



**HAL**  
open science

## Exploitation de données pour la modélisation.

Philippe Thomas

► **To cite this version:**

Philippe Thomas. Exploitation de données pour la modélisation.: De l'évaluation des systèmes de transport aux chaînes logistiques.. Réseau de neurones [cs.NE]. Université de Lorraine, 2014. tel-01096878

**HAL Id: tel-01096878**

**<https://hal.science/tel-01096878>**

Submitted on 18 Dec 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



École Doctorale IAEM Lorraine

## HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Université de Lorraine

Présentée par

**Philippe THOMAS**

Maître de Conférences – Docteur de l'Université Henri Poincaré Nancy I

---

Exploitation de données pour la modélisation.

De l'évaluation des systèmes de transport aux chaînes logistiques.

---

Soutenue publiquement le 12 décembre 2014 devant le jury composé de :

<i>PRESIDENTE :</i>	PR. NATHALIE SAUER	UNIVERSITE DE LORRAINE
<i>RAPPORTEURS :</i>	PR. ALEXANDRE DOLGUI	ECOLE DES MINES DE ST ETIENNE
	PR. BERNARD GRABOT	ENIT TARBES
	PR. KUROSH MADANI	UNIVERSITE PARIS-EST CRETEIL
<i>EXAMINATEURS :</i>	PR. THIERRY DIVOUX	UNIVERSITE DE LORRAINE
	PR. ABDELLAH EL MOUDNI	UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE BELFORT-MONTBELIARD
	PR. ANDRE THOMAS	UNIVERSITE DE LORRAINE



*Joséphine Baker avait deux amours,  
moi, j'ai la chance d'en avoir trois,  
à Marie, Clélie et Eléonore*



*In god we trust, all others bring data.*

*William Edwards Deming (1900-1993)*



## *REMERCIEMENTS*

Mon parcours jusqu'à la rédaction de ce mémoire doit beaucoup à un certain nombre de rencontres que j'ai faites.

La première fut celle du professeur Claude Humbert qui, lors d'une journée portes ouvertes dans son équipe, m'a fait entrevoir ce qu'était le métier d'enseignant chercheur avant de m'accueillir dans son équipe pour préparer un DEA puis une thèse.

La deuxième personne à laquelle je pense est le professeur Gérard Bloch qui m'a encadré durant mon DEA puis ma thèse et qui m'a fait découvrir cet outil que j'utilise encore : les réseaux de neurones.

L'étape suivante se passe dans une autre ville, à Belfort, où le professeur Abdellah El Moudni m'a fait confiance en me recrutant sur un poste de maître de conférences, en m'intégrant dans son équipe, en me donnant l'occasion de co-encadrer mes premiers étudiants et en acceptant d'examiner mon travail aujourd'hui.

A Abdellah, je ne peux qu'associer le professeur Dimitri Lefebvre avec qui j'ai travaillé, qui m'a guidé et épaulé tout au long de mon parcours Belfortain.

Encore un mouvement et me voilà à Epinal et Nancy où j'avais demandé ma mutation et où je rencontre le professeur André Thomas qui, lui aussi, me fait confiance et me fait découvrir cet autre domaine de recherche qu'est la gestion de production et m'a poussé dans ce processus d'HdR.

Enfin, nous arrivons à ce mois de décembre où les professeurs Alexandre Dolgui, Bernard Grabot et Kurosh Madani ont accepté de rapporter sur mon travail et où les professeurs Nathalie Sauer et Thierry Divoux ont bien voulu l'examiner.

A toutes ces personnes, et à tous mes collègues de Belfort, Epinal, Nancy ou d'ailleurs, j'exprime mes plus vifs remerciements pour tous les efforts et le temps qu'ils ont bien voulu m'accorder.

Pour finir, j'exprime toute mon affection à ma compagne, Marie-Christine, et à mes enfants Clélie et Eléonore pour tous ces instants qu'ils m'ont offerts et que je vais continuer de leurs quêmander.

.



---

## Sommaire

Avant-propos .....	1
Introduction.....	3
I CURRICULUM VITAE ET NOTICE D'ACTIVITES .....	7
I.1 Curriculum Vitae général .....	9
I.1.1 État civil .....	9
I.1.2 Coordonnées professionnelles .....	9
I.1.2.1 Recherche .....	9
I.1.2.2 Enseignement .....	9
I.1.3 Coordonnées personnelles .....	9
I.1.4 Situation actuelle .....	9
I.1.5 Carrière .....	10
I.1.6 Diplômes, titres et qualifications .....	11
I.2 Activités liés à l'enseignement .....	12
I.2.1 Historique .....	12
I.2.2 Enseignements dispensés et volume horaire .....	14
I.2.3 Activités d'encadrement .....	16
I.2.4 Participation à des jurys .....	16
I.2.5 Activités administratives liés à l'enseignement .....	16
I.3 Activités liés à la recherche .....	18
I.3.1 Historique .....	18
I.3.2 Activités administratives relatives à la recherche .....	19
I.3.2.1 Fonctions électives .....	19
I.3.2.2 Comité de sélection .....	19

---

I.3.2.3	Participation à des comités d'organisations .....	19
I.3.2.4	Participation à des comités de programme.....	20
I.3.2.5	Présidence de sessions dans des colloques.....	20
I.3.2.6	Expertise scientifique .....	21
I.3.2.7	Critique scientifique pour publications .....	21
I.3.2.8	Participation à des jurys de thèses.....	22
I.3.3	Activités d'encadrement .....	22
I.3.3.1	Encadrement de thèses .....	22
I.3.3.2	Encadrement de DEA.....	23
I.3.3.3	Encadrement de Master Recherche .....	24
I.3.3.4	Encadrement de projets d'école d'ingénieurs .....	24
I.3.4	Liste des publications et communications.....	25
I.3.4.1	Bilan des publications .....	25
I.3.4.2	Publications dans des revues internationales avec comité de lecture ...	25
I.3.4.3	Publications dans des revues francophones avec comité de lecture .....	27
I.3.4.4	Book review pour des revues internationales avec comité de lecture...	27
I.3.4.5	Chapitres d'ouvrages .....	27
I.3.4.6	Communications dans des colloques internationaux avec comité de lecture	28
I.3.4.7	Communications dans des colloques nationaux avec comité de lecture	31
I.3.4.8	Thèse et rapports .....	33
I.3.4.9	Communications sans actes.....	34
I.3.4.10	Autres documents.....	35
II	SYNTHESE DES TRAVAUX DE RECHERCHE MENES AU SET.....	37
II.1	Introduction.....	39
II.2	Apprentissage de comportements de modèles de trafic.....	40
II.2.1	La surveillance du trafic .....	40

---

II.2.1.1	Introduction .....	40
II.2.1.2	Le perceptron multicouche.....	42
II.2.1.3	Modèle macroscopique boîte grise par réseaux de neurones .....	44
II.2.1.4	Exploitation des modèles pour la surveillance.....	46
II.2.2	Estimation paramétrique de Réseaux de Petri (RdP) .....	49
II.2.2.1	Introduction .....	49
II.2.2.2	Les différents réseaux de Petri .....	50
II.2.2.3	Estimation paramétrique et analyse structurelle .....	54
II.2.2.4	Estimation paramétrique dans les RdPCV et RdPT.....	55
II.3	Évaluation et pilotage du trafic.....	58
II.3.1	Du microscopique au macroscopique : les RdP pour modéliser le trafic.....	58
II.3.1.1	Introduction.....	58
II.3.1.2	Une section de route.....	59
II.3.1.3	Modèle RdPCV macroscopique.....	60
II.3.1.4	Du macroscopique au microscopique .....	63
II.3.1.5	Modèle RdPT microscopique.....	64
II.3.2	Commande des feux de trafic .....	65
II.3.2.1	Description d'un carrefour isolé.....	66
II.3.2.2	Modèles RdP du carrefour .....	66
II.4	Bilan.....	70
III	SYNTHESE DES TRAVAUX DE RECHERCHE MENES AU CRAN .....	73
III.1	Introduction .....	75
III.2	Les systèmes contrôlés par le produit .....	77
III.2.1	Des approches centralisées au SCP .....	77
III.2.2	Des modèles pour un concept.....	82
III.2.2.1	Quelques exemples d'architectures de modèles.....	84

---

III.2.2.2	Un cadre générique de modélisation.....	87
III.3	Apprentissage de comportements de systèmes contrôlés par le produit.....	90
III.3.1	Modèles de simulation réduit : un modèle hybride NN-files d'attentes...	91
III.3.1.1	Introduction.....	91
III.3.1.2	De la réduction de modèles de simulation.....	92
III.3.1.3	Proposition d'un modèle réduit.....	93
III.3.2	Élaboration du modèle neuronal.....	96
III.3.2.1	Modèle continu et données discrètes.....	97
III.3.2.2	Détermination de la structure du réseau de neurones.....	98
III.3.3	Application à la modélisation d'une scierie.....	105
III.3.4	Surveillance de la qualité on-line.....	106
III.4	Évaluation et pilotage de systèmes contrôlés par le produit.....	107
III.4.1	L'apprentissage pour contrôler un RdP.....	108
III.4.1.1	Introduction.....	108
III.4.1.2	Représentation dans l'espace d'état.....	108
III.4.1.3	Commande des RdPCV.....	111
III.4.2	Pilotage d'une boucle Kanban.....	115
III.4.2.1	Introduction (JàT Kanban).....	115
III.4.2.2	Modèle RdP de système kanban.....	116
III.4.2.3	Pilotage d'une boucle Kanban.....	120
III.5	Bilan.....	122
IV	PROJET DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT.....	123
IV.1	Introduction.....	125
IV.2	Au niveau operationnel.....	128
IV.2.1	Introduction.....	128
IV.2.2	Des données stochastiques.....	129

---

IV.2.3	Des données discrètes .....	131
IV.3	Au niveau global .....	133
IV.3.1	Caractérisation de la structure .....	134
IV.3.2	Mixité des concepts .....	137
IV.3.3	Proposition d'un méta-modèle générique.....	138
IV.4	Les systèmes contrôlés par le produit .....	139
IV.5	Projet pédagogique : Ouverture d'un département Packaging Emballage Conditionnement .....	142
V	FIGURES ET REFERENCES .....	143
V.1	Liste des figures .....	145
V.2	Bibliographie .....	147



## *AVANT-PROPOS*

Les travaux relatés ici ont été réalisés au sein de deux laboratoires et sont relatifs à deux domaines d'activité, les systèmes de transport et les chaînes logistiques. Dans les deux cas, la particularité de mes travaux est la recherche constante d'une meilleure exploitation des données disponibles.

Après avoir participé, au sein de la société TIGA technologies, et pendant un an, à un projet européen portant en particulier sur l'apprentissage des réseaux bayésiens, j'ai été recruté en tant que maître de conférences au sein de l'UTBM en septembre 1999. J'ai alors contribué à la création du laboratoire Systèmes et Transports au sein duquel je me suis intéressé à des problématiques de surveillance et de pilotage du trafic.

