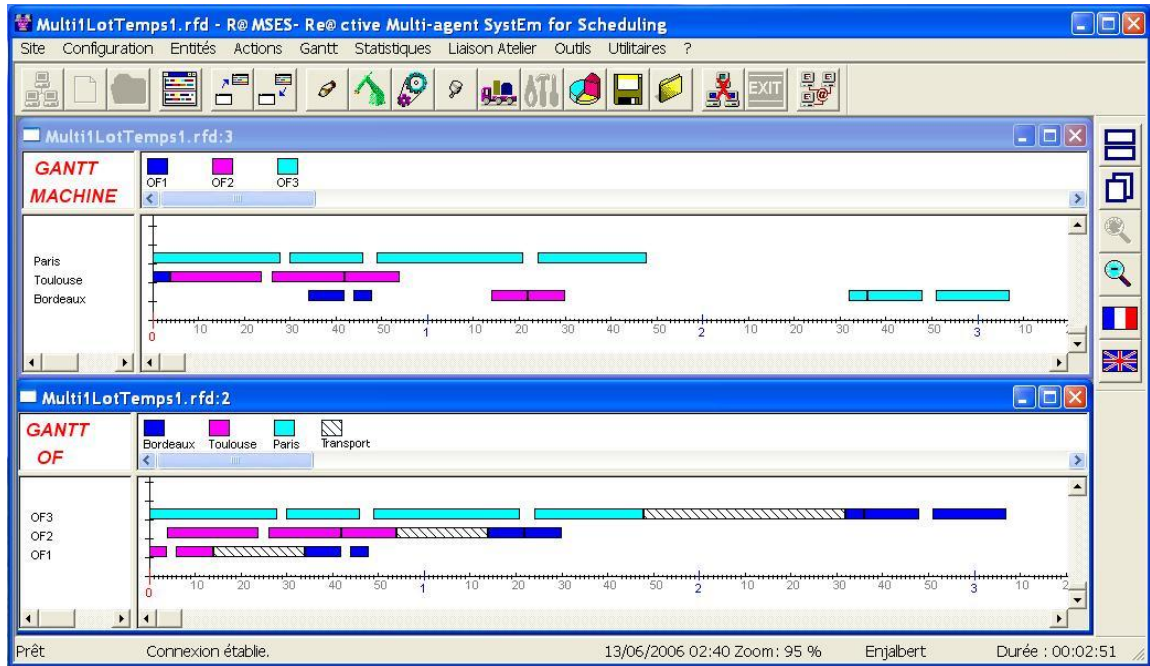


FIG. 3.10 – Diagramme de Gantt prévu pour la production des tables en un lot de quatre pièces.

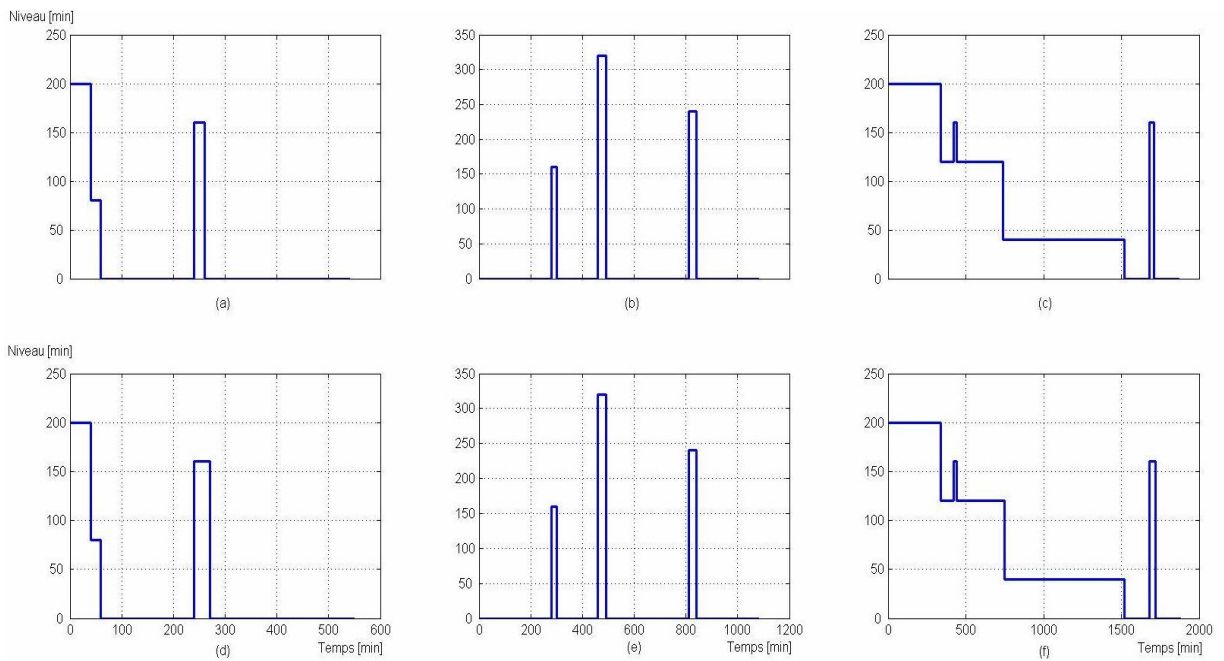


FIG. 3.11 – Profils de flux prévus et suivis avec 1 chariot respectivement pour les sites de (a) et (d) Toulouse, (b) et (e) Paris et (c) et (f) Bordeaux.

légère différence est perceptible au temps 240 min entre le profil suivi (3.11.d) et prévu (3.11.a). Nous considérons donc pour la suite comme référence une fin du traitement des tâches sur le site de Toulouse à la date 550 min. Dans le cadre d'une stratégie à un seul lot, la configuration adaptée ne comporte qu'un chariot pour chacun des trois sites.

Nous avons résumé ces différentes simulations dans le Tableau 3.7 pour la logistique des chariots en fonction des stratégies envisagées.

TAB. 3.7 – Logistique intra-site des chariots recommandée en fonction des stratégies envisagées.

Stratégies	Chariots		
	Toulouse	Paris	Bordeaux
4 lots de 1 pièce	2	2	2
2 lots de 2 pièces	1	2	1
1 lot de 4 pièces	1	1	1

B - Configuration inter-sites du nombre de camions

Une fois les configurations des chariots déterminées, nous allons évaluer le temps de réalisation des différentes stratégies en tenant compte du nombre maximum de camions alloués au projet. Les simulations sont ici effectuées sans perturbation afin de déterminer le nombre optimal de camions nécessaires. Il n'est plus nécessaire de réaliser de nouveaux ordonnancements, ceux présentés précédemment pouvant être réutilisés dans la cadre de chaque stratégie évaluée. Il est désormais possible de simuler immédiatement les différentes configurations.

Pour la stratégie de quatre lots, la configuration recommandée est présentée sur la Figure 3.12. Les huit camions sont utilisés mais cela reste insuffisant pour respecter les délais prévus. Les profils suivis des sites de Toulouse (3.12.d) et Paris (3.12.e) respectent bien leur profil prévisionnel respectif, (3.12.a) et (3.12.b). Pour le site de Bordeaux, au temps 1500 min, le nombre de camions disponibles ainsi que leur localisation géographique vont provoquer des délais d'approvisionnement. Les OF ne peuvent plus être traités dans le temps imparti et la charge des opérations planifiées augmente, entraînant une augmentation du niveau du profil suivi (3.12.f) au temps 1730 min. Ce retard va se propager et la fin des opérations n'intervient qu'à la date 3490 min avec un retard de 1220 min par rapport au profil prévu (3.12.c). Dans le cadre de l'utilisation du nombre de moyens de transports maximum alloués à la réalisation de ce projet, l'objectif fixé par le client est dépassé sans même qu'une perturbation n'intervienne. La stratégie de quatre lots est d'ores et déjà à proscrire.

Pour la stratégie de deux lots, plusieurs simulations ont été effectuées et sont présentées sur la Figure 3.13. Avec un camion, les profils suivis pour les sites de Toulouse (3.13.d) et

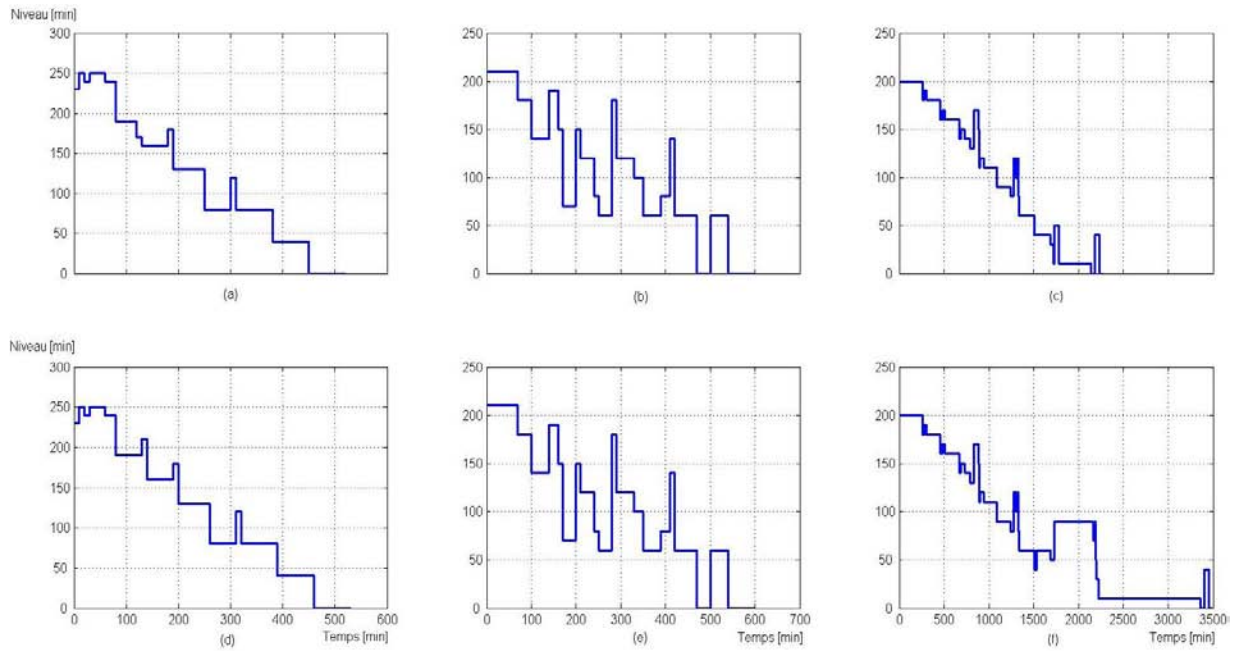


FIG. 3.12 – Profils de flux prévus pour les sites de (a) Toulouse, (b) Paris et (c) Bordeaux, et suivis avec 8 camions et (d) 2 chariots pour Toulouse, (e) 2 chariots pour Paris et (f) 2 chariots pour Bordeaux.

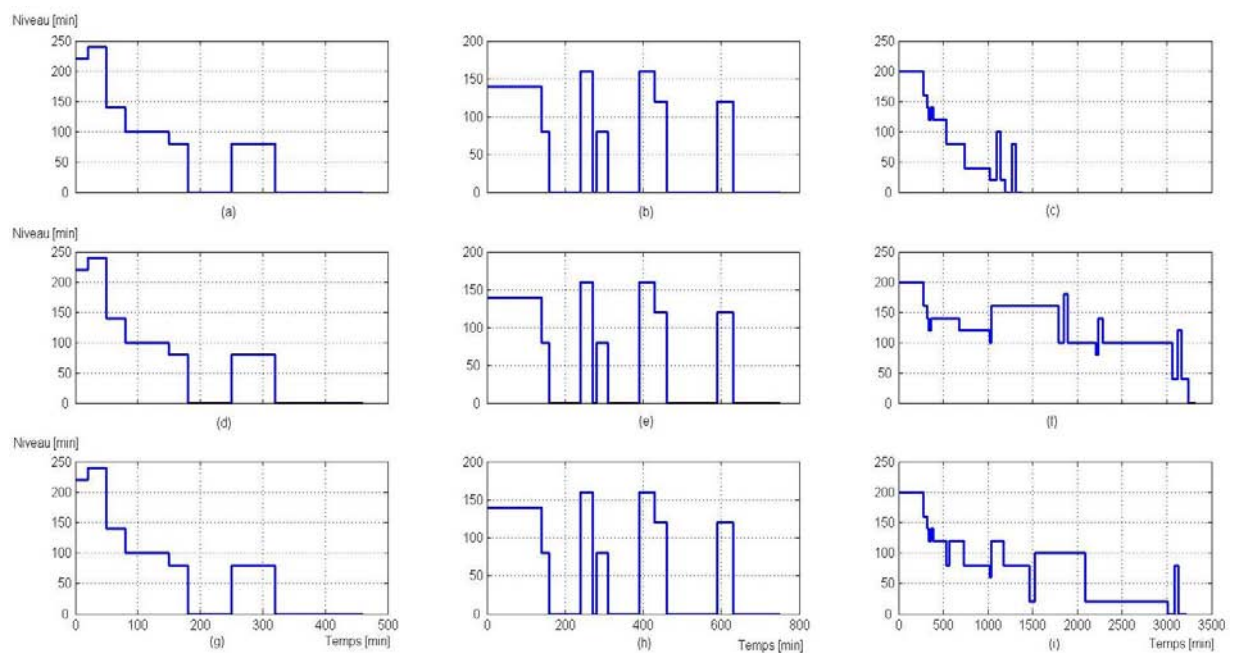


FIG. 3.13 – Profils de flux prévus pour les sites de (a) Toulouse, (b) Paris et (c) Bordeaux, suivis avec 1 puis 2 camions respectivement (d) et (g) avec 1 chariot pour Toulouse, (e) et (h) avec 2 chariots pour Paris, et (f) et (i) avec 1 chariot pour Bordeaux.

Paris (3.13.e) respectent l’ordonnancement prévu et représenté par (3.13.a) et (3.13.b). En revanche, le profil suivi du site de Bordeaux (3.13.f) connaît un retard et les tâches s’achèvent à la date 3320 min. Cette valeur ne satisfait pas aux exigences du client et un deuxième camion doit être ajouté à la configuration. Là encore, les profils suivis des sites de Toulouse (3.13.g) et Paris (3.13.h) respectent l’ordonnancement prévu. Le retard du site de Bordeaux est moins important et les tâches s’achèvent à la date 3210 min sur le profil suivi (3.13.i). L’organisation logistique qui satisfait le délai imposé par le client avec le moins de camions possible est donc déterminée.

Cependant, nous n’utilisons pas les quatre camions qui sont à notre disposition. Il est par conséquent nécessaire de simuler l’ensemble des cas de figures afin de déterminer si une meilleure configuration, qui évidemment sera plus coûteuse en ressources de transport, est envisageable. Les sites de Toulouse et Paris ne connaissant aucune évolution de leur profils respectifs lors de leur exécution, seuls les résultats du site de Bordeaux sont présentés sur la Figure 3.14. Les profils prévu (3.14.a), suivi avec un camion (3.14.b) et suivi avec

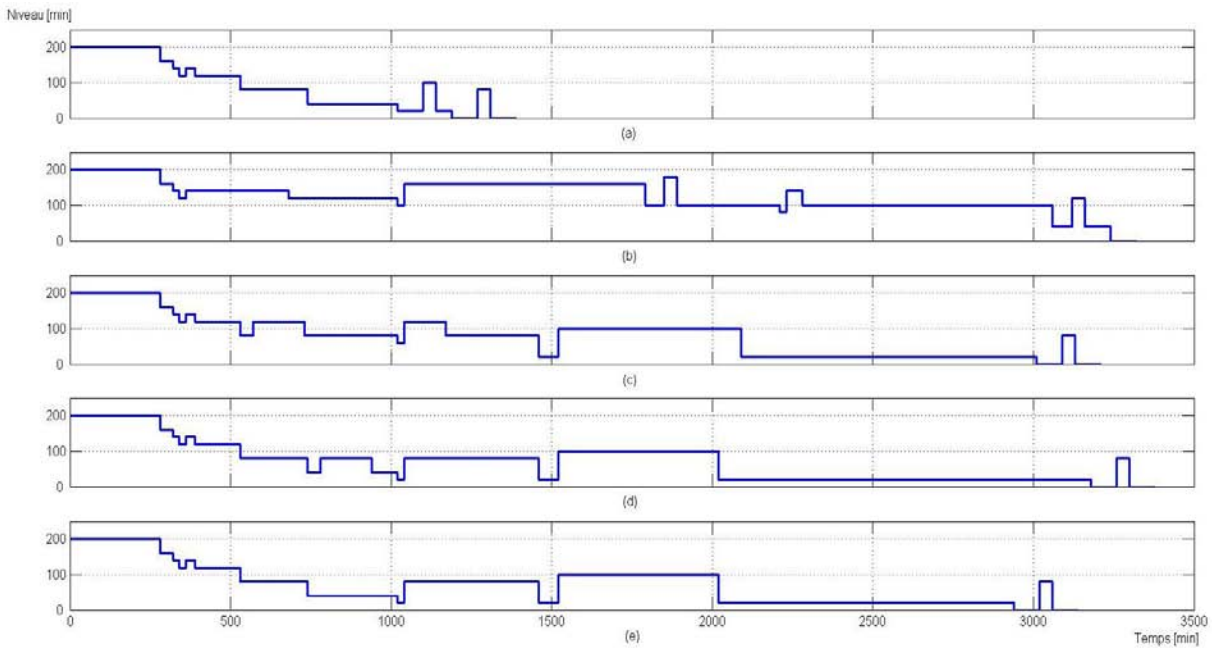


FIG. 3.14 – Profils de flux prévus pour le sites de (a) Bordeaux, (b) suivis avec 1 camion, (c) 2 camions, (d) 3 camions et (e) 4 camions.

deux camions (3.14.c) ont déjà été présentés et discutés précédemment. Les résultats des simulations avec trois puis quatre camions sont ici introduits. Le profil suivi du site de Bordeaux lors de l’utilisation de trois puis quatre camions (3.14.d) est identique au cas de deux camions jusqu’aux alentours du temps 2000 min. La charge connaît une baisse plus rapide de son niveau à 20 min mais l’utilisation plus rapide de certains camions pour effectuer des transports va introduire de nouveaux retards. Dans cet exemple, la configuration à

trois camions apparaît moins avantageuse que celle à deux camions. Ceci s'explique du fait que le premier camion disponible choisi par le simulateur n'est pas forcément celui qui se rendra le plus vite sur le site qui a fait une demande de transport. Un camion peut déjà être en route dans la configuration à deux camions et exécutera donc plus rapidement le transport. La fin du traitement des opérations n'intervient qu'à la date 3380 min, soit la plus mauvaise configuration jusqu'à présent évaluée. Le profil suivi dans le cas de quatre camions (3.14.e) est identique au profil avec trois camions jusqu'à la date 1940 min. Mais, à cet instant, de plus nombreuses opérations de transport ont déjà été prises en charge et l'exécution de la simulation s'achève au temps 3140 min. Le cas de quatre camions respecte le délai imposé par le client et permet d'abaisser le délai total de production par rapport au profil suivi avec deux camions (3.14.c). Les configurations avec deux et quatre camions peuvent donc être retenues, seuls des critères économiques non traités ici peuvent permettre de choisir la meilleure configuration.

Pour finir, nous simulons la stratégie à un seul lot. Celle-ci est supposée la moins intéressante en terme de délai selon l'ordonnancement prévu puisque devant s'achever à la date 1880 min contre 1390 min dans le cas de la stratégie à deux lots. Les résultats sont présentés sur la Figure 3.15. Deux configurations sont possibles avec un et deux camions.

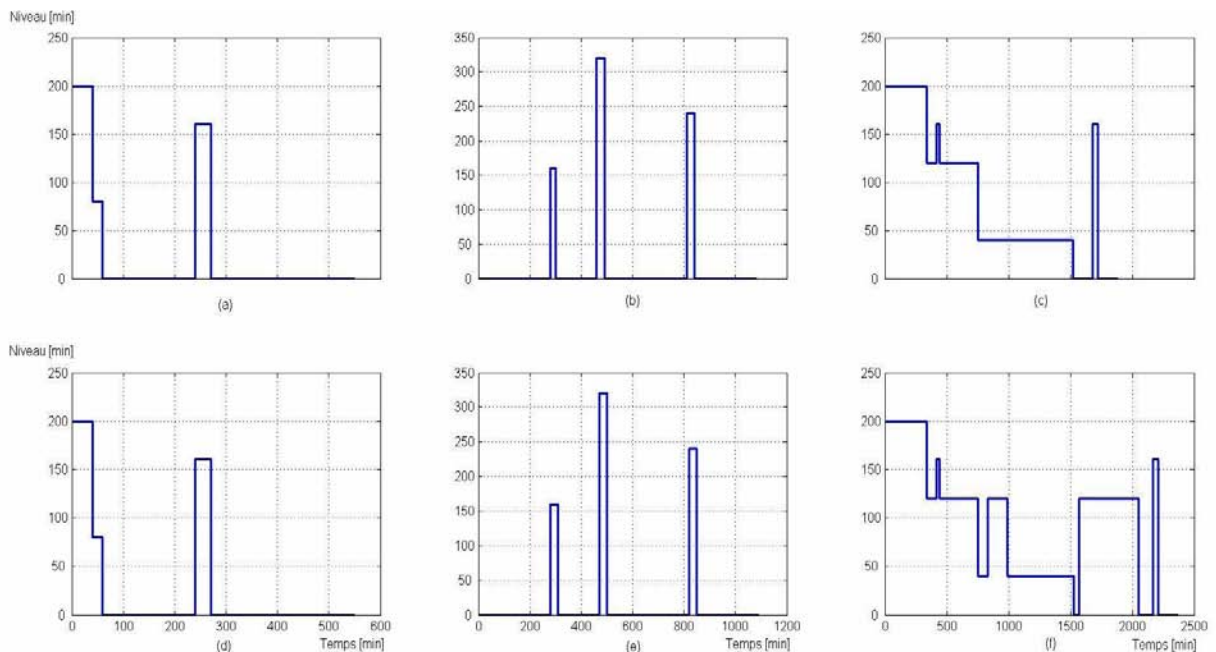


FIG. 3.15 – Profils de flux prévus pour les sites de (a) Toulouse, (b) Paris et (c) Bordeaux, et suivis avec 1 camion et (d) 1 chariot pour Toulouse, (e) 1 chariot pour Paris et (f) 1 chariot pour Bordeaux.

Cependant, celles-ci donnent des résultats identiques, c'est pourquoi nous choisissons de ne présenter ici que la supposée plus économique en terme de nombre de moyens de transport

engagés. Avec un camion, les profils suivis pour les sites de Toulouse (3.15.d) et Paris (3.15.e) respectent les profils prévus (3.15.a) et (3.15.b). Pour Bordeaux, le profil suivi (3.15.f) varie du profil prévu (3.15.c) au temps 750 min. Ce retard est dû au chevauchement de trois opérations de transports qui ne peuvent être traitées quelque soit la configuration de camion retenue. Compte tenu de la non disponibilité de suffisamment de camions, les opérations s’achèvent à la date 2370 min, ce qui représente pour l’instant le meilleur délai et qui satisfait bien entendu les exigences du client.

Nous avons résumé ces différentes simulations dans le Tableau 3.8 pour la logistique des camions en fonction des stratégies envisagées.

TAB. 3.8 – Logistique inter-sites des camions recommandée en fonction des stratégies envisagées.

Stratégies	Chariots			Camions
	Toulouse	Paris	Bordeaux	
2 lots de 2 pièces	1	2	1	2
1 lot de 4 pièces	1	1	1	1

3.4 Evaluation du plan distribué lors de perturbations d’un site

Maintenant que les configurations fixant le nombre de chariots et de camions ont été déterminées pour chacune des stratégies envisagées, nous pouvons évaluer la faisabilité des plans multi-sites en présence de perturbations. Les perturbations que nous allons introduire dans nos simulations concernent aussi bien les machines que les transports. Ainsi, nous pouvons successivement évaluer leurs conséquences sur un site ou sur le réseau complet.

Nous choisissons tout d’abord de perturber l’exécution des tâches dans un atelier sur une machine placée sur le chemin critique de production. Le chemin critique est un chemin reliant des opérations de production ; si une de ces opérations était en retard, l’ensemble du projet se trouverait retardé. Sur la Figure 3.16, l’atelier de Paris est représenté avec ses trois machines M3, M4 et M5. Une règle concernant les pannes a été ajoutée sur la machine M4. La machine concerne les opérations de polissage et de teinture du verre et se trouve sur le chemin critique. En cas de panne, il faut 1.000 pas de temps de simulation SIMBA correspondant à 200 minutes simulées, soit 20 incréments de temps, pour que M4 reviennent à un fonctionnement normal. La panne doit intervenir une fois en début de cycle lors de la première utilisation de la machine. La stratégie non perturbée avec quatre