En septembre 2005, suite à une mutation, j'ai rejoint l'équipe projet Système Produit (SP) du groupe thématique Système de Production Ambient (SYMPA) du CRAN. Les travaux menés par cette équipe abordaient des problématiques de pilotage de flux de produits dans les systèmes logistiques, problématiques a priori très différentes de celles abordées au SeT.

Si ce changement peut être vu comme une réorientation thématique, il s'apparente, de fait, plutôt à un changement de domaine d'application. En effet, dans les deux cas, la problématique scientifique abordée reste la même et concerne l'exploitation de données pour induire un modèle exploitable pour l'aide à la décision, la supervision, le pilotage...



## *INTRODUCTION*

La collecte, l'exploitation et l'extraction de connaissance à partir de données n'est pas une idée neuve même si elle a évolué au cours du temps. Ainsi, par exemple, on estime qu'au VI<sup>e</sup> siècle av. J.C. Pythagore se serait appuyé sur les mesures du triangle rectangle 3-4-5 pour proposer une première preuve du théorème qui porte son nom (Cousquer, 1998). Au III<sup>e</sup> siècle avant J.C., Eratosthène parvint à mesurer la circonférence de la terre en exploitant comme données l'absence d'ombre au fond d'un puits à Syène lors du solstice d'été, la longueur de l'ombre formée par un obélisque à Alexandrie au même instant et la distance entre ces deux villes (Aujac, 2001). Plus proche de nous, au XIX<sup>e</sup> siècle, Mendel a conduit des expériences qui ont mis en évidence le caractère dominant ou récessif de certains gènes dans les pois. Pour cela il a cultivé 22 espèces de pois, sur 10 générations, pour réaliser 7 expériences mettant en jeu 5123 plants juste pour la première génération (Mendel, 1907). Actuellement, un processus de fonderie sous pression de la société PSA relativement classique produit 8000 pièces par semaines, et pour chaque pièce, archive 10 données (Thomas, et al., 2004).

Eratosthène a mis au minimum 1 an pour collecter les 3 données nécessaires à son étude. Mendel a collecté ses données pendant 10 ans, la fonderie de PSA produit 80000 données en 1 semaine et pour moins de 250 €, il est possible d'avoir une carte d'acquisition de données pouvant mettre en œuvre une fréquence d'échantillonnage de 3 MHz (Technology). C'est l'électronique et l'informatique qui ont permis d'améliorer la collecte de données dans des proportions hors du commun. Le passage du papier aux DVD ou disques durs en passant par les cartes perforées ou les bandes magnétiques a permis de faire exploser la capacité de stockage d'informations. Quand il y a dix ans, les responsables informatiques parlaient en kilooctets et en mégaoctets, un téléphone portable dispose aujourd'hui d'une capacité de stockage de plusieurs dizaine de giga-octets. Ce phénomène a conduit tout un chacun à stocker toutes les informations susceptibles d'être utiles un jour ce qui fait qu'on estime qu'actuellement la masse d'information dans le monde double toutes les 11 heures (IBM, 2006). Le secteur industriel est bien entendu

---

partie prenante dans cette explosion du stockage de données, et ce, pour répondre à des problèmes de traçabilité, de pilotage, de surveillance, etc.

Eratosthène ou Mendel ont passé la majeure partie de leur temps à collecter des données alors que la phase d'exploitation de ces données était proportionnellement très rapide. Le rapport s'est maintenant totalement inversé et la collecte de donnée est maintenant quasi immédiate et automatique. A l'inverse, le temps de traitement nécessaire pour transformer ces données en connaissance est devenu la phase la plus gourmande en temps humain. Ceci conduit au fait que, bien souvent, la seule utilité des données collectées est d'effectuer quelques calculs simples, tels que, comparaison à un seuil, calcul de moyennes et d'écart types, voire d'être simplement stockées en attente d'une utilisation éventuelle.

Ne peut-on pas faire mieux et plus avec ces données coûteuses à collecter et à conserver ? Répondre à cette question revient à aborder le concept de « data mining » qui est apparu au début des années 90 dans sa forme et sa compréhension actuelle. Il est courant de confondre « data mining » (fouille de données en français) et « knowledge discovery in database » (extraction de connaissances à partir de données en français). L'extraction de connaissances à partir de données (ECD) est un processus complexe se déroulant suivant une succession d'opérations alors que la fouille de données est l'une de ces étapes et correspond à l'art d'extraire des connaissances à partir de données. Il est ainsi nécessaire d'effectuer en amont de la fouille de données, un prétraitement ayant pour but de mettre en forme, sélectionner et nettoyer les données ou, traiter les données manquantes... (Zighed & Rakotomalala, 2000). Les principales approches de fouilles de données peuvent être classées en trois grandes catégories (Zighed & Rakotomalala, 2000) :

- les méthodes de description uni-, bi- et multidimensionnelles : issues de la statistique descriptive et de l'analyse de données,
- les méthodes de structuration : regroupant toutes les techniques d'apprentissage non supervisé et de classification automatique provenant des domaines de la reconnaissance de formes, de la statistique, de l'apprentissage automatique et du connexionnisme,
- les méthodes explicatives : qui ont pour but de relier un phénomène à expliquer à un phénomène explicatif. L'objectif est généralement d'extraire des modèles de classement ou de prédiction.

Les approches que nous allons présenter ici relèvent plus particulièrement des méthodes explicatives, et en particulier, de l'apprentissage automatique et du connexionnisme. Elles ont pour objectif principal de représenter la connaissance ainsi acquise par un modèle représentatif du domaine considéré, la structure du modèle pouvant varier en fonction de l'objectif final.

Comme expliqué précédemment, ces approches ont été appliquées dans un premier temps aux systèmes de transports avant d'être appliquées et étendues aux systèmes de production. Dans le cadre des systèmes de transports, j'ai exploité les formalismes des réseaux de neurones et des réseaux de Petri (RdP) pour traiter les données existantes fournies par les boucles magnétiques insérées dans la chaussée et dont les données sont sous employées afin de répondre à des problèmes de surveillance et de pilotage du trafic.

Dans le cadre des systèmes de production, j'ai abordé des problématiques de pilotage de flux de produits dans les systèmes logistiques. Dans les deux cas, des modèles de flux (véhicules ou produits) doivent être construits afin de pouvoir évaluer et piloter ces systèmes. Cependant, l'approche système contrôlé par le produit exploitée dans le deuxième cas induit certaines évolutions dans la construction et l'utilisation des modèles construits. En effet, dans le concept de système contrôlé par le produit (SCP), le produit embarque des capacités de communication et d'action lui permettant, entre autre, de synchroniser les flux physiques et d'informations. Cette caractéristique des SCP permet d'exploiter simultanément et simplement les données produits et les données du système de production afin d'élaborer des modèles de simulation contribuant à la traçabilité des biens et au pilotage de leurs flux... Un des points communs avec les systèmes de transport consiste en une grande somme de données archivées et pas toujours pleinement exploitée. Cependant si dans le cas des systèmes de transport, ces données sont de même nature (présence véhicule à l'emplacement de la boucle magnétique) il n'en est pas de même dans les systèmes de production. Aussi nous avons exploités les mêmes formalismes pour cette fois-ci, proposer une méthodologie et un outillage de réduction de modèle de simulation ou encore une stratégie de pilotage de flux de produits dans un contexte de système kanban.

La structure de ce mémoire est organisée en quatre chapitres. Le premier présente un curriculum vitae ainsi qu'une présentation synthétique des activités d'enseignement d'administration et de recherche faisant apparaître en particulier les encadrements d'étudiants et la production scientifique.

Le deuxième chapitre concerne mes activités de recherche menée au sein du SeT de 1999 à 2005. Il est organisé en deux axes traitant de l'apprentissage de comportements de modèles de trafic et de l'évaluation et du pilotage du trafic. La première partie traitera en particulier de la surveillance du trafic à base de modèles neuronaux et de l'estimation paramétrique de réseaux de Petri. Le deuxième axe se focalisera lui sur la modélisation microscopique et macroscopique du trafic et proposera une stratégie de contrôle d'un carrefour à feu.

Dans le chapitre suivant, les travaux menés au sein du CRAN de 2005 à aujourd'hui sont présentés. D'une manière similaire au chapitre précédent, ce chapitre est subdivisé en deux axes portant sur l'apprentissage de comportements de SCP et l'évaluation et le pilotage de SCP. Le premier axe traite principalement d'une stratégie de réduction de modèle de simulation exploitant une hybridation réseau de neurones – files d'attente. Des travaux portant sur le monitoring on-line de la qualité seront également présentés. Le deuxième axe présente une stratégie de contrôle de RdP qui est utilisée pour piloter un atelier géré avec un système Kanban.

Le dernier chapitre présente le projet de recherche que je me propose de piloter au sein de l'équipe Système à Intelligence Ambiante (SIA) du CRAN. Ce projet de recherche s'intéresse à la modélisation des systèmes éco-techniques. Ces systèmes sont des systèmes complexes « vivants » et donc évolutifs, évoluant dans un environnement changeant, communiquant (notion d'intelligence ambiante), récursifs et pouvant être constitués d'autres systèmes complexes. Cette structure récursive nécessite une modélisation à deux niveaux : un niveau local et un niveau global. Au niveau local, il est nécessaire d'être capable de traiter des données, connaissances, informations... de nature et de provenance différentes. Au niveau global, il est nécessaire d'être capable d'agréger et désagréger des données, mais également de déterminer la structure récursive, liant les sous-systèmes entre eux. L'application de cette approche de modélisation à deux niveaux (local et global) au problème de la modélisation et du pilotage de système SCP sera également présentée.

---

Chapitre

**I**

**I CURRICULUM VITAE ET NOTICE  
D'ACTIVITES**



## ***I.1 CURRICULUM VITAE GENERAL***

### ***I.1.1 État civil***

Nom patronymique : THOMAS  
Prénom : Philippe  
Date et lieu de naissance : 31 juillet 1969 à Lure (70)  
Nationalité : Française  
Obligation Militaire : Service militaire effectué du 1/11/93 au 1/08/94  
Situation familiale : Union libre, deux enfants (2004 - 2010)

### ***I.1.2 Coordonnées professionnelles***

#### ***I.1.2.1 Recherche***

CRAN Centre de Recherche en Automatique de Nancy                      Tél. +33 (0)3 83 68 44 30  
CNRS – UMR 7039                                                                              Fax. +33 (0)3 83 68 44 37  
Faculté des Sciences et Techniques – B.P. 239  
54506 – Vandœuvre-lès-Nancy Cedex  
Email : [philippe.thomas@univ-lorraine.fr](mailto:philippe.thomas@univ-lorraine.fr)

#### ***I.1.2.2 Enseignement***

IUT Épinal - Hubert Curien                                                              Tél. +33 (0)3 54 50 48 22  
7 rue des Fusillés de la résistance                                                      Fax. +33 (0)3 54 50 48 01  
88000 – Épinal

### ***I.1.3 Coordonnées personnelles***

20 rue du Puits                                                                                      Tél. +33 (0)3 83 61 46 42  
54710 Fléville devant Nancy                                                                      Por. +33 (0)6 03 30 33 75

### ***I.1.4 Situation actuelle***

Maître de Conférences à l'I.U.T. Épinal - Hubert Curien,  
Chef du département Génie Industriel et Maintenance, Université de Lorraine,  
Rattaché à la 61<sup>ème</sup> section du CNU.

---

Chercheur au Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN), CNRS-UMR 7039 dirigé par le Professeur Didier WOLF,

Département « Ingénierie des Systèmes Eco-Technique » (ISET) dirigé par les Professeurs Benoît IUNG et André THOMAS.

### ***1.1.5 Carrière***

2005	Maître de Conférences – Université de Lorraine (Emploi 61 <sup>ème</sup> section du CNU n°0643) I.U.T. Épinal – Hubert Curien Mutation le 01/09/2005 Dernière promotion au choix : Hors Classes 4 <sup>ème</sup> échelon le 1/09/2014
2003	Prime d’Encadrement Doctoral et de Recherche (PEDR), Date d’effet au 01/10/2003 pour une durée de 4 ans
1999	Maître de Conférences – Université de Technologie de Belfort – Montbéliard (Emploi 61 <sup>ème</sup> section du CNU n°0010) Nomination le 01/09/1999 Titularisation le 01/09/2000 Reclassement Classe normale 2 <sup>ème</sup> échelon le 01/06/2001
1998/99	Ingénieur de recherche – TIGA Technologies (Cergy – 95). Responsable technique du projet européen PRObabilistic NETworks and Learning (PRONEL).
1997/98	Attaché Temporaire d’Enseignement et de Recherche – UHP Nancy 1 – ESSTIN.
1995/97	Moniteur – UHP Nancy 1 – ESSTIN.
1994/97	Allocataire de Recherche – UHP Nancy 1 – CRAN.

1993/94 | Service Militaire – Centre de Sélection n°4 – Nancy

### ***1.1.6 Diplômes, titres et qualifications***

1997 | Doctorat de l'Université Henri Poincaré Nancy 1 – Spécialité Automatique  
 Date de soutenance : 5 Mars 1997  
 Titre : Contribution à l'identification de systèmes non linéaires par réseaux de neurones  
 Composition du jury :  
 Président : A. RICHARD Pr. à l'UHP Nancy 1  
 Rapporteurs : C. JUTTEN Pr. à l'Université Joseph Fourier de Grenoble ; T. DENOEUX Enseignant Contractuel Habilité à l'Université de Technologie de Compiègne  
 Examineurs : G. BLOCH MdC à l'UHP Nancy 1 ; C. HUMBERT Pr. à l'UHP Nancy 1 ; J.C. TRIGEASSOU Pr. à l'Université de Poitiers

1993 | Diplôme d'Études Approfondies (DEA)  
 Université Henri Poincaré Nancy 1  
 Spécialité : Automatique et Traitement Numérique du Signal  
 Rapport de recherche : Identification robuste de systèmes SISO linéaires et non linéaires. Approches paramétrique et neuronale  
 Rapport bibliographique : Les Méthodes d'identification de modèles linéaires robustes

1992 | Maîtrise Sciences et Techniques (MST)  
 Université Henri Poincaré Nancy 1  
 Spécialité : Automatique et Commande Numérique

1990 | Diplôme d'Études Universitaires Générales (DEUG)  
 Université Henri Poincaré Nancy 1  
 Spécialité : Sciences Pour l'Ingénieur

---

1988	Baccalauréat Série C Lycée polyvalent Georges Colomb – Lure (70)
------	---------------------------------------------------------------------

## I.2 ACTIVITES LIES A L'ENSEIGNEMENT

### I.2.1 Historique

De Septembre 1994 à septembre 1997, j'ai bénéficié d'un financement de type bourse MESR (Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche) afin de préparer une thèse. Dès la première année, j'ai réalisé des vacations avant de bénéficier d'un poste de moniteur de 1995 à 1997 à l'*ESSTIN (École Supérieure des Sciences et Technologies de l'Ingénieur de Nancy)*. Au cours de ces 3 années, j'ai assuré des TD et TP dans les domaines de l'informatique industrielle, du traitement du signal, et de la programmation sur microprocesseur.

A l'issue de ces 3 années de thèse, j'ai été recruté sur un poste d'ATER de septembre 1997 à Septembre 1998 à l'*ESSTIN*. Au cours de cette année, j'ai dispensé des cours de logique floue, et des TD et TP dans les domaines de l'informatique industrielle, le traitement du signal, et la programmation sur microprocesseur. J'ai d'autre part assuré des TD et TP aux étudiants du *DESS ATTI (Automatique, Télécommunication et Traitement du Signal)* à la *faculté des sciences, Université Henri Poincaré, Nancy I* portant sur le système d'exploitation UNIX et le langage C.

En 1999, j'ai été recruté sur un poste de Maître de Conférences rattaché au Département *Génie des Systèmes de Production (GSP)* à l'*Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM)* qui venait d'être créé suite au regroupement de deux écoles d'ingénieurs : l'ENI de Belfort et l'IPSE de Sévenans. Suite à cette restructuration, il fallait assurer un certain nombre de cours pour les anciens cursus amenés à disparaître tout en mettant en place de nouvelles unités de valeurs pour le nouveau cursus. Durant les années scolaires 1999/00 et 2000/01, j'ai ainsi construit et assuré des enseignements sous forme de cours TD et TP en électronique de puissance et électrotechnique ainsi qu'en sûreté de fonctionnement pour l'ancien cursus ENIb appelé à disparaître.

Parallèlement à mon implication dans les anciennes formations de l'ENIb, j'ai commencé dès septembre 1999 à prendre la responsabilité de plusieurs Unité de Valeurs UV. J'ai ainsi

repris la responsabilité d'une UV dédiée aux élèves ingénieurs de 3<sup>ème</sup> année du département *Génie Informatique (GI)* traitant des chaînes de mesures. J'ai d'autre part, construit et pris la responsabilité de 2 autres UV du département GSP portant respectivement sur la sûreté de fonctionnement et l'intelligence artificielle. Mon rôle de responsable d'UV était de trouver les intervenants susceptibles d'assurer les cours TD et TP, faire évoluer le programme pédagogique et gérer les jurys de ces UV. J'ai d'autre part assuré de 1999 à 2005 des enseignements en cours TD et TP dans d'autres UV dont je n'étais pas responsable portant notamment sur l'informatique industrielle, initiation aux réseaux, gestion de projet, pour les départements *GI* et *GSP*. Enfin, dans le cadre de l'école doctorale Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechnique commune à l'*UTBM* et à l'*Université de Franche-Comté*, j'ai donné des cours d'intelligence artificielle aux doctorants inscrits dans cette école doctorale.

En Septembre 2005, j'ai été muté à ma demande sur un poste de Maître de Conférences à l'*Université Nancy 2* où j'ai rejoint le département *Génie Industriel et Maintenance (GIM)* de l'*IUT d'Épinal – Hubert Curien*. Depuis cette date j'enseigne les modules d'automatisme et d'informatique industrielle ainsi que d'automatique aux étudiants de 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> années GIM. J'interviens également dans les deux licences professionnelles proposées au sein du département. Je dispense ainsi des TD de traitement du signal et d'instrumentation aux étudiants de la licence professionnelle *Automatique et Informatique Industrielle, spécialité Maintenance option Contrôle Non Destructif appliqué à la maintenance prévisionnelle (CND)*. J'interviens également dans le cadre de la licence professionnelle *Production Industrielle spécialité Eco – Conception en produit industriel Énergie Environnement (EC-2E)* pour dispenser des enseignements en Sûreté de Fonctionnement. Je suis également intervenu dans cinq autres formations où j'ai assuré des TP d'informatique pour des étudiants de 2<sup>ème</sup> année de *DUT Techniques de Commercialisation*, des cours et TD d'algorithmique pour des étudiants de 1<sup>ère</sup> année de *DUT Qualité Logistique Industrielle et Organisation*, des cours et TD d'informatique industrielle pour les étudiants de 1<sup>ère</sup> année de licence *Math-Info et Physiques-Chimie du CESS d'Épinal*. Je suis également intervenu dans 2 écoles d'ingénieurs. J'ai ainsi assuré des TD de statistiques aux élèves ingénieurs de 4<sup>ème</sup> année de l'*ESSTIN* et des cours d'intelligence artificielle pour des élèves ingénieurs de 5<sup>ème</sup> année de l'*ENSTIB*. Par ailleurs, j'ai participé à 2 sessions de formation qualifiante intitulée « *Conception et maintenance des systèmes de production d'énergie* » à destination des demandeurs d'emplois où j'ai assuré des cours d'automatisme et d'informatique industrielle.

De Septembre 2008 à Septembre 2011, j'ai assuré la direction des études de la licence professionnelle *EC-2E*.

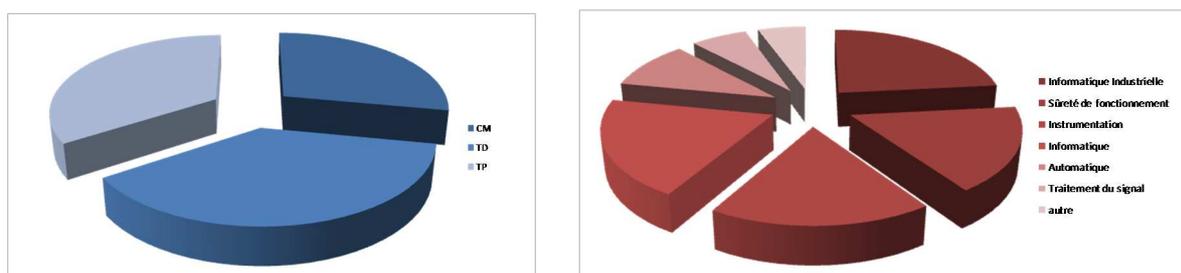
Suite au projet de création de *l'Université de Lorraine*, j'ai piloté le projet de regroupement de 2 licences professionnelles, *EC-2E* et *Eco-Gestion des Énergies Renouvelable Énergie Électrique Environnement (EGER)*, dispensées respectivement sur les sites de *l'IUT Épinal Hubert Curien* et de la *faculté des sciences et techniques de Vandœuvre*.

Dans le dossier de réhabilitation que j'ai rédigé, ces deux licences sont regroupées dans une même spécialité *EC-2E* sous ma responsabilité et cette nouvelle spécialité est organisée en un tronc commun et deux parcours *EGER* et *Eco Conception Eco Construction Energie Environnement (EC<sup>2</sup>)*.

D'autre part, depuis septembre 2011, j'ai pris la responsabilité de chef du département *GIM* de *l'IUT Épinal Hubert Curien*. Depuis cette date, j'ai notamment dû rédiger le dossier d'évaluation du département pour son évaluation.