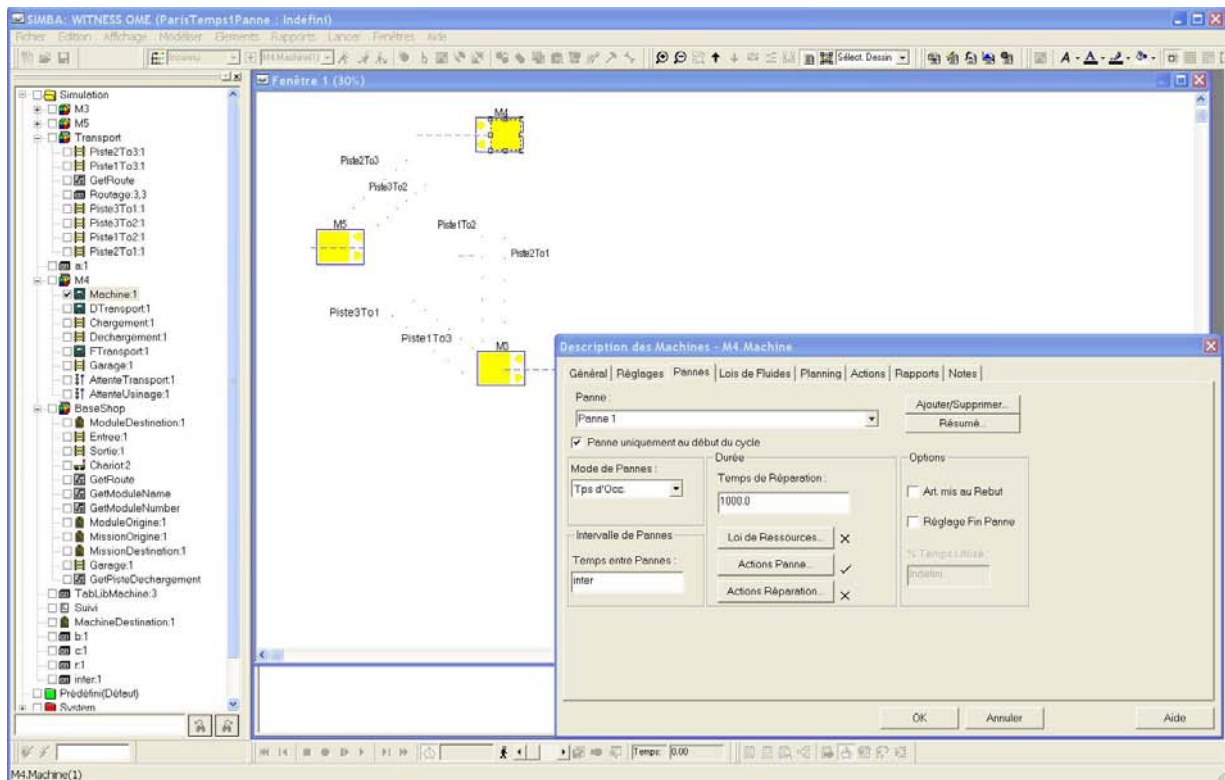


FIG. 3.16 – Modélisation de l’atelier de Paris.

lots ayant été écartée, nous nous concentrerons ici sur l’influence de cette perturbation sur les deux stratégies restantes, *i.e.* le traitement par lots de deux ou quatre pièces.

La stratégie de deux lots de deux pièces est simulée donnant les courbes présentées sur la Figure 3.17. Le site de Toulouse ne connaît pas de perturbations et les profils suivis avec un (3.17.d) ou deux (3.17.g) camions demeurent identiques au profil prévu (3.17.a). Les opérations de production se terminent au temps 460 min. En revanche, un retard apparaît sur le site de Paris consécutif à la panne de la machine M4. Les profils suivis avec un (3.17.e) et deux (3.17.h) transports sont identiques mais les tâches s’achèvent à la date 950 min au lieu des 750 min du profil prévu (3.17.b). De plus nous constatons que le profil est modifié compte tenu des opérations qui se cumulent sans être lancées sur les machines à cause de la panne. Ce retard a des incidences variables sur le site de Bordeaux. Dans le cas d’un camion, la lecture du profil suivi (3.17.f) permet de déterminer la fin du traitement des opérations à la date 3440 min, soit après le délai fixé par le client. Dans le cas de deux camions (3.17.i), le profil suivi révèle que ce délai est ramené à 3090 min. Ce résultat peut paraître surprenant puisque meilleur que celui sans perturbation (3210 min). En effet, lorsqu’une demande est faite aux camions, leur disponibilité et leur localisation géographique initiale peuvent engendrer des différences notables. Dans cet exemple, la panne décale l’appel dans le temps d’une ressource camion qui du coup est disponible plus rapidement et entraîne au final une diminution du temps de traitement de l’ensemble

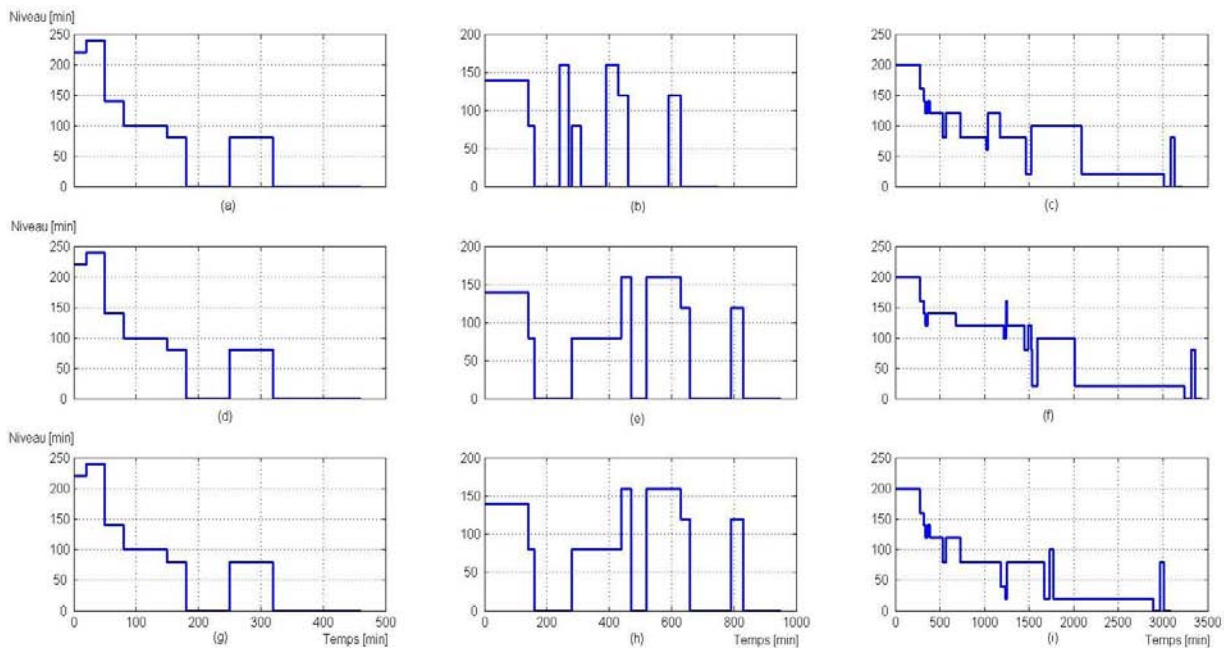


FIG. 3.17 – Profils de flux prévus pour les sites de (a) Toulouse, (b) Paris et (c) Bordeaux, suivis avec 1 puis 2 camions respectivement (d) et (g) avec 1 chariot pour Toulouse, (e) et (h) avec 2 chariots pour Paris, et (f) et (i) avec 1 chariot pour Bordeaux.

des tâches.

Au final, seul le site de Bordeaux connaît des variations en fonction du nombre de transports utilisés. Les sites de Toulouse et Paris connaissent eux un fonctionnement identique et ceci indifféremment du nombre de camions engagés. Sur la Figure 3.18 sont présentés les résultats des simulations pour le site de Bordeaux avec l'ensemble des possibilités de logistique inter-sites. Le profil prévu (3.18.a) et les profils suivis avec un (3.18.b) et deux (3.18.c) camions ont déjà été présentés. Les profils suivis avec trois (3.18.d) et quatre (3.18.e) camions montrent une amélioration notable du délai global pour les mêmes raisons de disponibilité de moyens de transport qu'indiquées précédemment. Le traitement des tâches s'achève respectivement aux dates 2810 min et 2830 min. Dans le profil suivi pour trois camions (3.18.d), la charge connaît une hausse entre les dates 2130 et 2630 min et le niveau atteint les 60 min. Plus d'opérations sont traitées en parallèle et le délai global est ainsi amélioré.

Dans un deuxième temps, la stratégie avec un lot unique de quatre pièces est présentée sur la Figure 3.19. Les résultats étant identiques avec un ou deux camions, seule la solution la plus économique avec le minimum de transports est montrée ici. Le profil suivi pour le site de Toulouse (3.19.d) connaît un fonctionnement identique au profil prévu (3.19.a). Pour Paris, le profil suivi (3.19.e) est similaire en terme de niveau mais est décalé compte tenu de la perturbation. Les opérations s'achèvent à la date 1290 min au lieu des 1090

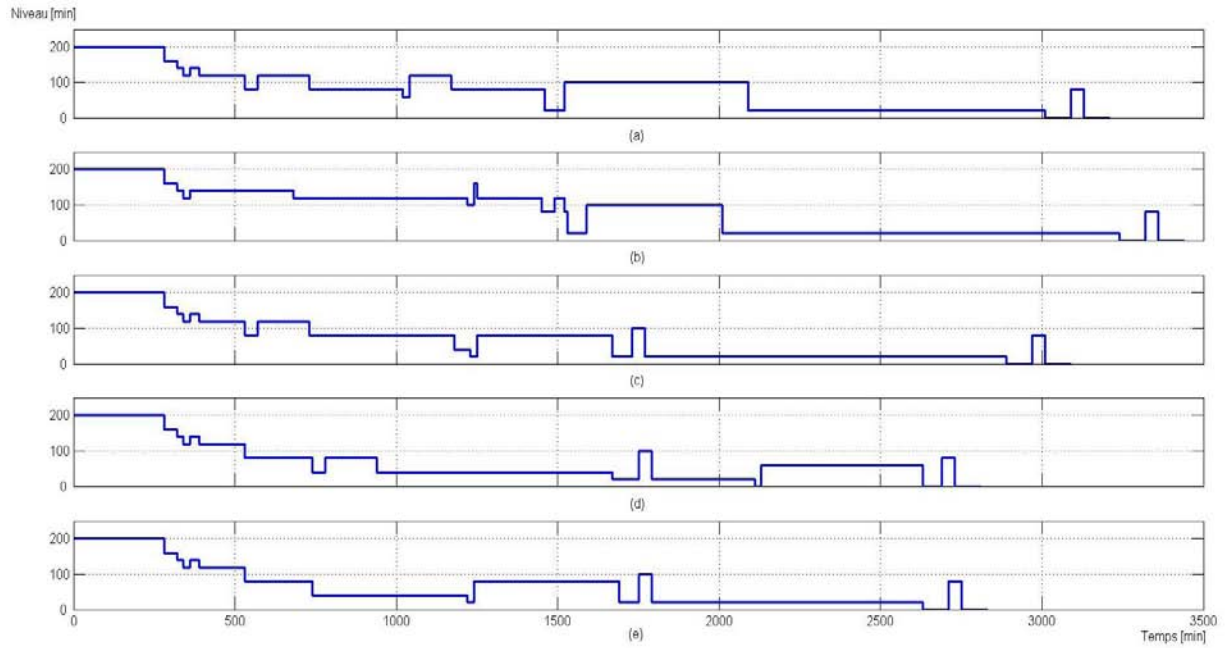


FIG. 3.18 – Profils de flux prévus pour le sites de Bordeaux (a), suivis avec 1 camion (b), 2 camions (c), 3 camions (d) et 4 camions (e).

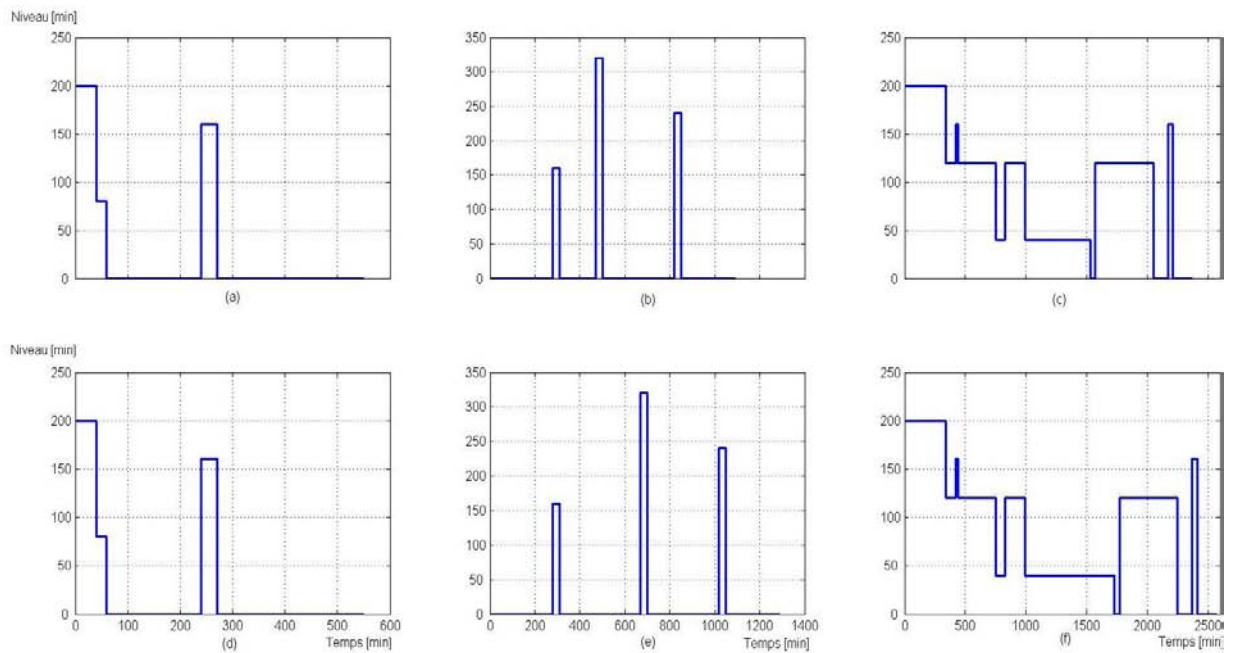


FIG. 3.19 – Profils de flux prévus pour les sites de (a) Toulouse, (b) Paris et (c) Bordeaux, et suivis avec 1 camion et (d) 1 chariot pour Toulouse, (e) 1 chariot pour Paris et (f) 1 chariot pour Bordeaux.

min initialement prévues sur le profil (3.19.b). Enfin, le site de Bordeaux voit la fin du traitement de l'ensemble des opérations reportées. La fin des opérations, planifiée à la date 2370 min sur le profil prévu (3.19.c), n'intervient qu'à la date 2570 min sur le profil suivi (3.19.f).