### ***1.2.2 Enseignements dispensés et volume horaire***

Jusqu'à présent, j'ai assuré des enseignements dans des domaines pouvant être reliés aux 26<sup>ème</sup>, 27<sup>ème</sup>, 61<sup>ème</sup> et 63<sup>ème</sup> sections. Du fait de ma demande de mutation en 2005, j'ai assuré des enseignements à des publics très divers allant des étudiants de DUT à des doctorants en passant par toutes les années d'école d'ingénieurs. La figure 1 présente la répartition des enseignements dispensés selon le type (cours, TD, TP) et le domaine. La table 1 présente un récapitulatif de tous les enseignements dispensés à ce jour.



**Figure 1 : Répartition des enseignements**  
- a - selon le type (CM – TD – TP) - b - selon le domaine

années	niveau	public	module	type	Nb	HeqTD
1994/98	L	3A ESSTIN	Electronique Informatique industrielle	TD	18	71
				TP	80	
	M	4A ESSTIN	traitement du signal	TD	64	112
				TP	72	
	M	4A ESSTIN	Microprocesseur	TP	120	80
	M	5A ESSTIN	Logique floue	CM	12	18
	M	DESS ATTI	UNIX - Langage C	TD	16	27
				TP	16	
1999/05	M	5A ENIb	Electronique de puissance - Electrotechnique	CM	60	130
				TP	60	
	M	5A ENIb	Sûreté de Fonctionnement	CM	36	138
				TD	84	
	L	3A UTBM	Chaîne de mesures	CM	130	286
				TD	55	
				TP	54	
	L	3A UTBM	Automatisme et Informatique Industrielle	CM	46	173
				TD	64	
				TP	60	
	M	4A UTBM	Réseaux	TD	48	48
	M	5A UTBM	Sûreté de Fonctionnement	CM	112	332
				TD	164	
	M	5A UTBM	Intelligence Artificielle	CM	88	260
				TP	192	
	M	5A UTBM	Gestion de projet	TD	16	16
	D	Ecole doctorale	Intelligence Artificielle	CM	13	20
2005/14	L	1A DUT GIM	Automatisme et Informatique Industrielle	CM	140	508
				TD	202	
				TP	144	
	L	1A Licence MI + PC	Automatisme et Informatique Industrielle	CM	40	140
				TD	80	
		Formation qualifiante	Automatisme et Informatique Industrielle	TD	25	25
	L	1A DUT QLIO	Algorithmique	CM	10	31
				TD	16	
	L	2A DUT GIM	Instrumentation	CM	90	327
				TD	72	
				TP	180	
	L	2A DUT GIM	Automatique	CM	178	413
				TD	146	
	L	2A DUT TC	Informatique	TP	320	213
	L	Lpro CND	traitement du signal	TD	94	94
	L	Lpro CND	Instrumentation	TD	40	40
	L	Lpro EC-2E	Sûreté de Fonctionnement	TD	120	120
M	4A ESSTIN	Statistiques	TD	30	30	
M	5A ENSTIB	Intelligence Artificielle	CM	24	36	
Total heures equivalent TD :					3688	

Tableau 1 : Récapitulatif des enseignements dispensés

### ***1.2.3 Activités d'encadrement***

Encadrement d'étudiants du DUT GIM depuis 2005

- 23 étudiants en projet tuteurés
- 17 étudiants en stage de 2<sup>ème</sup> année

Encadrement de stages d'étudiants de Licence Professionnelle depuis 2005

- 11 étudiants de Licence Professionnelle CND
- 22 étudiants de licence Professionnelle EC-2E

Encadrement de projet d'initiation à la recherche pour des étudiants de 2<sup>ème</sup> année ESIAL depuis 2009

- 5 étudiants en PIDR

Encadrement de projet d'étudiants de 3<sup>ème</sup> année ENSTIB depuis 2005

- 8 étudiants en projet tuteurés

Encadrement de stages d'étudiants de 5<sup>ème</sup> année UTBM de 1999 à 2005

- 28 étudiants en stage de 5<sup>ème</sup> année

### ***1.2.4 Participation à des jurys***

Jury de DUT durant les années scolaires : 2006-2007 ; 2007-2008 ; 2008-2009 ; 2009-2010 ; 2010-2011 ; 2011-2012 ; 2012-2013, 2013-2014

Jury de licence professionnelle durant les années scolaires : 2008-2009 ; 2009-2010 ; 2010-2011 ; 2011-2012 ; 2012-2013, 2013-2014

Président de jury de licence professionnelle EC-2E : 2011-2012 ; 2012-2013 ; 2013-2014

Jury de VAE

- DUT Génie Industriel et Maintenance
  - o Patrick DECKER 2007/08
  - o Serge VAN DER WECKENE 2007/08
- Licence professionnelle Maintenance option Contrôle Non Destructifs
  - o Fabien LAFOND 2008/09

### ***1.2.5 Activités administratives liés à l'enseignement***

- Chef du département GIM depuis septembre 2011
  - o Élaboration du dossier d'évaluation du département vague 2013-2017

- Élaboration d'un dossier de formation qualifiante financée par la région ciblant le public des demandeurs d'emploi intitulée : « *Conception et maintenance des systèmes de production d'énergie* ».
- Pilotage du rapprochement de 2 licences professionnelles, EC-2E, EGER, fonctionnant sur 2 sites (IUT Epinal et faculté des sciences) sous une seule spécialité Éco conception Énergie Environnement (EC-2E) organisée en 2 parcours :
  - Eco-Conception Eco-Construction Energie Environnement (EC2)
  - Eco-Gestion des Energies Renouvelables – Energie Electrique – Environnement (EGER).
- Responsabilité de la licence professionnelle EC-2E depuis 2012.
- Pilotage du projet de création d'un DUT Packaging Emballage Conditionnement par apprentissage à l'IUT Epinal Hubert Curien.
- Directeur des études de la licence professionnelle EC-2E 2008-2011
- Responsable de la communication du département GIM de 2006 à 2008.
- Membre élu du conseil du collegium Technologie de l'université de Lorraine depuis 2012.
- Membre élu du conseil d'institut de l'IUT Épinal – Hubert Curien 2007-2012.
- Membre du conseil restreint de l'IUT Épinal – Hubert Curien 2007-2012.
- Président du conseil restreint de l'IUT Épinal – Hubert Curien 2009-2010.
- Membre élu du bureau du département Génie des Systèmes de Production (GSP) de l'UTBM de 2001 à 2005.
- Participation à un projet de création de Diplôme Universitaire Logistique Interne en alternance au sein de l'UTBM.
- Coorganisateur des "Journées d'Actualisation en Ingénierie des Systèmes de PROduction 1998 JAISPRO'98". (évaluation des stages de fin d'année des élèves ingénieurs de l'ESSTIN).

### *I.3 ACTIVITES LIES A LA RECHERCHE*

#### *I.3.1 Historique*

En septembre 1992, j'ai intégré le Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN – CNRS UMR 7039) pour y préparer un *Diplôme d'Études Approfondies en Automatique et Traitement numérique du Signal* puis une thèse de doctorat au sein de l'équipe d'Automatique Symbolique et Neuromimétique sous la responsabilité conjointe des professeurs Gérard Bloch et Claude Humbert. A l'issue de ma thèse soutenue en mars 1997, j'ai effectué une année d'attaché temporaire d'enseignement et de recherche au sein de la même équipe. J'ai ensuite rejoint la société TIGA Technologies durant une année en tant qu'ingénieur de recherche où j'étais plus particulièrement en charge du projet européen PRObabilistic NETwork and Learning (PRONEL).

J'ai été nommé Maître de Conférences à *l'UTBM* en septembre 1999. A mon arrivée au sein de cette université nouvellement créée, la politique de recherche de l'établissement était en train d'être redéfinie. Les objectifs de cette restructuration étaient de constituer quelques laboratoires ayant pour caractéristique principale un engagement fort sur le domaine applicatif « transport terrestre ». J'ai donc contribué aux réflexions d'un groupe de chercheurs pour proposer la création d'une équipe de recherche travaillant sur le transport terrestre. Ces réflexions ont conduit en 2000 à la reconnaissance du laboratoire Systèmes et Transports (SeT) comme équipe d'accueil n° EA3317 par le ministère. Le SeT est un laboratoire multidisciplinaire regroupant principalement des chercheurs venant des communautés 27<sup>ème</sup> et 61<sup>ème</sup>. Au sein de ce laboratoire, j'ai plus particulièrement participé aux travaux de l'axe « surveillance ». Au sein de cet axe, nous nous intéressons à la surveillance du trafic urbain et interurbain.

En septembre 2005, afin de me rapprocher de ma compagne, j'ai demandé et obtenu une mutation pour rejoindre l'I.U.T. Épinal – Hubert Curien qui est une composante de *l'Université Nancy 2*. *L'Université Nancy 2* ne possédant pas de laboratoire susceptible de m'accueillir, j'ai alors rejoint le CRAN et plus particulièrement le groupe thématique « SYstèmes de Production Ambiants » (SYMPA). J'ai également participé aux travaux de l'Équipe de Recherche Technologique « TRACabilité et impact des nouvelles technologies d'Identification et de contrôle des produits sur les modes de gestion des chaînes LOGISTIques des filières fibres » (TRACILOGIS). Dans ce cadre, je me suis intéressé à des problèmes de

gestion de production en considérant plus particulièrement le concept Système Contrôlé par le Produit, activité que j'ai poursuivie au sein de l'équipe projet « Système Produit » du GT SYMPA.

### ***1.3.2 Activités administratives relatives à la recherche***

#### *1.3.2.1 Fonctions électives*

Membre élu de la commission de spécialistes mixte, sections 25 ; 26 ; 27 ; 61 et 63 de l'Université de Technologie de Belfort Montbéliard (2001 à 2003).

Membre élu de la commission de spécialistes mixte, sections 61 et 63 de l'Université de Haute Alsace (2001 à 2007).

Membre élu de la commission de spécialistes mixte, sections 31 ; 60 ; 61 ; 62 ; 63 de l'université Nancy 2 (2006-2008).

Membre élu du conseil scientifique du laboratoire SeT (2000 à 2003).

#### *1.3.2.2 Comité de sélection*

Membre du comité de sélection pour le recrutement d'un poste de Maître de Conférences à l'ENSTIB – Université de lorraine en 2012.

Président du comité de sélection pour le recrutement d'un poste de Maître de Conférences à l'IUT d'Epinal Hubert Curien – Université de lorraine en 2012.

#### *1.3.2.3 Participation à des comités d'organisations*

10<sup>ème</sup> Conférence Internationale de Modélisation et Simulation MOSIM'14 (Nancy, 5 – 7 novembre 2014). Cette conférence a pour thème « Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes : De l'économie linéaire à l'économie circulaire ».

7<sup>ème</sup> Conférence Internationale de Modélisation et Simulation MOSIM'08 (Paris, 31 mars – 2 avril 2008). Cette conférence avait pour thème « Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes : Communication, Coopération et Coordination ». Plus de 200 chercheurs francophones y ont présenté leurs travaux.

2<sup>ème</sup> Journée Technique du laboratoire SeT (UTBM, 23 mai 2002). Cette journée avait pour thème « La sécurité dans les transports terrestres ». Elle comportait 8 exposés de chercheurs, d'industriels et d'organismes et collectivités. Une centaine de personnes se sont inscrites.

---

1<sup>ère</sup> Journée Technique du laboratoire SeT (UTBM, 7 juin 2001). Cette journée avait pour thème « Transport urbain et multi modalité ». Elle comportait 8 exposés de chercheurs, d'industriels, d'organismes et collectivités. Une soixantaine de personnes se sont inscrites.

#### *1.3.2.4 Participation à des comités de programme*

Journées Doctorales MACS 2011 JDMACS'11 (Marseille, 6 – 10 juin 2011).

#### *1.3.2.5 Présidence de sessions dans des colloques*

- |      |                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2001 | IFDICON'01 – European Workshop on Intelligent Forecasting, Diagnosis and CONTROL, Santorin (Grèce), 24-28 juin 2001.<br>Titre de la session : « Neural network based techniques »                                                                                         |
| 2004 | MMM'04 – 11 <sup>th</sup> IFAC Symposium on Automation in Mining Mineral and Metal processing, Nancy (France), 8-10 septembre 2004.<br>Titre de la session : « Operation condition monitoring and quality management »                                                    |
| 2005 | WC IMACS'05 – 17 <sup>th</sup> IMACS World Congress Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation, Paris (France), 11 - 15 Juillet 2005.<br>Titre de la session : « Petri nets approach and applications »                                                   |
| 2008 | MOSIM'08 – 7 <sup>ème</sup> Conférence Internationale de Modélisation et Simulation, Paris (France), 31 mars – 2 avril 2008.<br>Titre de la session : « Simulation des réseaux logistiques et d'affaires pour la conception de systèmes de pilotage et de collaboration » |
| 2012 | MOSIM'12 – 9 <sup>ème</sup> Conférence Internationale de Modélisation et Simulation, Bordeaux (France), 6 – 8 juin 2012.<br>Titre de la session : « Ambient intelligence for complex systems »                                                                            |
| 2013 | IESM'13 – 5 <sup>th</sup> International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, Rabat (Maroc), 28 – 30 octobre 2013.                                                                                                                                 |

	Titre de la session : « Data-driven simulation for production control systems »
2013	IJCCI'13 – 5 <sup>th</sup> International Joint Conference on Computational Intelligence, Vilamoura (Portugal), 20 – 22 September 2013
	Titre de la session : « session régulière »

#### *1.3.2.6 Expertise scientifique*

Expertise scientifique du projet ANR « EHIS3 » pour le programme blanc international II, édition 2012.

#### *1.3.2.7 Critique scientifique pour publications*

Relecture pour des revues :

- International Journal on Intelligent Automation and Soft Computing
- Journal of Intelligent Manufacturing
- Production Planning and Control
- Engineering Applications of Artificial Intelligence
- IEEE Transactions on Neural Networks
- IEEE Transactions on Industrial Informatics
- Integrated Computer-Aided Engineering

Relecture pour des congrès :

- IESM'07
- MOSIM'08
- ACC'09
- IESM'09
- JD – JN MACS'09
- IEEE MSC'09
- CIE39 2009
- CIFA'10
- MOSIM'10
- JD – JN MACS'11
- MOSIM'12
- IESM'13

- MOSIM'14

Ecriture d'articles de critique d'ouvrages :

- Automatica
- Control Engineering Practice
- IEEE Transactions on Neural Networks

### *1.3.2.8 Participation à des jurys de thèses*

Sadok TURKI pour la thèse de l'Université Paul Verlaine de Metz,

Sujet : « Optimisation de systèmes de production avec prise en compte des contraintes industrielles »

Soutenue publiquement le 7 décembre 2010

Jury :

*Président* : Pr. A. El Moudni Université de Technologie de Belfort-Montbéliard,  
*Rapporteurs* : Pr. X. Xie, ENSM Saint Etienne,  
Pr. A. El Moudni Université de Technologie de Belfort-Montbéliard,  
*Examineurs* : Dr. N. Cheikhrouhou EPFL Lausanne,  
MdC P. Thomas Université Nancy 2,  
Pr. N. Sauer Université Paul Verlaine de Metz,  
MdC S. Hennequin Université Paul Verlaine de Metz.

### ***1.3.3 Activités d'encadrement***

#### *1.3.3.1 Encadrement de thèses*

Co encadrement de Nadhir MESSAI pour la thèse de l'Université de Technologie de Belfort – Montbéliard,

Sujet : « Surveillance du trafic urbain et interurbain à base de modèles neuronaux »

Soutenue publiquement le 17 décembre 2003

(50 % d'encadrement, Directeurs : D. Lefebvre ; A. El Moudni)

Jury :

*Président* : Pr. J.M. Henrioud Université de Franche-Comté,  
*Rapporteurs* : Pr. R. Lengellé, Université de Technologie de Troyes,  
Pr. J. Ragot Institut National Polytechnique de Lorraine

*Examineurs :* Pr. A. El Moudni Université de Technologie de Belfort-Montbéliard,  
Pr. D. Lefebvre Université Le Havre,  
MdC P. Thomas Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

*Invité :* MdC. J.M. Thiriet Université Henri Poincaré Nancy 1

Position actuelle : Maître de Conférences à l'Université de Reims Champagne – Ardennes.

Co encadrement de Cherif TOLBA pour la thèse de l'Université de Technologie de Belfort – Montbéliard,

Sujet : « Contribution à l'utilisation des réseaux de Petri pour la modélisation et la régulation du trafic urbain et interurbain »

Soutenue publiquement le 17 décembre 2004,

(30 % d'encadrement, Directeurs : D. Lefebvre ; A. El Moudni)

Jury :

*Président :* Pr. R. Outbib Université de Technologie de Belfort-Montbéliard,

*Rapporteurs :* Pr. D. Jolly, Université d'Artois,  
Pr. S. Hammadi École Centrale de Lille

*Examineurs :* Pr. A. El Moudni Université de Technologie de Belfort-Montbéliard,  
Pr. D. Lefebvre Université Le Havre,  
MdC P. Thomas Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Position actuelle : Enseignant chercheur à l'université d'Annaba – Algérie.

Co encadrement de Mélanie NOYEL pour la thèse de l'Université de Lorraine (début septembre 2012),

Sujet : « Décision réactive par informations portées par les produits dans un système complexe de production et de logistique de mobiliers »

Soutenance prévue en 2015.

(40 % d'encadrement, Directeurs : A. Thomas – P. Charpentier)

Thèse CIFRE en collaboration avec la société ACTA mobilier

### *1.3.3.2 Encadrement de DEA*

Encadrement de Nadhir MESSAI pour le DEA Informatique, Automatique et Productique de l'Université de Franche Comté, Septembre 2000.

---

Sujet : « Modélisation et surveillance du trafic urbain par réseaux de neurones »,

Encadrement de Daniel SCHLEGEL pour le DEA Informatique, Automatique et Productique de l'Université de Franche Comté, Septembre 2000.

Sujet : « Caractérisation et simulation du mouvement humain »,

Encadrement de Ludovic CLERAY pour le DEA Informatique, Automatique et Productique de l'Université de Franche Comté, Septembre 2001.

Sujet : « Prototypage de SMA pour la simulation d'un carrefour urbain en vue de sa surveillance ».

### *1.3.3.3 Encadrement de Master Recherche*

Encadrement de Mélanie NOYEL pour le master Ingénierie de Systèmes Complexes de l'Université Henri Poincaré Nancy 1, septembre 2011.

Sujet : « Décision logistique par RFID ».

Encadrement de Nicolas FRESSARD pour le master Ingénierie de Systèmes Complexes de l'Université de Lorraine, soutenance prévue septembre 2014.

Sujet : « Etude et modélisation des flux d'urgence dans une ligne de production innovante ».

Encadrement de Pierre GASS pour le master Ingénierie de Systèmes Complexes de l'Université de Lorraine, soutenance prévue septembre 2014.

Sujet : « Méthode de conception du programme directeur de scieries de bois de résineux ».

### *1.3.3.4 Encadrement de projets d'école d'ingénieurs*

Encadrement de projets de 3<sup>ème</sup> année ingénieurs ENSTIB

- Rodolphe BAROTH et Etienne CADOT en 2005/06

Sujet : « Modélisation d'une plateforme logistique par Réseau de Petri »,

- Sébastien LIEBER et Pierre-Joris MANDAVID en 2006/07

Sujet : « Modélisation d'une plateforme logistique par Réseau de Petri Coloré »,

- Jonathan JUNG et Jonathan PERNOT en 2007/08

Sujet : « Modélisation de la plateforme ERT Tracilog sur le logiciel ARENA »,

- Axel GRISART et Damien WYFFELS en 2008/09

Sujet : « Mise en pratique d'un ordonnancement en temps réel »,

- Thomas PISANESCHI et Mélanie NOYEL en 2010/11

Sujet : « Décision logistique par RFID ».

Encadrement de projets d'initiation à la recherche de 2<sup>ème</sup> année ingénieurs ESIAL

- Bertrand VERMANDE et Laila HASSANI en 2009/10

Sujet : « Calcul de temps unitaire de fabrication de pièces à l'aide de méthodes mathématiques »,

- Ayed DOUHA et Aloui HOUSSEM en 2010/11

Sujet : « Développement d'une toolbox réseaux de neurones sous Scilab ».

- Zaid ZOUBEIR en 2012/13

Sujet : « Calcul de temps unitaire de fabrication de pièces à l'aide de méthodes mathématiques robustes ».

### ***1.3.4 Liste des publications et communications***

#### *1.3.4.1 Bilan des publications*

	Thèse	SeT	CRAN	
	1994-1998	1999-2005	2006-2014	total
Revue internationale	2	6 (3)	5	13
Revue nationale	0	1 (1)	1	2
Chapitres d'ouvrages	0	0	1	1
Congrès internationaux	7	14 (9)	11 (3)	32
Congrès nationaux	0	7 (4)	8 (1)	15

**Tableau 2. Bilan annuel des publications – entre parenthèses, les publications relatives aux encadrements de thèses**

#### *1.3.4.2 Publications dans des revues internationales avec comité de lecture*

[1.1] Bloch G., Ouladsine M., Thomas P. (1995). On-line fault diagnosis of dynamic systems via robust parameter estimation. *Control Engineering Practice*, Vol.3, 12, 1709-1717.

[1.2] Bloch G., Thomas P., Theilliol D. (1997). Accommodation to outliers in identification of non-linear SISO systems with neural networks. *Neurocomputing*, Vol.14, 1, 85-99.