Les résultats de la stratégie à deux lots avec deux camions ainsi que ceux de la stratégie à un lot avec un camion respectent les exigences du client et peuvent être retenus comme solutions acceptables.

3.5 Evaluation du plan distribué en présence de perturbations du réseau

Nous allons, à présent, perturber l'exécution des tâches entre les ateliers. Nous considérerons que pour des raisons de sécurité, des tests sont en cours sur les camions. Ces tests ne pouvant être effectués que sur le site de Toulouse, tous les camions, à vide comme en charge, devront transiter par le site de Toulouse lors de leurs déplacements. La durée de ces tests étant négligeable, ceux-ci ne seront pas représentés sur l'ordonnancement. L'axe Paris - Bordeaux est désormais impraticable et l'axe Toulouse - Bordeaux est à présent utilisé. Nous nous concentrerons ici sur l'influence de cette perturbation sur les deux stratégies par lots de deux ou quatre pièces.

La modélisation du site Transport, site correspondant aux transports inter-sites, est présentée sur la Figure 3.20. Les trois ateliers y sont représentés ainsi que les routes que peuvent emprunter les camions. Ce modèle correspond au modèle dégradé en présence de perturbation entre les sites de Paris et Bordeaux.

La stratégie de deux lots de deux pièces est simulée et les courbes résultantes sont présentées sur la Figure 3.21.

Pour cette stratégie, plusieurs simulations vont être nécessaires en fonction du nombre de camions alloués à l'exécution des plans. La première simulation est menée avec un camion. Les profils suivis des sites de Toulouse (3.21.d) et Paris (3.21.e) sont conformes aux résultats attendus sur les profils prévus respectifs (3.21.a) et (3.21.b). En revanche, le site de Bordeaux connaît de fortes perturbations. Au temps 360 min, le profil suivi (3.21.f) connaît un niveau de 140 min de charge d'ateliers jusqu'à la date 680 min contre 390 min sur le profil prévu (3.21.c). Ce décalage va s'accroître au fur et à mesure du nombre de requêtes croissantes du nombre de camions nécessaires pour réaliser les transports prévus. Les trajets, plus longs à accomplir, vont provoquer un décalage temporel de toutes les tâches. Les opérations planifiées pour un niveau de charge égal à 120 min devant se dérouler du temps 390 min à 530 min vont en réalité durer du temps 680 min à 1830 min. Les tâches s'accumulant induisent des variations dans le niveau du profil suivi pour une fin d'exécution prévue à la date 3840 min. Cette solution ne satisfait pas les

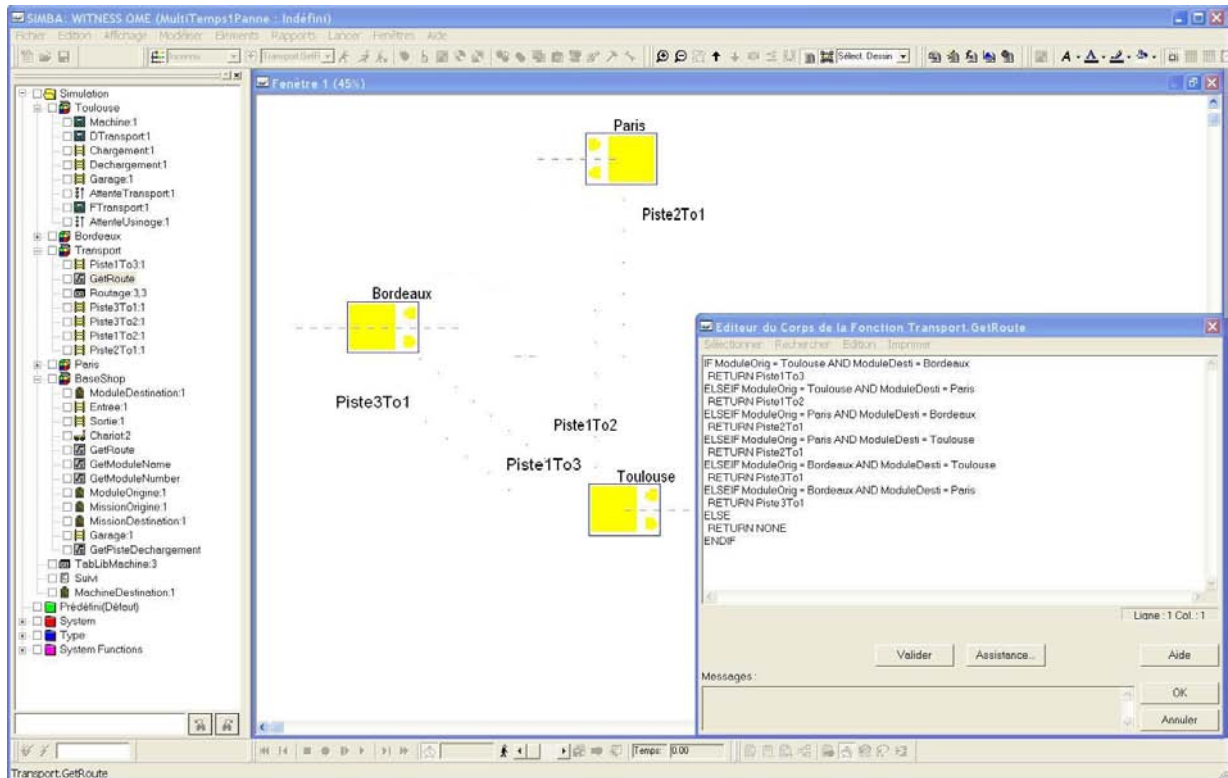


FIG. 3.20 – Modélisation inter-site du cas étudié dans le cadre d’une perturbation des transports.

exigences du client et les simulations avec deux, trois puis quatre camions doivent être faites. Les résultats étant parfaitement identiques lors de ces trois simulations, seule la plus avantageuse économiquement, la solution avec deux camions, est présentée ici. Une fois de plus, les profils suivis pour les sites de Toulouse (3.21.g) et de Paris (3.21.h) respectent les profils prévus. Pour le site de Bordeaux, le profil suivi (3.21.i) ne connaît pas de variation du niveau de charge par rapport aux prévisions. Cependant, là encore, les opérations sont décalées compte tenu des retards induits par les perturbations du trafic. A partir du temps 530 min, les opérations pour être lancées en production nécessitent l’arrivée des pièces en cours de transport et les niveaux s’étalent donc dans le temps. Les opérations s’achèvent à la date 3070 min, ce qui satisfait les conditions de recevabilité du client.

Dans un deuxième temps, la stratégie avec un lot unique de quatre pièces est présentée sur la Figure 3.22. Les résultats étant identiques avec un ou deux camions, seule la solution la plus économique avec le minimum de transports est montrée ici. Le profil suivi pour le site de Toulouse (3.22.d) connaît un fonctionnement identique au profil prévu (3.22.a). De même, le profil suivi de Paris (3.22.e) est identique au profil prévu (3.22.b). Sur le site de Bordeaux, le retard du camion va entraîner un lissage de la charge. Le profil suivi (3.22.f) est similaire au profil prévu (3.22.c) jusqu’au temps 1000 min. Le niveau de charge est alors de 40 min et va demeurer constant jusqu’au lancement des activités de

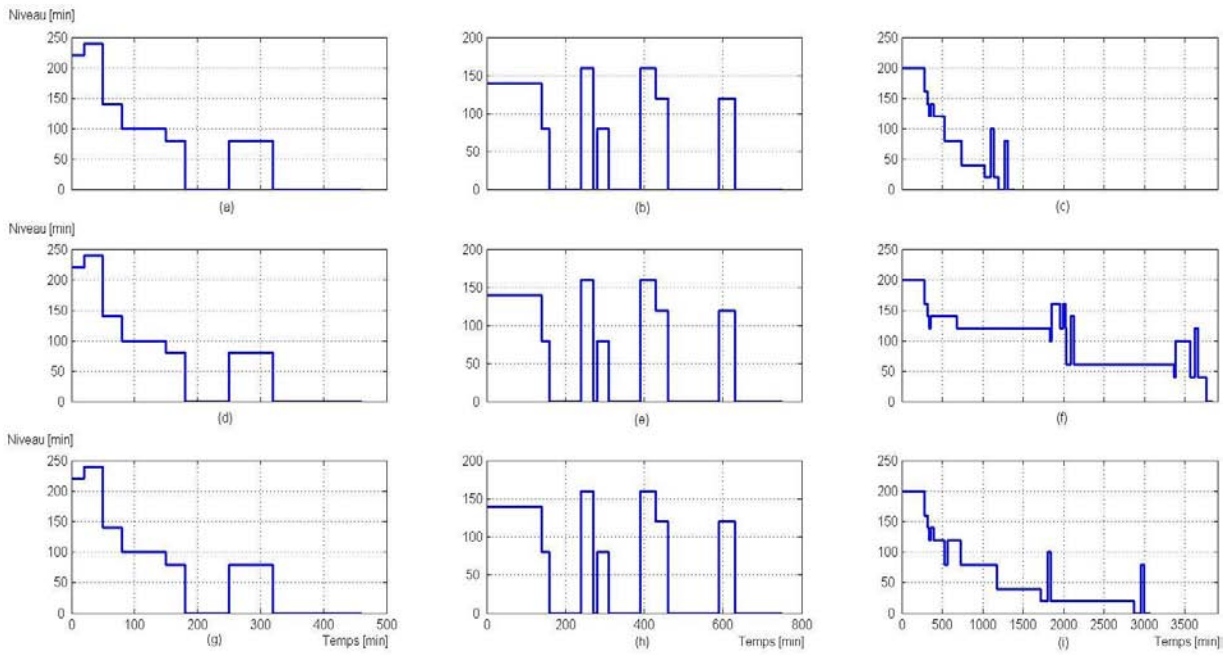


FIG. 3.21 – Profils de flux prévus pour les sites de (a) Toulouse, (b) Paris et (c) Bordeaux, suivis avec 1 puis 2 camions respectivement (d) et (g) avec 1 chariot pour Toulouse, (e) et (h) avec 2 chariots pour Paris, et (f) et (i) avec 1 chariot pour Bordeaux.

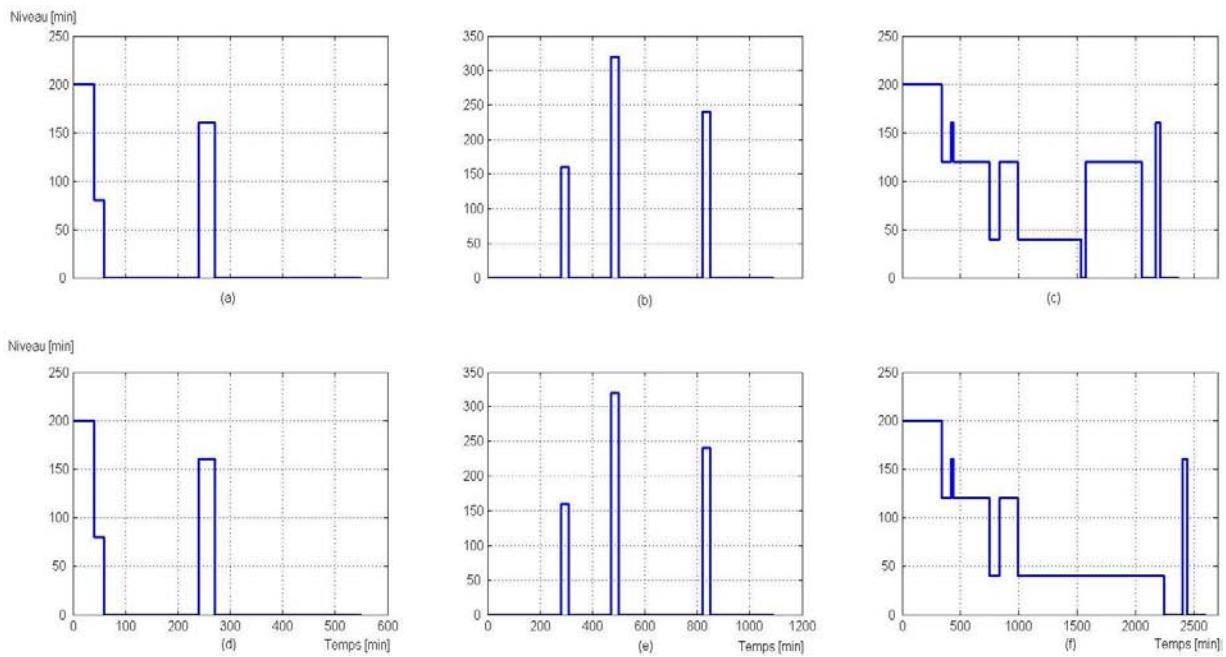


FIG. 3.22 – Profils de flux prévus pour les sites de (a) Toulouse, (b) Paris et (c) Bordeaux, et suivis avec 1 camion et (d) 1 chariot pour Toulouse, (e) 1 chariot pour Paris et (f) 1 chariot pour Bordeaux.

production suivantes lors de la livraison des pièces à Bordeaux à la date 2240 min. Les opérations précédentes étant achevées sur le site de Bordeaux à cette date, l'arrivée des pièces ne provoque pas d'augmentation du niveau de charge pour l'atelier. Les opérations sont achevées à la date 2600 min.

Comme lors de l'évaluation dans le cadre de perturbations intra-site, les résultats de la stratégie à deux lots avec deux camions ainsi que ceux de la stratégie à un lot avec un camion respectent les exigences du client et peuvent être retenus comme solutions acceptables.

3.6 Vers une accommodation des plans multi-sites en présence de perturbations multiples

Nous devons à présent déterminer quelle serait la meilleure solution en cas de perturbations multiples sur le réseau, *i.e* aussi bien des perturbations du trafic que des pannes machines. Nous reproduisons les deux types de perturbations vues précédemment. A ce niveau final de simulation, une décision doit être prise avant la réalisation de cette production sur le système physique. L'ensemble des résultats et des configurations déjà évaluées doivent permettre de déterminer une stratégie performante et sa configuration associée.

La Figure 3.23 recense les courbes des profils de flux relatifs à la stratégie à deux lots de deux pièces. Nous simulons tout d'abord le cas étudié dans le cadre de l'utilisation d'un camion. Le profil suivi du site de Toulouse (3.23.d) est identique au profil prévu (3.23.a). Pour Paris, l'apparition d'une panne sur la machine M4 au temps 280 min lors de sa première utilisation va provoquer un décalage des opérations sur le profil suivi (3.23.e) de 200 min. Le niveau stagne ainsi avec une charge de 80 min jusqu'à la date 470 min. Les tâches s'achèvent à la date 950 min au lieu des 750 min initiales du profil prévu (3.23.b). Ce retard, cumulé aux perturbations du réseau routier, vont considérablement modifier le profil suivi du site de Bordeaux (3.23.f). Le niveau de charge de l'atelier va demeurer proche du profil prévu (3.23.c) bien que quelques modifications fassent leur apparition en raison des décalages des débuts et fins d'OF. Le traitement de l'ensemble des tâches s'achève à la date 4050 min, soit bien après le délai imparti par le client. La configuration avec deux camions a été ensuite simulée ainsi qu'avec trois puis quatre camions. Les résultats étant parfaitement identiques dans ces trois cas, seul le cas économiquement le plus intéressant, celui avec deux camions, a été retenu. Les profils suivis des sites de Toulouse (3.23.g) et Paris (3.23.h) sont identiques aux profils suivis dans le cas d'un camion. Seule la panne de la machine M4 sur le site Paris provoque un décalage des tâches. En revanche, le profil suivi du site de Bordeaux (3.23.i) voit son niveau de charge diminuer plus rapidement du fait de la plus grande présence de camions pour transporter les pièces et lancer les tâches plus rapidement dans l'atelier. Le pic de charge de niveau

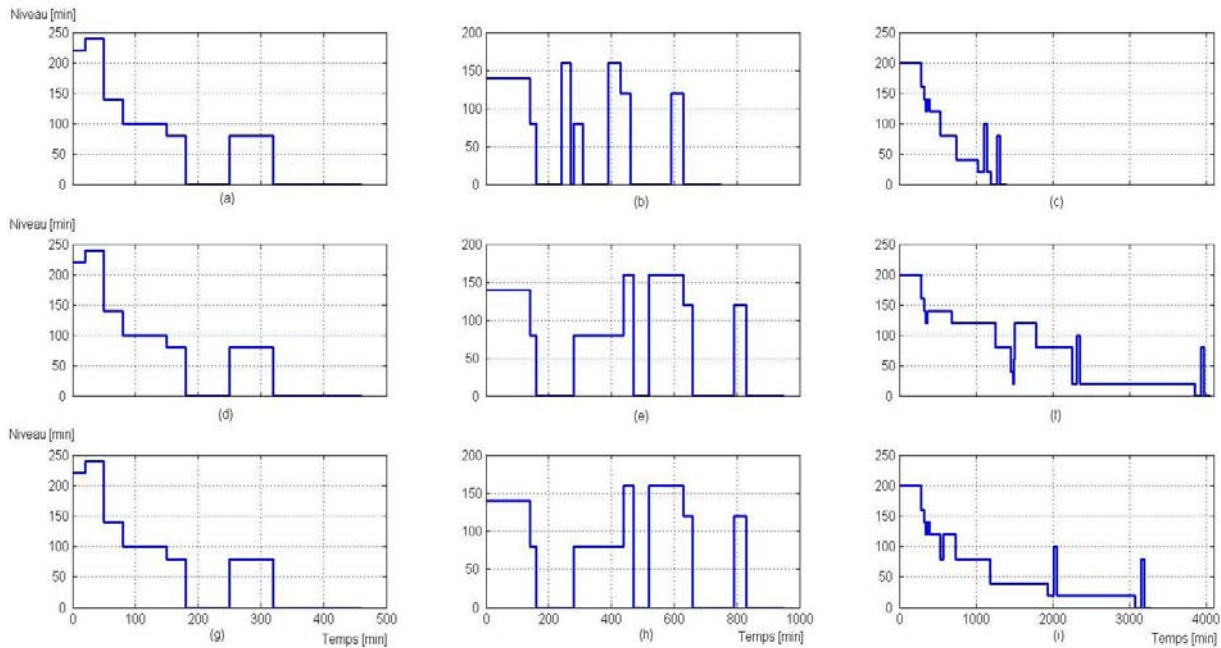


FIG. 3.23 – Profils de flux prévus pour les sites de (a) Toulouse, (b) Paris et (c) Bordeaux, suivis avec 1 puis 2 camions respectivement (d) et (g) avec 1 chariot pour Toulouse, (e) et (h) avec 2 chariots pour Paris, et (f) et (i) avec 1 chariot pour Bordeaux.

100 min attendu sur le profil prévu aux alentours de la date 1100 min, se produit au temps 2000 min dans le cas de deux camions contre 2350 min pour un seul. De même, le niveau 20 min est maintenu de 2130 min à 3070 min contre 2350 min à 3850 min dans le cas d'un seul camion. Au final, les opérations s'achèvent à la date 3270 min. Il n'existe donc pas de configuration logistique permettant l'absorption d'un ordonnancement multi-site dans le cadre d'une stratégie de deux lots de deux pièces.

Pour finir, nous exécutons la simulation de la stratégie avec un lot de quatre pièces dans le cas de perturbations multiples. Les résultats sont présentés sur la Figure 3.24.

Comme auparavant, le site de Toulouse n'est affecté par aucun retard puisqu'en début de production, aucune panne n'est apparue et aucune pièce n'est venue de l'extérieur. Le profil suivi (3.24.d) est donc identique au profil prévu (3.24.a). Dans le cas du site de Paris, la seule perturbation concerne la machine M4 et provoque un retard de 200 min. Nous constatons ce retard sur le profil suivi (3.24.e) qui s'achève à la date 1290 min au lieu des 1090 min du profil prévu (3.24.b). Enfin, le site de Bordeaux est le reflet de l'accumulation des retards tout au long du processus de fabrication. Comme il a été constaté lors de l'analyse de perturbations inter-sites, le niveau du profil est modifié. La fin d'exécution des tâches n'intervient qu'à la date 2790 min dans le cas d'une simulation avec un ou deux camions. Cette valeur inférieure au délai du client est donc retenue.

L'ensemble des simulation qui ont été effectuées ont permis de progressivement s'as-

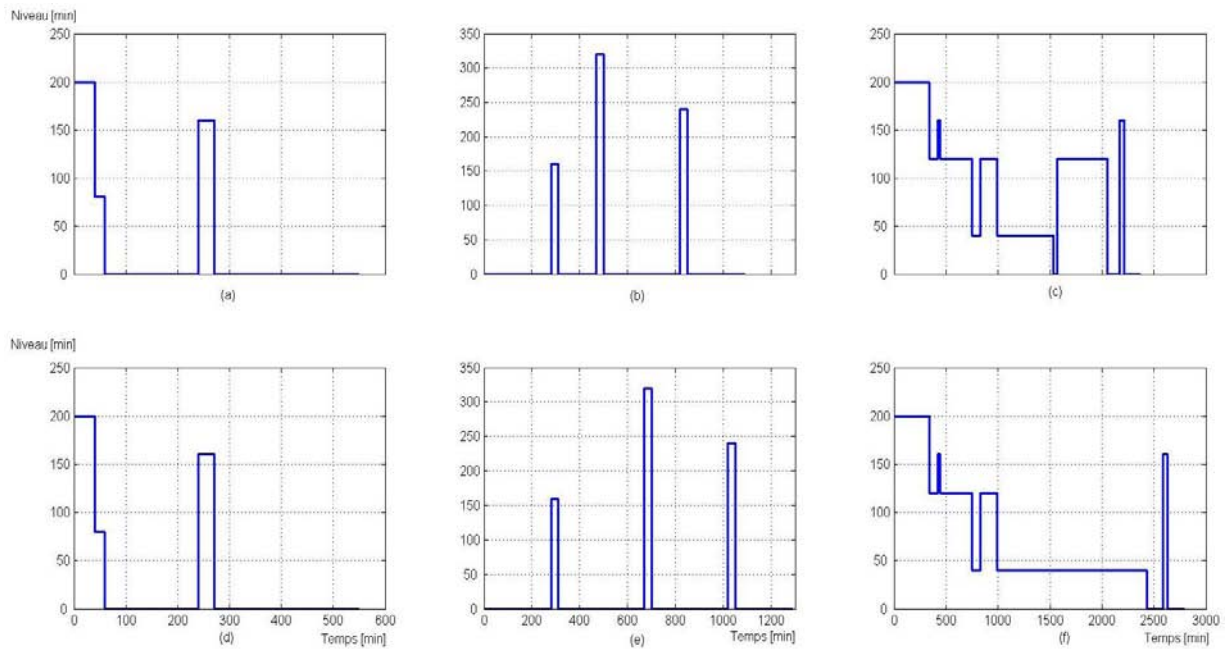


FIG. 3.24 – Profils de flux prévus pour les sites de (a) Toulouse, (b) Paris et (c) Bordeaux, et suivis avec 1 camion et (d) 1 chariot pour Toulouse, (e) 1 chariot pour Paris et (f) 1 chariot pour Bordeaux.

surer du bon fonctionnement des simulateurs et de déterminer l'importance relative des différentes pannes. Les stratégies de conduite basées sur la taille des lots ont été analysées puis écartées si les résultats ne convenaient pas aux attentes du client. Une meilleure configuration a été retenue et garantit l'exécution du plan dans les divers sites ainsi que la livraison dans les délais escomptés même si des perturbations interviennent lors du processus de fabrication. Lors de l'apparition dans le plan de transports intra et inter-sites, la disponibilité du ou des chariots et camions, leur localisation géographique initiale et les différentes pannes imposées sont autant de contraintes et de paramètres non pris en compte lors de l'ordonnancement et qui vont provoquer la dégradation progressive de l'écart temporel entre les flux prévus et suivis pour les trois sites. La présence d'un seul chariot peut parfois provoquer des retards conséquents alors que ces opérations de transports sont minimales en rapport des durées des gammes de fabrication et de transport inter-site. Il semble donc nécessaire de fixer le nombre de chariot à deux par exemple dans le cas du site de Paris pour la stratégie à deux lots. Ceci étant fait, l'évaluation pour les transports inter-sites a été rendue possible. La présence d'un nombre insuffisant de camions afin d'approvisionner les différents sites retarde la livraison des premières pièces avec comme effet de voir de nouvelles tâches planifiées intégrer les flux en modifiant les valeurs des niveaux. Les retards croissant vont entraîner un retard plus ou moins important en fonction du nombre de moyens de transport disponibles. La qualité de l'ordonnancement

pour des ateliers distribués dépend, dans notre exemple, de l'organisation des transports. D'autres cas nécessitant l'augmentation du nombre de moyens de transports aurait pu être simulés mais l'amélioration des configurations aurait été peu significative au regard du faible gain de temps possible pour une exigence client qui ne le nécessite pas. De la même façon, il est possible d'effectuer plusieurs tests en faisant varier le nombre de machines dans les ateliers afin d'adapter la configuration du réseau de sites distribués pour un plan établi. Ainsi, notre démarche et notre outil de simulation distribuée d'ateliers virtuels permettent d'évaluer la faisabilité d'ordonnancements multi-sites et d'adapter les ressources afin de correspondre au mieux au plan défini. Cette méthode permet de mettre en oeuvre une accommodation de la conduite des réseaux d'entreprises.