- 
- [1.3] Thomas P., Bloch G., Sirou F., Eustache V. (1999). Neural modeling of an induction furnace using robust learning criteria. *Journal of Integrated Computer Aided Engineering*, Vol.6, 1, 15-25.
- [1.4] Messai N., Thomas P., Lefebvre D., El Moudni A. (2002). Optimal neural networks architectures for the flow-density relationships of traffic models. *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol.60, 401-409.
- [1.5] Thomas P., Lefebvre D. (2002). Fault detection and isolation in non-linear systems by using oversized neural networks. *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol.60, 181-192.
- [1.6] Messai N., Thomas P., Lefebvre D., El Moudni A. (2005). Neural networks for local monitoring of traffic magnetic sensors. *Control Engineering Practice*, Vol.13, 1, 67-80.
- [1.7] Lefebvre D., Thomas P. (2005). Parameters estimation for timed and continuous Petri nets: application to the identification and monitoring of hybrid systems. *Cybernetics and Systems*, Vol.36, 3, 217-250.
- [1.8] Tolba C., Lefebvre D., Thomas P., El Moudni A. (2005). Continuous and timed Petri nets for the macroscopic and microscopic traffic flow control. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol.13, 5, July, 407-436.
- [1.9] Thomas P., Thomas A. (2011). Multilayer perceptron for simulation models reduction: Application to a sawmill workshop. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol.4, 4, June, 646-657.
- [1.10] Thomas P., Thomas A., Suhner M.C. (2011). A neural network for the reduction of a Product Driven System emulation model. *Production Planning and Control*, Vol.22, 8, 767-781.
- [1.11] Thomas P., Suhner M.C., Thomas A. (2013). Variance Sensitivity Analysis of Parameters for Pruning of a Multilayer Perceptron: Application to a Sawmill Supply Chain Simulation Model. *Advances in Artificial Neural Systems*. <http://www.hindawi.com/journals/aans/2013/284570/>
- [1.12] Lefebvre D., Leclercq E., Druaux F., Thomas P. (2013). Gradient-based controllers for timed continuous Petri nets. *International Journal of Systems Science*. <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207721.2013.827264#.UtfGHrRdw18>

- [1.13] Thomas P., Suhner M.C., (2014). A new multilayer perceptron pruning algorithm for classification and regression applications. *Neural Processing Letters*. DOI : 10.1007/s11063-014-9366-5, <http://link.springer.com/article/10.1007/s11063-014-9366-5>.

Publications soumises :

- [1.14] Thomas P., Noyel M., Charpentier P., Thomas A., (soumise). Combined use of different types of classifiers to improve the accuracy of an ensemble classifier, with an application to an on-line quality monitoring problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*.

*I.3.4.3 Publications dans des revues francophones avec comité de lecture*

- [2.1] Tolba C., Lefebvre D., Thomas P., El Moudni A. (2005). Approche multi modèles pour la commande des feux de trafic. *e-STA*, Vol.2, 2.
- [2.2] Tolba C., Lefebvre D., Thomas P., El Moudni A. (2008). Commande des feux de signalisation par réseaux de Petri hybrides. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 579-612, Vol.42, 5, 579-612, 2008.

*I.3.4.4 Book review pour des revues internationales avec comité de lecture*

- [3.1] Thomas P. (2002). System design through MATLAB, control toolbox and SIMULINK by Krishna K. Singh and Gayatri Agnihotri." *Automatica*, Vol.38, 3, 563-564.
- [3.2] Thomas P. (2002). Fault detection and diagnosis in engineering systems by Janos J. Gertler. *Control Engineering Practice*, Vol.10, 3, 1037-1038.
- [3.3] Thomas P. (2009). Semi-Supervised Learning edited by O. Chapelle, B. Schölkopf and A. Zien. *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 20, 3, 542.

*I.3.4.5 Chapitres d'ouvrages*

- [4.1] Thomas P., Thomas A. (2013). An Approach to Data Mining for Product-driven Systems. in *Service Orientation in Holonic and Multi-agent Manufacturing and Robotics* (Borangiu T., Thomas A., Trentesaux D. Eds.), Springer, Berlin.

---

*I.3.4.6 Communications dans des colloques internationaux avec comité de lecture*

- [5.1] Bloch G., Theilliol D., Thomas P. (1994). Robust identification of non-linear SISO systems with neural networks. *10<sup>th</sup> IFAC Symp. on System Identification SYSID'94*, Vol.3, 483-488, Copenhagen, Denmark, July 4-6.
- [5.2] Bloch G., Theilliol D., Thomas P. (1994). Simultaneous detection, location and identification of faults for dynamics systems. *IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS'94*, Vo.1, 59-63, Espoo, Finland, June 13-15.
- [5.3] Bloch G., Thomas P., Ouladsine M., Lairi M. (1996). On several outlier-robust training rules of neural networks for identification of non-linear systems. *8<sup>th</sup> International Conference on Neural Networks and their Applications NEURAP'95/96*, 13-19, Marseille, France, March 20-22.
- [5.4] Thomas P., Bloch G. (1996). From batch to recursive outlier-robust identification of non-linear dynamic systems with neural networks. *IEEE International Conference on Neural Networks ICNN'96*, Vol.1, 178-183, Washington, DC, USA, June 3-6.
- [5.5] Thomas P., Bloch G. (1997). Initialization of one hidden layer feedforward neural networks for non-linear system identification. *15<sup>th</sup> IMACS World Congress on Scientific Computation, Modelling and Applied Mathematics WC'97*, Vol.4, 295-300, Berlin, Germany, August 25-29.
- [5.6] Thomas P., Bloch G. (1998). Robust pruning for multilayer perceptrons. *IMACS/IEEE Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications CESA'98*, Vol.4, 17-22, Nabeul-Hammamet, Tunisia, April 1-4.
- [5.7] Thomas P., Bloch G., Humbert C. (1998) A multistage on-line learning rule for multilayer neural network. *European Symposium on Artificial Neural Networks ESANN'98*, 279-284, Bruges, Belgium, April 22-24.
- [5.8] Lefebvre D., Thomas P., Thiriet J.M., Messai N., El Moudni A. (2000). A Model-based traffic monitoring by means of neural networks. *39<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control CDC'00*, 3541-3546, Sydney, Australie, December 12-15.
- [5.9] Messai N., Thomas P., Lefebvre D., El Moudni A. (2001). Structure and weight initialization of feed-forward networks for traffic flow-density relationships. *IEEE Int. Joint Conf. Neural Network IJCNN'01*, 2059-2064, Washington, DC, USA, July 15-19.

- 
- [5.10] Tolba C., Lefebvre D., Thomas P., El Moudni A. (2001). Continuous Petri nets models for the analysis of traffic urban networks. *IEEE Systems Man and Cybernetics SMC'01*, 1323-1328, Tucson, USA, October 7-10.
- [5.11] Lefebvre D., Thomas P. (2001). Fuzzy granular systems for the modeling of road traffic networks. *IEEE Systems Man and Cybernetics SMC'01*, 1329-1334, Tucson, USA, October 7-10.
- [5.12] Tolba C., Lefebvre D., Thomas P., El Moudni A. (2002). Continuous Petri nets for the microscopic modeling of traffic flow. *Summer Computer Simulation Conference SCSC'02*, San Diego, California, USA, July 14-18.
- [5.13] Messai N., Thomas P., Lefebvre D., El Moudni A. (2002). A neural network approach for freeway traffic flow prediction. *IEEE Int. Conf. on Control Applications CCA'02*, 984-989, Glasgow, Scotland, September 18-20.
- [5.14] Lefebvre D., Leclercq E., Druaux F. Thomas P. (2003). Source and sink transitions controllers for continuous Petri nets: a gradient – based approach. *IFAC Conf. on Analysis and Design of Hybrid Systems ADHS'03*, 229-234, Saint-Malo, France, June 16-18.
- [5.15] Tolba C., Lefebvre D., Thomas P., El Moudni A. (2003). Performances evaluation of the traffic control in a single crossroad by Petri nets. *IEEE Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation ETFA'03*, 157-160, Lisbon, Portugal, September 16-19.
- [5.16] Messai N., Thomas P., El Moudni A., Leclercq E., Druaux F., Lefebvre D. (2003). Feed-forward and RTRL neural networks for the macroscopic traffic flow prediction and monitoring: the potential of each other. *IEEE 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Intelligent Transportation System ITSC'03*, 199-204, Shangai, China, October 12-15.
- [5.17] Tolba C., Lefebvre D., Thomas P., El Moudni A. (2003). Hybrid Petri nets for traffic signal control. *3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Transport System Telematics TST'2003*, Katowice, Poland, November 13-15.
- [5.18] Thomas P., Suhner M.C., Meutelet B., Brachotte G. (2004). Quality monitoring of a high pressure die casting process based on bayesian and neural networks. *11<sup>th</sup> IFAC Symposium on automation in Mining Mineral and Metal processing MMM'04*, Nancy, France September 8-10.

- 
- [5.19] Lefebvre D., Thomas P., Leclercq E., Druaux F. (2005). Flow control for continuous Petri net models of HDS: Stability issues. *16<sup>th</sup> IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic, July 4-8.
- [5.20] Tolba C., Lefebvre D., Thomas P., El Moudni A. (2005). Crossroad traffic lights control based on hybrid Petri net model. *17<sup>th</sup> IMACS'2005 World Congress*, Paris, France, July 11-15.
- [5.21] Thomas P., Lefebvre D. (2005). Traffic flow monitoring based on parameters estimation with continuous Petri net models. *17<sup>th</sup> IMACS'2005 World Congress*, Paris, France, July 11-15.
- [5.22] Messai N., Thomas P., Lefebvre D., Riera B. (2006). Fault detection for HDS by means of neural networks: Application to two tanks hydraulic system. *6<sup>th</sup> IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes SAFEPROCESS'06*, Beijing, P.R. China, August 29-September 1, 1039–1044.
- [5.23] Thomas P., Choffel D., Thomas A. (2008). Simulation Reduction Models Approach Using Neural Network. *10<sup>th</sup> International Conference on Computer Modelling and Simulation EUROSIM'08*, Cambridge, Royaume-Uni, 1 – 3 avril.
- [5.24] Thomas P., Thomas A., Suhner M.C. (2009). Reduction of Product Driven System emulation models based on neural network: impact of discrete data. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM'09*, Montréal, Canada, 13 – 15 mai.
- [5.25] Thomas P., Thomas A. (2009). How deals with discrete data for the reduction of simulation models using neural network. *13<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM'09*, Moscou, Russie, 3 – 5 juin.
- [5.26] Thomas P., Thomas A., Belmokhtar S. (2011). Petri net control of a kanban loop. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM'11*, Metz, France, 25 – 27 mai.
- [5.27] Thomas P., Thomas A. (2012). One approach of data-mining for Product Driven Systems. *14<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM'12*, Bucharest, Roumanie, 23 – 25 mai.

- 
- [5.28] Noyel M., Thomas P., Charpentier P., Thomas A. Beauprêtre B. (2013). Improving production process performance thanks to neuronal analysis. *11<sup>th</sup> IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems IMS'13*, Sao Paulo, Brazil, 22 – 24 mai.
- [5.29] Thomas P., Noyel M., Suhner M.C., Charpentier P., Thomas A. (2013). Neural Networks ensemble for quality monitoring. *5<sup>th</sup> International Joint Conference on Computational Intelligence IJCCI'13*, Vilamoura, Portugal, 20 – 22 septembre, 515-522.
- [5.30] Noyel M., Thomas P., Charpentier P., Thomas A., Brault T. (2013). Implantation of an on-line quality process monitoring. *5<sup>th</sup> International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM'13*, Rabat, Maroc, 28 – 30 octobre.
- [5.31] Thomas P., Suhner M.C., Thomas A. (2014). CART for supply chain simulation models reduction: Application to a sawmill internal supply chain. *International Conference Advances in production Management Systems APMS'14*, Ajaccio, France, 20 – 24 Septembre.
- [5.32] Noyel M., Thomas P., Thomas A., Charpentier P., Brault T. (2014). Flow disturbance analysis in workshops with high reworks rate. *International Conference Advances in production Management Systems APMS'14*, Ajaccio, France, 20 – 24 Septembre.
- [5.33] Thomas P., Derigent W., Suhner M.C. (2014). Prediction model adaptation to control chart monitoring. Application to pollutants prediction. *6<sup>th</sup> International Joint Conference on Computational Intelligence IJCCI'14*, Rome, Italie, 22 – 24 octobre.

#### *1.3.4.7 Communications dans des colloques nationaux avec comité de lecture*

- [6.1] Thomas P., Gouimenou J. (1999). PRONEL©: Learning and parallelisation of the Bayesian networks. *IAR-ICD workshop Intelligent Techniques for Information Processing and Applications IAR-ICD'99*, Nancy, France, December 10, 71-75.
- [6.2] Messai N., Thomas P., Lefebvre D., Creput J.C. (2001). Modélisation macroscopique du trafic sur un carrefour urbain : approches neuronales et estimation paramétrique. *3<sup>ème</sup> conférence francophone de MOdélisation et SIMulation MOSIM'01*, Vol.1, 401-407, Troyes, France, 25-27 Avril.
- [6.3] Lefebvre D., Thomas P. (2002). Identification par phase des fréquences maximales de franchissement dans les réseaux de Pétri continus à vitesse variable. *4<sup>th</sup> Int. Conf. On*

- 
- Applied Mathematics and Engineering Sciences CIMASI'02*, Casablanca, Maroc, October 23-25.
- [6.4] Messai N., Thomas P., Lefebvre D., El Moudni A. (2003). Crossroad monitoring based on macroscopic first order neural network model. *5<sup>ème</sup> congrès pluridisciplinaire Qualité et Sûreté de Fonctionnement QUALITA'2003*, 548-556, Nancy, France, Mars 18-20.
- [6.5] Lefebvre D., Leclercq E., Druaux F., Thomas P. (2004). Commande des flux dans les réseaux de Petri continus par propagation du gradient. *Conférence Internationale Francophone d'Automatique CIFA'04*, Douz, Tunisie, 22-24 novembre.
- [6.6] Tolba C., Lefebvre D., Thomas P., El Moudni A. (2004). Approche multi-modèle pour la commande des feux de trafic. *Conférence Internationale Francophone d'Automatique CIFA'04*, Douz, Tunisie, 22-24 novembre. (Prix de la meilleure contribution de doctorants offert par la section France de l'IEEE)
- [6.7] Messai N., Thomas P., Lefebvre D., Riera B., El Moudni A. (2005). Modeling and Monitoring of Hybrid Dynamic Systems with Feed-Forward Neural Networks: application to two tanks hydraulic system. Workshop on Advanced Control and Diagnosis ACD'05, Mulhouse, France, November 16-18, 103-109.
- [6.8] Thomas P., Choffel D. (2006). Impact of RFID technology on Petri net modelisation: application to an assembly platform. *2006 IAR Annual Meeting, IAR'06*, Nancy, France, November 16-17.
- [6.9] Thomas P., Thomas A. (2008). Expérimentation de la réduction d'un modèle de simulation par réseau de neurones : cas d'une scierie. *7<sup>ème</sup> Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes MOSIM'08*, Paris, France, 31 mars – 2 avril.
- [6.10] Thomas P., Thomas A. (2008). Sélection de la structure d'un perceptron multicouches pour la réduction d'un modèle de simulation d'une scierie. *5<sup>ème</sup> Conférence Internationale Francophone d'Automatique CIFA'2008*, Bucarest, Roumanie, 3 – 5 septembre.
- [6.11] Thomas P., Thomas A. (2008). Elagage d'un perceptron multicouches : utilisation de l'analyse de la variance de la sensibilité des paramètres. *5<sup>ème</sup> Conférence Internationale Francophone d'Automatique CIFA'2008*, Bucarest, Roumanie, 3 – 5 septembre.

- [6.12] Thomas P., Thomas A., Belmokhtar S. (2010). Pilotage d'une boucle Kanban modélisée par réseau de Petri. *8<sup>ème</sup> IFAC Conférence international de Modélisation et Simulation MOSIM'10*, Hammamet, Tunisie, 10 – 12 mai.
- [6.13] El Haouzi H., Thomas P., Thomas A. (2010). Proposition d'une procédure de détermination de temps unitaires de pièces découpées. *8<sup>ème</sup> IFAC Conférence international de Modélisation et Simulation MOSIM'10*, Hammamet, Tunisie, 10 – 12 mai.
- [6.14] Thomas P., Thomas A. (2011). De la nécessité des bonnes informations dans les systèmes contrôlés par les produits. *7<sup>ème</sup> Conférence Internationale Conception et Production Intégrée CPI'11*, Oujda, Maroc, 19 – 21 octobre. Keynotes paper.
- [6.15] Noyel M., Thomas P., Thomas A., Beauprêtre B. (2012). Méthodologie d'implantation d'un système de décision par informations portées par les produits. *9<sup>ème</sup> IFAC Conférence international de Modélisation et Simulation MOSIM'12*, Bordeaux, France, 6 – 8 juin.
- [6.16] Noyel M., Thomas P., Thomas A., Charpentier P., Brault T. (soumise). Combinaison d'indicateurs pour évaluer la perturbation des flux dans les ateliers à forts taux de reprises. *10<sup>ème</sup> Conférence international de Modélisation et Simulation MOSIM'14*, Nancy, France, 5 – 7 novembre.
- [6.17] Thomas P., Suhner M.C., Thomas A. (2014). Réduction et generation automatique de modèles Arena© en exploitant des arbres de regression : cas d'une scierie. *10<sup>ème</sup> Conférence international de Modélisation et Simulation MOSIM'14*, Nancy, France, 5 – 7 novembre.
- [6.18] Thomas P., Derigent W., Suhner M.C. (2014). Un ensemble classificateur pour la classification de données dynamiques. Application à un problème de qualité d'air intérieur. *10<sup>ème</sup> Conférence international de Modélisation et Simulation MOSIM'14*, Nancy, France, 5 – 7 novembre.

#### *1.3.4.8 Thèse et rapports*

- [7.1] Thomas P. (1993). *Les méthodes d'identification de modèles linéaires robustes*. Rapport bibliographique de DEA ATS de l'Université de Nancy 1.

- 
- [7.2] Thomas P. (1993). Identification robuste de systèmes SISO linéaires et non linéaires. Approche paramétrique et neuronale. Rapport de recherche de DEA ATS de l'Université de Nancy 1.
- [7.3] Sirou F., Eustache V., Thomas P., Bloch G., Cecchin T. (1996). Diagnostic de la qualité du produit sur une ligne de galvanisation, Analyse du fonctionnement de la ligne de galvanisation en production galvalla : modélisation du four à induction. Rapport CRAN-SOLLAC n°4, Confidentiel.
- [7.4] Thomas P. (1997). *Contribution à l'identification de systèmes non linéaires par réseaux de neurones*. Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1.

#### *I.3.4.9 Communications sans actes*

- [8.1] Theilliol D., Thomas P., Bloch G. (1993). Identification robuste de systèmes SISO non linéaires par réseaux de neurones. *Réunion du GTI du pôle SARTA du GR Automatique CNRS*, Grenoble.
- [8.2] Sirou F., Thomas P., Bloch G. (1996). Modélisation du four à induction d'une ligne de galvanisation. Approches linéaires et neuronales. *Réunion du projet CSN (Commande Symbolique et Neuromimétique) du pôle AI (Automatisation Intégrée) du GR Automatique CNRS*, Paris.
- [8.3] Thomas P., Bloch G. (1996). Initialisation des perceptrons multicouches pour l'identification. *Réunion du projet CSN (Commande Symbolique et Neuromimétique) du pôle AI (Automatisation Intégrée) du GR Automatique CNRS*, Paris.
- [8.4] Thomas P. (2002). La surveillance du trafic par réseaux de neurones. *2<sup>ème</sup> Journée Technique du laboratoire SeT « La sécurité dans les transports terrestres »*, Belfort.
- [8.5] Messai N., Thomas P., Lefebvre D., El Moudni A. (2003). Surveillance du trafic urbain et interurbain à base de modèles neuronaux. *Réunion du GT Modèles de trafic de l'INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité)*, Arcueil.
- [8.6] Thomas P. (2011). De la donnée à la connaissance pour les Systèmes Contrôlés par les Produits. *Journées STP du GDR MACS*, Tarbes.

*I.3.4.10 Autres documents*

- [9.1] Tolba C., Lefebvre D., Thomas P., El Moudni A. (2008). Des carrefours « intelligents » pour une meilleure gestion du trafic urbain. *Cahier du campus logistique*, Université du Havre, Vol.1.



---

Chapitre

## **II**

# **II SYNTHÈSE DES TRAVAUX DE RECHERCHE MENÉS AU SET**



## II.1 INTRODUCTION

En septembre 1999, j'ai été recruté comme Maître de Conférences à l'*UTBM* nouvellement créée par fusion de deux écoles d'ingénieurs. Dans ce cadre, j'ai rejoint les réflexions d'un groupe d'enseignants chercheurs qui ont conduit à la création du laboratoire Systèmes et Transports (SeT) qui a été reconnu équipe d'accueil n° EA3317 en 2000. Au sein de ce laboratoire, j'ai participé aux travaux de l'axe surveillance. Dans cet axe, nous nous sommes intéressés à la modélisation, à la surveillance et au contrôle du trafic urbain et interurbain.

Les systèmes de transports présentent la particularité d'être fortement instrumentés. Les capteurs les plus répandus, tant en ville que sur voies rapides et autoroutes, sont les boucles magnétiques (Elloumi, 1996). Ces capteurs présentent l'avantage d'être simples de fonctionnement et robustes. Cependant, les informations fournies sont assez basiques comparativement aux autres types de capteurs tels que, les capteurs pneumatiques, les capteurs à effet doppler ou les capteurs vidéo par exemple. En effet, une boucle magnétique ne renvoie comme information que l'occupation d'une portion de chaussée.

Ces capteurs étant très répandus, un grand nombre de données sont collectées et archivées quotidiennement sur les diverses voies équipées, et ces données sont généralement sous exploitées. L'objectif majeur de nos travaux est donc d'exploiter ces données afin d'apprendre le comportement, d'évaluer et de piloter le trafic en fonction des caractéristiques des voies et carrefours considérés et des aléas.