3.7 Performances de l'architecture d'évaluation

L'architecture distribuée proposée doit être caractérisée du point de vue de ses propres performances. L'outil doit être capable de respecter un ordonnancement prévu avec des temps de simulation satisfaisants afin d'éviter toute dérive dans le cas d'un modèle de grande complexité. En effet, l'outil qui en résulte permet de traiter des entreprises monosite ayant de nombreux flux de produits aussi bien qu'un cas de réseau d'entreprises multi-sites. A l'aide des simulations effectuées, nous allons comparer les durées de traitement. Le but est ici de déterminer l'influence du nombre d'événements et donc de messages à traiter par rapport au temps de simulation. Sur le Tableau 3.9 sont présentés les résultats des temps de simulation et du nombre d'événements simulés pour les différents cas de figure exécutés avec une stratégie d'un lot de quatre pièces. Nous constatons que

TAB. 3.9 – Performances de l'architecture, stratégie à un lot de quatre pièces.

Cas simulé	Temps mesuré (ms)	Nombre d'événements	Durée simulée (x10 min)
Sans perturbation	94672	541	237
Perturbation d'atelier	98188	584	257
Perturbation du réseau	101891	593	260
Perturbations multiples	127172	633	279

l'apparition de perturbations entraîne l'apparition de nouveaux événements. Lorsque la durée simulée augmente, de nouveaux incréments de temps et donc de nouveaux événements sont nécessaires pour mener la simulation à son terme. Trivialement, plus le nombre d'événements augmente, plus la simulation dure longtemps. De la même manière, les informations des résultats issus des simulations pour la stratégie de deux lots de deux pièces sont présentés dans le Tableau 3.10. Les résultats sont semblables à ceux relevés précé-

TAB. 3.10 – Performances de l’architecture, stratégie à deux lots de deux pièces.

Cas simulé	Temps mesuré (ms)	Nombre d’événements	Durée simulée (x10 min)
Sans perturbation	111859	801	321
Perturbation d’atelier	133406	789	309
Perturbation du réseau	132547	780	307
Perturbations multiples	150516	842	327

demment. Lors de la simulation avec perturbation sur le réseau, le nombre de messages échangés est inférieur au cas de la perturbation au sein d’un atelier. La même logique est respectée, plus le nombre d’événements augmente, plus le temps d’exécution de la simulation augmente.

Afin d’analyser plus en détail ces résultats, une comparaison des stratégies a été effectuée en calculant le rapport entre le nombre d’événements simulés et le temps de simulation. Les résultats sont présentés sur le Tableau 3.11. Lorsque le nombre d’événements à

TAB. 3.11 – Comparaison des performances de l’architecture.

Cas simulé	Nombre d’événements / Temps mesuré (min)	
	Stratégie 1 lot	Stratégie 2 lots
Perturbation d’atelier	356,87	354,86
Perturbation du réseau	349,20	353,08
Perturbations multiples	298,65	335,65

simuler est plus important, la durée de la simulation s’allonge sensiblement en entraînant une baisse de ce rapport. Ceci peut être expliqué en partie par les temps incompressibles d’initialisation de la simulation. En effet, des informations sont échangées entre les fédérés (mécanismes de publication et d’abonnement) au début de la simulation. La durée et le nombre d’événements lors de cette initialisation demeure relativement identique dans le cadre de ces simulations. Plus la simulation va durer dans le temps, plus la densité du nombre de messages initiaux va se marginaliser. D’autre part, les événements simulés au sein du simulateur encapsulé ont un temps de traitement toujours identique. Une tâche d’une durée de deux heures aura une durée de simulation presque semblable à celle de dix tâches étalées sur ces mêmes deux heures. Le nombre de tâches à traiter n’influence que peu pas les performances de l’outil. Il n’est donc pas surprenant de voir le rapport entre le nombre d’événements simulés et le temps de simulation diminuer lors de simulations où plus d’événements sont pris en compte. L’utilisateur peut aussi adapter le niveau de

détail souhaité en sortie des exécutions. En réglant l'incrément de temps, la valeur l du *lookahead*, il peut ainsi diminuer le nombre d'événements de la simulation. Il est aussi possible de faire varier la base de temps indépendamment de l'incrément. En simulant par exemple des centaines de minutes, le temps de simulation demeure identique dans le cadre de grandes simulations mais le degré de réactivité de la conduite est affecté. Nous avons testé plusieurs valeurs de *lookahead* et différentes configurations du nombre d'OF, mais ni le *lookahead* ni la valeur de la base de temps ne permettent de diminuer les durées de simulation. Finalement, ce sont principalement les performances du logiciel de simulation employé qui influencent les performances globales de notre architecture.

3.8 Conclusion

La méthode de conduite a été proposée et mise en oeuvre à l'aide d'un outil afin de répondre à la problématique de faisabilité de plans multi-sites pour des réseaux d'entreprises. Elle a été évaluée dans ce chapitre dans le cadre de la gestion d'un projet de production distribuée. Ce projet a été décrit, des plans correspondants à différentes stratégies de production ainsi que des modélisations pour les différents sites et le réseau inter-sites ont été présentés.

Plusieurs itérations de la démarche proposée dans la section 2.2 se révèlent nécessaires afin de mesurer l'influence de diverses perturbations et de déterminer une bonne configuration. L'objectif de ces simulations est de fournir une accommodation progressive de la conduite par itérations successives de la méthode. Tout d'abord, nous avons simulé l'exécution des plans relatifs à chaque stratégie par taille de lots pour fixer le nombre de chariots nécessaires à la réalisation des plans sans retard. Grâce au suivi de l'exécution des simulations sur les ateliers virtuels, une surveillance de l'état du système détecte lorsqu'un écart survient entre les profils prévus et suivis. Lorsqu'une solution se révèle insatisfaisante, une accommodation de la conduite est réalisée en faisant varier les paramètres de simulation relatifs aux stratégies et aux configurations. De nombreuses simulations sont alors réalisées afin de déterminer une solution satisfaisante. De la même façon, nous avons évalué le nombre de camions permettant d'obtenir de bonnes configurations sans retard. Par la suite, un des trois sites de production a été perturbé. Cette perturbation nous a permis de constater que différentes configurations étaient encore possible suivant chaque stratégie. Des perturbations inter-sites ont été introduites et des configurations se sont révélées non satisfaisantes. A l'étape finale de nos simulations, l'ensemble des perturbations ont été reproduites. Les résultats doivent conduire à une accommodation de la conduite du réseau d'entreprise, *i.e.* à la détermination d'une bonne configuration du réseau pour satisfaire les exigences du client.

La méthode d'évaluation utilisée conduit à la minimisation du nombre de transports utilisés pour chaque stratégie testée. En effet, à chaque itération de la méthode, lors

des phases d'accommodation de la conduite, nous avons déterminé quelle solution est satisfaisante avec le minimum de moyens de transport possibles. Cette méthode permet de gérer efficacement certains paramètres de la gestion de la logistique des transports au sein d'un réseau d'entreprises, à savoir la définition d'un nombre minimal de camions et de chariots nécessaires à la bonne exécution d'un plan multi-site.

L'évaluation par simulation distribuée est réalisée dans des temps de simulation corrects par rapport à la mise en oeuvre réelle de telles stratégies dans les entreprises en réseau. La distribution permet la simulation de grande envergure en évitant les bogues relatifs aux architectures centralisées qui n'arrivent pas nécessairement à gérer un grand nombre d'événements. Cependant, les temps de simulation restent directement dépendants des performances du logiciel de simulation choisi pour être encapsulé dans l'outil.

Enfin, une étude complémentaire sur l'évaluation économique doit précéder la proposition d'un module d'accommodation de la conduite automatisé. Le coût des délais, des moyens de transport ou du niveau d'utilisation des machines doit être intégré pour déterminer automatiquement la solution réalisable la plus favorable au réseau d'entreprise étudié.

Conclusion

Nous avons décrit certains problèmes relatifs à la conduite de réseaux d'entreprises. Ceux-ci véhiculent des flux entre différents sites pour satisfaire les exigences de fabrication des produits. La satisfaction du client ainsi que les enjeux économiques liés à la production distribuée imposent une gestion efficace des réseaux d'entreprises. Le but de cette gestion consiste en un respect des délais pour le client et en une minimisation des moyens de transports engagés dans les opérations logistiques. De nombreux modèles ont été étudiés et la simulation distribuée est apparue comme une bonne solution pour évaluer la faisabilité des plans. Les travaux nous ont conduit à appréhender les problèmes de coordination et de synchronisation de messages lors de la simulation sur plusieurs processeurs. Les techniques et protocoles de distribution ont été comparés afin de permettre leur implantation dans le modèle issu de travaux précédents. Bien que les modèles et les méthodes proposés dans la littérature permettent la conduite d'activités de production multi-site, nous avons établi, dans le chapitre 1, qu'ils ne suffisent pas à l'évaluation de la faisabilité des plans.

Nous avons proposé une méthode de conduite basée sur la simulation distribuée et sur le suivi de performances dans le chapitre 2. Une démarche en cinq étapes a été présentée pour la mise en oeuvre de cette méthode. Lors des deux premières étapes, des plans distribués dont nous cherchons à évaluer la faisabilité ainsi que des modélisations des réseaux étudiés sont générés. La troisième étape correspond à la simulation des ateliers dans l'outil que nous avons proposé. L'implantation modulaire de cet outil permet l'utilisation de plusieurs logiciels. Il est possible de comparer différents ordonnancements issus de différents logiciels. La coopération d'entreprises possédant des logiciels de simulations différents est aussi envisageable compte tenu du caractère générique des messages envoyés aux différents fédérés. De plus, cette implantation modulaire doit pouvoir garantir la confidentialité pour chaque partenaire du réseau en ne mettant en commun que les informations strictement nécessaires à la réalisation d'un projet. Le choix et l'implantation d'un protocole efficace de communication et de synchronisation pour la simulation des ateliers virtuels considérés ont été détaillés. La quatrième étape consiste en le suivi de l'état du système et est réalisée en tout point du réseau d'entreprises. Des mesures sont effectuées à chaque incrément de temps afin de garantir une gestion plus réactive des réseaux dans le cadre d'une automatisation future du système. Cette notion de réactivité n'a pas été un des enjeux de notre travail dans la mesure où la définition de plans et de

configurations du réseau est un travail mené avant la réalisation sur le système physique. Le plan est supposé demeurer inchangé au cours de la simulation et la technique d'accommodation au cours d'une simulation n'a pas été développée plus avant. Néanmoins, l'outil et la méthode présentés ont été réalisés afin de prendre en compte cette possibilité. Lors de la cinquième étape, une accommodation de la conduite est réalisable en fin d'itération de la méthode.

La méthode et l'outil proposés ont été évalués lors de l'étude d'un projet de production distribuée pour un réseau d'entreprises dans le chapitre 3. Différentes possibilités d'organisation étant offertes aux décideurs du réseau, diverses stratégies et leurs configurations associées ont été simulées. Nous avons déterminé de bonnes configurations logistiques pour chaque stratégie de conduite en fonction de la taille des lots de production envisagés. La simulation de perturbations lors de l'exécution des plans dans les ateliers virtuels a révélé que certaines configurations n'étaient pas complètement satisfaisante. Les perturbations intra site peuvent être considérées comme négligeables dans la plupart des cas car les temps de retour à un fonctionnement nominal sont relativement rapides. En revanche, lors de perturbations inter-sites, l'indisponibilité des camions a entraîné des retards plus conséquents. Afin d'anticiper d'éventuelles perturbations de tous types, le cas le plus défavorable a été simulé pour garantir la faisabilité des plans. Notre méthode, en s'appuyant sur la démarche itérative, a permis une accommodation de la conduite et l'évaluation de la faisabilité de plans multi-sites. De plus, une minimisation des ressources engagées pour la logistique a été réalisée. L'outil, de par ses bonnes performances en temps de simulation et en nombre d'événements simulés, peut être utilisé dans le cadre de simulations de grande échelle.

Les travaux menés au cours de cette thèse ont permis la mise en oeuvre d'une méthode et d'un outil pour l'accommodation de la conduite d'activités de production. Cependant, l'outil peut encore être amélioré. Des règles de fonctionnement implantés dans un module de détection permettent la pause de l'exécution des simulations. Un réordonnement automatique est alors envisageable dans le but de modifier les plans au fur et à mesure de l'exécution des simulations lors de l'apparition de perturbations. La réactivité des systèmes étudiés serait améliorée en considérant les nouvelles stratégies qui en découleraient. Il est aussi possible, à l'aide d'un outil d'ordonnement puissant, de changer au cours de l'exécution la taille des lots ou le nombre de moyens de transports disponibles. Dans des travaux futurs, il serait intéressant de prendre en compte ces évolutions et d'automatiser complètement le processus. L'implantation d'un module d'accommodation basé sur des règles simples de minimisation du nombre de transports, de respect des délais et de minimisation des coûts peuvent être mises en place. Afin de perfectionner nos simulations, une nouvelle modélisation des transports est déjà à l'étude prenant en compte des systèmes de conteneurs pour le transport afin de s'approcher encore de la réalité des systèmes simulés. L'utilisation de conteneurs de tailles variables ainsi que de camions ou

chariots de contenance différentes est mis en oeuvre. Il est même possible de développer différents moyens de transport dans nos simulations (ferroviaires, maritimes ou aéroports) afin de correspondre à la diversité des moyens de transport aujourd'hui accessibles aux réseaux d'entreprises. A terme, il est possible d'envisager le pilotage de ces simulations qui fournirait une démarche informatisée d'accommodation d'un ordonnancement multi-site vis-à-vis de perturbations du système.

Bibliographie

- [Adesta & Agusman, 2004] Adesta, E.Y.T., & Agusman, D. 2004. The Evolution of Supply-Chain Management Into Extended Enterprise. *Pages 1298–1302 of : Proceedings of the International Engineering Management Conference 2004.*
- [AFGI, 1992] AFGI. 1992. *Évaluer Pour Évaluer, Les Indicateurs de Performance Au Service Du Pilotage Industriel.* Association Française Gestion Industrielle.
- [Aknine *et al.* , 2004] Aknine, S., Pinson, S., & Shakun, M. F. 2004. An Extended Multi-Agent Negotiation Protocol. *Autonomous Agents and Multi-Agents Systems*, **8**, 5–45.
- [Aldanando & Archimède, 1996] Aldanando, M., & Archimède, B. 1996. A Hierarchical Indicator for Performance Evaluation and Supervision of a Manufacturing System. *Revue des systèmes de décision*, **5**(1-2), 179–191.
- [Archimède, 1998] Archimède, B. 1998. Application of a Multi-Agent Scheduling Method for the Processing of Dynamic Routings. *IMACS Multiconference on computational engineering in systems applications : CESA '98.*
- [Archimède & Coudert, 2001a] Archimède, B., & Coudert, T. 2001a. Ordonnancement Multi-Site Des Systèmes de Production Basé sur Le Modèle D'agent SCEP. *APII-Journal Européen des Systèmes Automatisés.*
- [Archimède & Coudert, 2001b] Archimède, B., & Coudert, T. 2001b. Reactive Scheduling Using a Multi-Agent Model : The SCEP Framework. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **14**(5), 667–683.
- [Archimède *et al.* , 1993] Archimède, B., Pun, L., Bérard, C., & Doumeingts, G. 1993. Flow-Profiles and Potential Graphs Based FMS Dynamical Control. *Control Engineering Practice*, **1**(1), 153–161.
- [Archimède *et al.* , 2003a] Archimède, B., Charbonnaud, P., & Mercier, N. 2003a. Robustness Evaluation of Multi-Site Distributed Schedule with Perturbed Virtual Workshops. *Production Planning and Control*, **14**(1), 55–67.
- [Archimède *et al.* , 2003b] Archimède, B., Charbonnaud, P., & Firmin, C. 2003b. A Supervised Multi-Site Reactive Production Activity Control Method for Extended Enterprise. *Journal of Decision Systems : DSS from theory to practice*, **12**(3-4), 309–328.

- [Asbjornslett & Rausand, 1999] Asbjornslett, B. E., & Rausand, M. 1999. Asses the Vulnerability of Your Production System. *Production Planning and Control*, **10**(3), 219–229.
- [Azevedo & Souza, 2000] Azevedo, A., & Souza, J.P. 2000. Agile Supply Chain Management : Challenges, Requirements and Solutions. *Pages 1–6 of : Proceedings of the IFAC Conference : Management and Control of Production and Logistics*.
- [Azevedo *et al.* , 2004] Azevedo, A.L., Toscano, C., Sousa, J.P., & Soares, A.L. 2004. An Advanced Agent-Based Order Planning System for Dynamic Networked Enterprises. *Production Planning and Control*, **15**(2), 133–144.
- [Barnett *et al.* , 2004] Barnett, L., Rahimifard, S., & Newman, S. 2004. Distributed Scheduling to Support Mass Customization in the Shoe Industry. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **17**(7), 623–632.
- [Beamon, 1998] Beamon, B.M. 1998. Supply Chain Design and Analysis : Models and Methods. *International Journal of Production Economics*, **55**, 281–294.
- [Billaut & Roubellat, 1996] Billaut, J.C., & Roubellat, F. 1996. Characterization of a Set of Schedules in a Multiresource Context. *Journal of Decisions Systems*, **5**(1-2), 95–109.
- [Bongaerts *et al.* , 1997] Bongaerts, L., Brussel, H. Van, Valckenaers, P., & Peters, P. 1997. Reactive Scheduling in Holonic Manufacturing Systems : Architecture, Dynamic Model and Co-Operation Strategy. *Proceeding of ASI 97 (Advanced Summer Institute of the Network of Excellence on Intelligent Control and Integrated Manufacturing Systems)*.
- [Browne, 1988] Browne, J. 1988. Production Activity Control - A Key Aspect of Production Control. *International Journal of Production Research*, **26**(3), 415–427.
- [Brun *et al.* , 2002] Brun, A., Cavalieri, S., Macchi, M., Portioli-Staudacher, A., & Terzi, S. 2002. Distributed Simulation for Supply Chain Co-Ordination. *In : Proceedings of the 12th International Working Seminar on Production Economics*.
- [Buss & Jackson, 1998] Buss, A., & Jackson, L. 1998. Distributed Simulation Modeling : A Comparison of HLA, CORBA and RMI. *In : Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*.
- [Chan, 2002] Chan, F.T.S. 2002. Comparative Evaluation of Supply Chain Management Strategies : A Simulation Approach. *Pages 78–83 of : Proceedings of the 7th International Conference on Control, Antamation, Robotics And Vision*.
- [Chan & Chan, 2005] Chan, F.T.S., & Chan, H.K. 2005. Simulation Modeling for Comparative Evaluation of Supply Chain Management Strategies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **25**, 998–1006.
- [Chan *et al.* , 2000] Chan, L. Y., Xie, M., & Goh, T. N. 2000. Cumulative Quantity Control Charts for Monitoring Production Processes. *International Journal of Production Research*, **38**(2), 397–408.

- [Chandy & Misra, 1978] Chandy, K.M., & Misra, J. 1978. A Nontrivial Example of Concurrent Processing : Distributed Simulation. *Pages 822–826 of : Proceedings of IEEE COMPSAC’78*. IEEE.
- [Cheikhrouhou *et al.* , 2002] Cheikhrouhou, N., Paris, J.L., & Pierreval, H. 2002. Une Méthode de Dimensionnement de Lignes de Transfert Via L’analyse de Perturbation Finie. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, **36**(2), 199–221.
- [Chen *et al.* , 2002] Chen, H., Amodeo, L., & Chu, F. 2002. Batch Deterministic and Stochastic Petri Nets. A Tool for Modeling and Performance Evaluation of Supply Chain. *Pages 78–83 of : Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- [Chen *et al.* , 2005] Chen, H., Amodeo, L., Chu, F., & Labadi, K. 2005. Modeling and Performance Evaluation of Supply Chains Using Batch Deterministic and Stochastic Petri Nets. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **2**(2), 132–144.
- [Clegg *et al.* , 2000] Clegg, B., Alexander, I., Boardman, S. Wingrove AndJ., & Boardman, A. 2000. Tool Support for Integrating Extended Enterprises. *IEE Proceedings online*, **147**(4), 101–108.
- [Cowling *et al.* , 2004] Cowling, P.I., Ouelhadj, D., & Petrovic, S. 2004. Dynamic Scheduling of Steel Casting and Milling Using Multi-Agents. *Production Planning and Control*, **15**(2), 178–188.
- [Davis & O’Sullivan, 1998] Davis, M., & O’Sullivan, D. 1998. Communications Technologies for the Extended Enterprise. *Production Planning and Control*, **9**(8), 742–753.
- [Davis & O’Sullivan, 1999] Davis, M., & O’Sullivan, D. 1999. Systems Design Framework for the Extended Enterprise. *Production Planning and Control*, **10**(1), 3–18.
- [Ding *et al.* , 2003] Ding, H., Benyoucef, L., & Xie, X. 2003. A Simulation-Optimization Approach Using Genetic Search for Supplier Selection. *Pages 1260–1267 of : Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*.
- [DMSO, 1996] DMSO. 1996. *HLA Time Management Design Document Version 1.0*. Defense Modeling and Simulation Office of U.S. Department of Defense.
- [DMSO, 1998] DMSO. 1998. *High Level Architecture Interface Specification Version 1.3*. Defense Modeling and Simulation Office of U.S. Department of Defense.
- [Dong & Chen, 2005] Dong, M., & Chen, F.F. 2005. Performance Modeling and Analysis of Integrated Logistic Chains : An Analytic Framework. *European Journal of Operational Research*, **162**, 83–98.
- [Enjalbert *et al.* , 2004a] Enjalbert, S., Archimède, B., & Charbonnaud, P. 2004a (Mars). Amélioration de la Coordination de L’exécution de Simulations Distribuées Pour L’évaluation de Méthodes de Conduite Réactive. *In : 5ème Congrès Annuel Des Doctorants de l’Ecole Doctorale Systèmes*.

- [Enjalbert *et al.* , 2004b] Enjalbert, S., Archimède, B., & Charbonnaud, P. 2004b. A HLA Federation of Reactive Production Activity Control for Extended Enterprise Performance Evaluation. *In : Proceedings of the 5th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation.*
- [Enjalbert *et al.* , 2005] Enjalbert, S., Archimède, B., & Charbonnaud, P. 2005. Evaluation de la Performance Des Chaînes Logistiques Par Simulation Distribuée. *In : Journées Doctorales et Nationales Du GDR MACS.*
- [Enjalbert *et al.* , 2006a] Enjalbert, S., Archimède, B., & Charbonnaud, P. 2006a (Avril). Evaluation de la Faisabilité D'ordonnancement Multi-Site Par Simulation Distribuée D'ateliers Virtuels. *Pages 441–448 of : Proceedings of MOSIM'06, 6ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation.*
- [Enjalbert *et al.* , 2006b] Enjalbert, S., Archimède, B., & Charbonnaud, P. 2006b (Mai). Feasibility Evaluation of Multi-Site Scheduling by Distributed Simulation of Workshops. *In : Proceedings of INCOM'2006, 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing.*
- [Enjalbert *et al.* , 2006c] Enjalbert, S., Archimède, B., & Charbonnaud, P. 2006c (Mai-Juin). Validation Par Simulation Distribuée de L'ordonnancement D'entreprises En Réseau. *In : Proceedings of CIFA 2006, Conférence Internationale Francophone d'Automatique.*
- [Erschler *et al.* , 1997] Erschler, J., Huguet, M.J., & Tersac, G. De. 1997. *Décision Distribuée En Gestion de Production : Exploitation et Régulation de L'autonomie.* CEPA-DUES. Pages 109–132.
- [Ferber, 1989] Ferber, J. 1989. Eco Problem Solving : How to Solve Problem by Interactions. *Pages 113–128 of : Proceedings of the 9th Workshop on Distributed Artificial Intelligence.*
- [FIPA, 2000] FIPA. 2000. *FIPA Contract Net Interaction Protocol Specification.* Foundation for Intelligent Physical Agents.
- [Fujii *et al.* , 2000] Fujii, S., Kaihara, T., & Morita, H. 2000. A Distributed Virtual Factory in Agile Manufacturing Environment. *International Journal of Production and Research*, **38**(17), 4113–4128.
- [Geller *et al.* , 1995] Geller, T.L., Lammers, S.E., & Mackulak, G.T. 1995. Methodology for Simulation Application to Virtual Manufacturing Environments. *Pages 909–916 of : Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference.*
- [Hameri & Paatela, 1995] Hameri, A.P., & Paatela, A. 1995. Multidimensional Simulation as a Tool for Strategic Logistics Planning. *Computers in Industry*, **27**, 273–285.
- [Harding & Popplewell, 2000] Harding, J.A., & Popplewell, K. 2000. Simulation Modeling Agent : An Aid to Enterprise Design and Performance Evaluation. *In : Proceedings of 9th ASIM Dedicated Conference on Simulation in Production and Logistics.*

- [Hssain *et al.* , 1998] Hssain, A.A., Chafik, S., & Boisseau, N. 1998. Simulation of Manufacturer-Supplier Relationships. *Pages 3714 – 3719 of : Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics.*
- [IEEE, 2000] IEEE. 2000. *Standard for Modelling and Simulation High Level Architecture (1516)*. Computer Society / Simulation Interoperability Standards.
- [Jagdev & Browne, 1998] Jagdev, H.S., & Browne, J. 1998. The Extended Enterprise - a Context for Manufacturing. *Production Planning and Control*, **9**(3), 216–229.
- [Jäkel & Pinedo, 2000] Jäkel, F.W., & Pinedo, J.S. Arroyo. 2000. Developement of a Demonstrator for Modelling and Simulation of Global Distributed Enterprises. *Pages 375–384 of : Proceedings of the 9th ASIM Dedicated Conference on Simulation in Production and Logistics.*
- [Jones & Saleh, 1990] Jones, A., & Saleh, A. 1990. A Multi-Agents Level / Multi-Agents Layer Architecture for Intelligent Shop Floor Control. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **3**(1).
- [Klein, 2000] Klein, U. 2000. Simulation-Based Distributed System : Serving Multiple Purposes Through Composition of Components. *Safety Science*, **35**(1-3), 29–39.
- [Kuhl *et al.* , 1999] Kuhl, F., Weatherly, R., & Dahman, J. 1999. *Creating Computer Simulation Systems : An Introduction to the High Level Architecture*. Prentice Hall PTR.
- [Lamberson & Wasserman, 2001] Lamberson, L. R., & Wasserman, G. S. 2001. Monitoring Manufacturing System Availability. *International Journal of Production Research*, **39**(4), 727–736.
- [Lee *et al.* , 2002] Lee, Y.H., Kim, S.H., & Moon, C. 2002. Production Distribution Planning in Supply Chain Using a Hybrid Approach. *Production Planning and Control*, **13**(1), 35–46.
- [Luder *et al.* , 2004] Luder, A., Peschke, J., Sauter, T., Deter, S., & Diep, D. 2004. Distributed Intelligence for Plant Automation Based on Multi-Agent Systems : The PABADIS Approach. *Production Planning and Control*, **15**(2), 201–212.
- [Lyons *et al.* , 1990] Lyons, G.J., Duggan, J., & Bowden, R. 1990. Project 477 : Pilot Implementation of a Production Activity Control (PAC) System in an Electronics Assembly Environment. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **3**(3-4), 196–206.
- [Maamar, 2003] Maamar, Z. 2003. Design of a Simulation Environment Based on Software Agents and the High Level Architecture. *Information and Software Technology*, **45**(3), 137–148.
- [MACSI, 2004] MACSI, Equipe Du Projet. 2004. *Rapport D'activités : Modeling, Analysis and Control of Industrial Systems*. Tech. rept. Institut National de Recherche En Informatique et En Automatique.

- [McLean & Riddick, 2000a] McLean, C., & Riddick, F. 2000a. The IMS MISSION Architecture For Distributed Manufacturing Simulation. *Pages 1539–1548 of : Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference.*
- [McLean & Riddick, 2000b] McLean, C., & Riddick, F. 2000b. Integration of Manufacturing Simulations Using HLA. *In : Proceedings of the Advanced Simulation Technologies Conference.*
- [McLean & Shao, 2001] McLean, C., & Shao, G. 2001. Simulation of Shipbuilding Operations. *In : Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference.*
- [McLean et al. , 2000] McLean, C., Riddick, F., & Leong, S. 2000. Architecture for Modeling and Simulation of Global Distributed Enterprises. *In : Proceedings of the 9th ASIM Dedicated Conference on Simulation in Production and Logistics.*
- [Mertins et al. , 2005] Mertins, K., Rabe, M., & Jäkel, F.W. 2005. Distributed Modeling and Simulation of Supply Chains. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **18**(5), 342–349.
- [Meyr et al. , 2000] Meyr, H., Wagner, M., & Rhode, J. 2000. *Concepts of Advanced Planning Systems : Structure.* Springer. Pages 75–77.
- [Moore & Ray, 1999] Moore, L.M., & Ray, B.K. 1999. Statistical Methods for Sensitivity And Performance Analysis in Computer Experiments. *Pages 486–491 of : Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference.*
- [Nandula & Dutta, 2000] Nandula, M., & Dutta, S.P. 2000. Performance Evaluation of an Auction-Based Manufacturing System Using Coloured Petri Nets. *International Journal of Production and Research*, **38**(10), 2155–2171.
- [Nishi et al. , 2005] Nishi, T., Konishi, M., & Hasebe, S. 2005. An Autonomous Decentralized Supply Chain Planning System for Multi-Stage Production Processes. *Journal of Intelligent Manufacturing*, **16**, 259–275.
- [Paris & Pierreval, 2001] Paris, J.L., & Pierreval, H. 2001. A Distributed Evolutionary Simulation Optimization Approach for the Configuration of Multiproduct Kanban Systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **14**(5), 421–430.
- [Parrod et al. , 2005] Parrod, N., Thierry, C., Cavaille, J., & Fargier, H. 2005. Evaluation de Performances D’une Relation Coopérative de Sous-Traitance de Spécialité Au Sein D’une Chaîne Logistique Projet. *Journal européen des systèmes automatisés*, **39**(7), 839–862.
- [Parunak, 1996] Parunak, H.V.D. 1996. *Applications of Distributed Artificial Intelligence in Industry.* G. m. p. o’hare and n. r. jennings edn. John Wiley and Sons. Chap. 4, pages 139–165.
- [Penya & Sauter, 2002] Penya, Y.K., & Sauter, T. 2002. Network Load Imposed by Software Agents in Distributed Plant Automation. *Pages 339–343 of : Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems.*

- [Pierreval & Paris, 2003] Pierreval, H., & Paris, J.L. 2003. From "simulation Optimization" to "simulation Configuration" of Systems. *Simulation modelling Practice and Theory*, **11**, 5–19.
- [Puym, 1990] Puym, B. Van Der. 1990. Knowledge-Based Decision Making for Job Shop Scheduling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **3**(6).
- [Rabe & Jäkel, 2000] Rabe, M., & Jäkel, F.W. 2000. Simulation for Globally Distributed Enterprise. *Pages 322–327 of : Proceedings of the 12th European Simulation Symposium (ESS)*.
- [Rabe *et al.* , 2001] Rabe, M., de Gurtubai, G. Garcia, & Jäkel, F.W. 2001. Modelling and Simulation for Globally Distributed Enterprises. *In : Proceedings of the EUROSIM 2001 Conference*.
- [Reiner, 2005] Reiner, G. 2005. Customer-Oriented Improvement and Evaluation of Supply Chain Processes Supported by Simulation Models. *International Journal of Production Economics*, **96**, 381–395.
- [Rolstadas, 1998] Rolstadas, A. 1998. Virtual and Extended Enterprise - Definition (Editorial). *Production Planning and Control*, **9**(3), 215.
- [Ross & Droge, 2002] Ross, A., & Droge, C. 2002. An Integrated Benchmarking Approach to Distribution Center Performance Using DEA Modeling. *Journal of Operations Management*, **20**, 19–32.
- [Rota, 1998] Rota, K. 1998. *Coordination Temporelle de Centres Gérant de Façon Autonome Des Ressources. Application Aux Chaînes Logistiques Intégrées En Aéronautique*. Ph.D. thesis, ENSAE.
- [Roubellat & Billaut, 1997] Roubellat, F., & Billaut, J.C. 1997. *Un Système Interactif Pour L'ordonnancement En Temps Réel D'atelier*. CEPADUES. Pages 191–219.
- [Schmitz & Platts, 2004] Schmitz, J., & Platts, K.W. 2004. Supplier Logistics Performance Measurement : Indications from a Study in the Automotive Industry. *International Journal of Production Economics*, **89**, 231–243.
- [Schumann *et al.* , 1998] Schumann, M., Blümel, E, Schulze, T., Straßburger, S., & Ritter, K.C. 1998. Using HLA for Factory Simulation. *In : Proceedings of the Simulation Interoperability Workshop*.
- [Shen & Norrie, 1999] Shen, W., & Norrie, D.H. 1999. Agent-Based Systems for Intelligent Manufacturing : A State-of-the-Art Survey. *Knowledge and Information Systems*, **1**(2), 129–156.
- [Siron, 1998] Siron, P. 1998. Design and Implementation of a HLA RTI Prototype at ONERA. *In : Proceedings of the Fall Simulation Interoperability Workshop*.
- [Smith & Davis, 1981] Smith, R. G., & Davis, R. 1981. Frameworks for Co-Operation in Distributed Problem Solving. *IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics*, **11**(1).

- [Smith, 1980] Smith, R.G. 1980. The Contract Net Protocol : High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. *IEEE Transactions on Computers*, **29**(12), 1104–1113.
- [Srinivasan & Moon, 1999] Srinivasan, M., & Moon, Y.B. 1999. A Comprehensive Clustering Algorithm for Strategic Analysis of Supply Chain Networks. *Computers and Industrial Engineering*, **36**, 615–633.
- [Stadtler, 2000] Stadtler, H. 2000. *Basics of Supply Chain Management : An Overview*. Springer. Pages 7–27.
- [Stadtler & Kilger, 2000] Stadtler, H., & Kilger, C. 2000. *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Springer. Chap. Preface.
- [Straßburger *et al.* , 2002] Straßburger, S., Hamm, A., & Haasis, G. Schmidgall Ans S. 2002. Using HLA Ownership Management in Distributed Material Flow Simulations. *In : Proceedings of the European Simulation Interoperability Workshop*.
- [Tahon, 2003] Tahon, C. 2003. *Evaluation Des Performances Des Systèmes de Production (Traité IC2, Série Productive)*. Hermès.
- [Taylor & Ladbroke, 2003] Taylor, S.J.E., & Ladbroke, J. 2003. Time Management Issues in Costs Distributed Simulation : A Case Study. *In : Proceedings of the Winter Simulation Conference*.
- [Tayur *et al.* , 1999] Tayur, S., Ganeshan, R., & Magazine, M. 1999. *Quantitative Models for Supply Chain Management*. Kluwer Academic Publishers.
- [Tharumarajah, 1998] Tharumarajah, A. 1998. A Self-Organizing Model for Scheduling Distributed Autonomous Manufacturing Systems. *Cybernetics and Systems : An International Journal*, **29**, 461–480.
- [Tharumarajah *et al.* , 1996] Tharumarajah, A., Wells, A.J., & Nemes, L. 1996. Comparison of the Bionic, Fractal and Holonic Manufacturing System Concepts. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **9**(3), 217–226.
- [Thomas & Griffin, 1996] Thomas, D.J., & Griffin, P.M. 1996. Coordinated Supply Chain Management. *European Journal of Operational Research*, **94**, 1–15.
- [Tian *et al.* , 2003] Tian, C., Chai, Y., Liu, Y., & Ren, S. 2003. Performance Management in Supply Chain. *Pages 4934–4939 of : Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2003*.
- [Tu *et al.* , 2003] Tu, Y., Luh, P.B., Feng, W., & Narimatsu, K. 2003. Supply Chain Performance Evaluation : A Simulation Study. *Pages 1749–1755 of : Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- [Turner *et al.* , 2000] Turner, S.J., Cai, W., & Gan, B.P. 2000. Adapting a Supply-Chain Simulation for HLA. *Pages 71–78 of : Proceedings of the 4th IEEE International Workshop on Distributed Simulation and Real-Time Applications, 2000*.

- [Wang *et al.* , 2005] Wang, G., Huang, S.H., & Dismukes, J.P. 2005. Manufacturing Supply Chain Design and Evaluation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **25**, 93–100.
- [Worn *et al.* , 2004] Worn, H., Langle, T., Albert, M., Kazi, A., Brighenti, A., Seijo, S. Revuelta, Senior, C., Bobi, M.A. Sanz, & Collado, J. Villar. 2004. DIAMOND : Distributed Multi-Agent Architecture for Monitoring and Diagnosis. *Production Planning and Control*, **15**(2), 189–200.
- [Zanoni & Grubbstrom, 2004] Zanoni, S., & Grubbstrom, R.W. 2004. A Note on an Industrial Strategy for Stock Management in Supply Chains : Modelling and Performance Evaluation. *International Journal of Production Research*, **42**(20), 4421–4426.
- [Zeigler *et al.* , 1999] Zeigler, B.P., Kim, D., & Buckley, S.J. 1999. Distributed Supply Chain Simulation in a DEVS/CORBA Execution Environment. *Pages 1333–1340 of : Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*.

Résumé

Aujourd'hui, la plupart des entreprises s'organisent en réseaux de partenaires, de fournisseurs et de sous-traitants pour réaliser de nouveaux projets. Cependant, les outils classiques de planification n'offrent pas toutes les fonctionnalités nécessaires pour garantir la conduite de telles organisations. Dans ce mémoire, une démarche et un outil sont proposés pour évaluer la faisabilité des plans multi-sites de production ou de transports avant leur exécution. La méthode présentée permet d'adapter la configuration de ces réseaux afin de maintenir de bonnes performances pour les projets évalués. Intégrant le protocole HLA, l'outil gère la synchronisation des simulateurs en garantissant la causalité des événements simulés. La bonne exécution des plans multi-sites associés aux configurations d'ateliers et de logistique est ainsi évaluée. Les performances de l'outil révélées par les résultats de simulation de différents scénarios montrent l'intérêt et l'effectivité de l'approche.

Mots clés : Simulation distribuée, réseaux d'entreprises, évaluation de performances, grandes simulations, plans multi-sites.

Abstract

Currently, most of the companies are organized in networks of partners, suppliers and subcontractors to carry out new projects. However, the conventional tools for planning do not offer all the functionalities making it possible to guarantee the control of such organizations. In this dissertation, the steps and a tool are provided to evaluate the feasibility of the production or transportation multi-site plans before their execution. The presented method makes it possible to adapt the configuration of these networks in order to maintain good performances for the evaluated projects. Integrating the HLA protocol, the tool manages the synchronization of the simulators by guaranteeing the causality of the simulated events. The good execution of the multi-site plans associated to the workshops and logistics configurations is assessed. The tool performances revealed by the simulation results of various scenarios show the interest and the efficiency of the proposed approach.

Key words Distributed simulation, enterprise networks, performance evaluation, large scale simulations, multi-site schedules.