Dans ce cadre, et vu la somme de données collectées, il est nécessaire d'automatiser la modélisation du trafic.

Le trafic urbain ou interurbain est un phénomène intrinsèquement discret. Cependant, une approximation continue de ce problème peut être faite. Il est donc possible de modéliser les flux de trafic soit de manière discrète (microscopique) soit de manière continue (macroscopique) et de ce fait, on s'est intéressé à deux types d'outils, les réseaux de Petri et les réseaux de neurones.

Nous avons donc proposé un méta modèle à base de réseaux de neurones pour la modélisation macroscopique du trafic. Ces modèles neuronaux de trafic ont ensuite été exploités dans le but de surveiller le trafic. Ces travaux ont principalement été menés dans le cadre de la thèse de Nadhir Messai (Messai, 2003). Dans un second temps, nous avons

également proposé une approche de modélisation par réseau de Petri dans laquelle les paramètres du réseau sont obtenus par apprentissage. Ces travaux sont décrits au paragraphe II.2.

Par ailleurs, nous nous sommes intéressés au pilotage du trafic par l'intermédiaire du contrôle des carrefours à feux. Pour ce faire, nous avons mis en place, dans un premier temps, des modèles de trafic pouvant passer du microscopique au macroscopique et permettant d'évaluer plus ou moins finement le trafic sur les différentes voies d'accès à un carrefour. Dans un second temps, une stratégie de pilotage des feux tricolore du carrefour considéré a été proposée afin de contrôler le trafic. L'ensemble de ces travaux exploitent différents types de réseaux de Petri et seront détaillés dans le paragraphe II.3. Ils ont été menés dans le cadre de la thèse de Cherif Tolba (Tolba, 2004).

## *II.2 APPRENTISSAGE DE COMPORTEMENTS DE MODELES DE TRAFIC*

Extraire de la connaissance de données en exploitant des techniques d'apprentissage va nous permettre d'exploiter des bases de données conséquentes mais généralement sous exploitées. Dans un premier temps nous allons voir comment construire et exploiter très simplement des modèles de trafic « collant » à la réalité et donc exploitables dans une phase de surveillance. Dans un second temps, nous verrons comment estimer les paramètres de modèles réseaux de Petri.

### *II.2.1 La surveillance du trafic*

#### *II.2.1.1 Introduction*

L'étude des flux de trafic a vu ses débuts dans les années trente avec l'application de la théorie des probabilités à la description du trafic routier. Depuis cette date, de nombreux travaux ont été menés pour mieux comprendre et maîtriser le phénomène de la congestion de trafic. En schématisant, ces travaux se rattachent à deux grandes familles :

- les modèles macroscopiques où on cherche à décrire un flot de véhicules en ignorant leurs comportements individuels,
- les modèles microscopiques où on cherche à analyser le trafic d'une façon fine en décrivant le comportement individuel de chaque conducteur.

Les modèles macroscopiques considèrent que les équations qui régissent le trafic peuvent être écrites à partir de grandeurs telle que la vitesse du flot, la densité ou le débit. Ils utilisent tous une relation fondamentale qui donne une de ces trois variables en fonction d'une des deux autres. Ils peuvent être classés en deux catégories : les modèles du premier ordre et ceux d'ordre supérieur (Lightill & Whitham, 1955; Payne, 1971).

Les modèles macroscopiques du premier ordre reposent sur les lois de continuité et de conservation. La loi de continuité, par analogie avec la théorie de l'hydrodynamique physique, permet de considérer les flots de véhicules comme un milieu continu où la dimension des véhicules est négligée et où n'importe quelle section de chaussée contient une quantité de véhicule. La loi de conservation énonce que le nombre de véhicules présent sur un tronçon durant un intervalle de temps est égal au nombre de véhicules présent sur le tronçon au début de l'intervalle additionné du nombre de véhicules entrant sur le tronçon pendant l'intervalle moins le nombre de véhicules sortant du tronçon pendant la même période de temps. A partir de ces hypothèses et définitions, il est possible de définir une équation de conservation qui conduit à l'établissement d'un diagramme fondamental qui sera caractéristique de la section de voie considérée. Le diagramme fondamental énonce la relation qui lie le débit et la densité d'un tronçon de route. Plusieurs types de diagrammes fondamentaux ont été proposés dans la littérature. On peut citer, par exemple, STRADA (Buisson & Lebacque, 1997), SIMAUT (Morin, 1984), META (Elloumi, 1996)... (Figure 2).

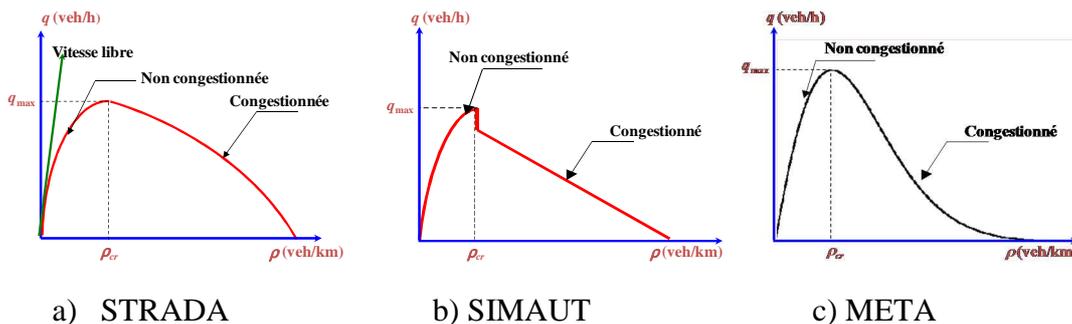


Figure 2 Exemples de diagrammes fondamentaux

Les modèles du premier ordre sont basés sur quelques simplifications qui limitent leurs capacités à représenter certains phénomènes complexes comme le temps mis à la résorption d'une congestion après l'occurrence d'un incident par exemple. C'est pourquoi une extension de ces modèles incluant la prise en compte des aspects dynamiques du trafic a été proposée initialement par Payne (Payne, 1971). Cette extension a donné lieu aux

---

modèles macroscopique d'ordre deux. Depuis les travaux de Payne, de nombreux auteurs ont cherché à améliorer son modèle et à en corriger les défauts. Cependant, la plupart de ces tentatives furent plus ou moins infructueuses comme l'indique LeRoux (Le Roux, 2002) et le modèle générique du trafic reste à inventer.

Dans ce cadre, nous avons proposé d'exploiter les réseaux de neurones pour construire des modèles de trafic de sections de route en exploitant les données fournies par les boucles magnétiques afin de faire coller les modèles à la réalité. Cette approche nous a conduits à proposer un modèle macroscopique du premier ordre dans un premier temps puis d'ordre supérieur dans un second temps dans le but de surveiller le trafic.

Le réseau de neurones utilisé, le perceptron multicouche, est présenté dans le prochain paragraphe. Les modèles macroscopiques du premier et du second ordre à base de réseaux de neurones seront décrit dans le paragraphe II.2.1.3 et leurs exploitations pour la surveillance dans le paragraphe II.2.1.4.

### *II.2.1.2 Le perceptron multicouche*

Les travaux de Cybenko (Cybenko, 1989) et de Funahashi (Funahashi, 1989) ont montré qu'un réseau de neurones multicouche possédant une seule couche cachée utilisant une fonction d'activation sigmoïdale et une couche de sortie utilisant une fonction d'activation linéaire peut approximer toute fonction non linéaire avec la précision voulue si on utilise suffisamment de neurones dans la couche cachée. Ce résultat important explique la grande popularité de ce type de réseau de neurones que l'on appelle classiquement un perceptron multicouche.

Nous allons ici rappeler la structure utilisée du perceptron multicouche. Le réseau présenté par la Figure 3 est composé de neurones interconnectés en trois couches successives. La première couche est composée de neurones « transparents » qui n'effectuent aucun calcul mais simplement distribuent leurs entrées à tous les neurones de la couche suivante appelée couche cachée.

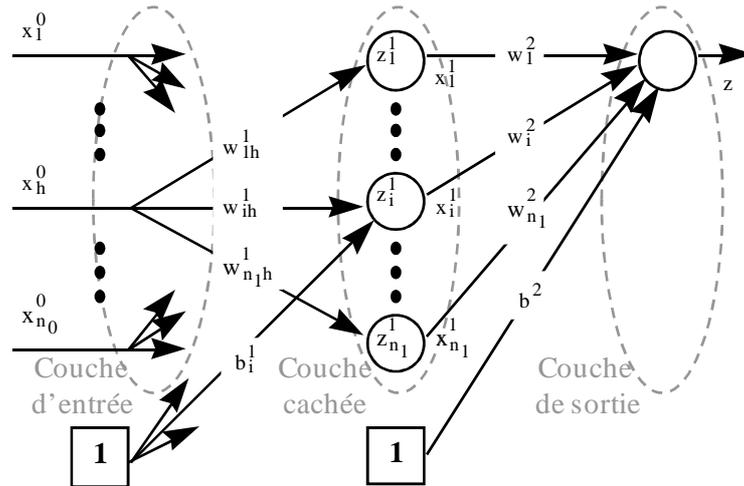
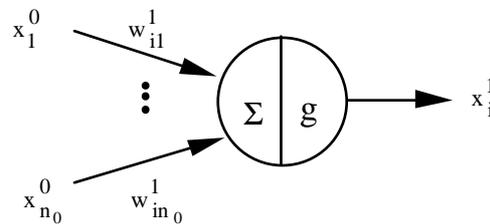


Figure 3 L'architecture du perceptron multicouche


 Figure 4 Le neurone  $i$  de la couche cachée

Les neurones de la couche cachée (Figure 3), dont un exemple peut être représenté par la Figure 4, reçoivent les  $n_0$  entrées  $\{x_1^0, \dots, x_{n_0}^0\}$  de la couche d'entrée avec les poids associés  $\{w_{i1}^0, \dots, w_{in_0}^0\}$ . Chaque neurone calcule la somme pondérée de ses  $n_0$  entrées :

$$z_i^1 = \sum_{h=1}^{n_0} w_{ih}^1 \cdot x_h^0 + b_i^1 \quad (1)$$

où  $b_i^1$  est un biais (ou seuil). La sortie du neurone caché est obtenue en transformant la somme (1) par l'intermédiaire de la fonction d'activation  $g(\cdot)$  :

$$x_i^1 = g_h(z_i^1) \quad (2)$$

Bien que de nombreuses fonctions d'activations ait été proposées, la fonction  $g_h(\cdot)$  est généralement la tangente hyperbolique (Thomas & Bloch, 1997) :

$$g_h(x) = \tanh(x) = \frac{2}{1+e^{-2x}} - 1 = \frac{1-e^{-2x}}{1+e^{-2x}} \quad (3)$$

Le neurone de la dernière couche (ou couche de sortie) effectue une somme pondérée de ses entrées qu'il transforme ensuite par une fonction d'activation  $g_o(\cdot)$  :

$$z = g_o \left( \sum_{i=1}^{n_1} w_i^2 . x_i^1 + b \right) \quad (4)$$

où  $w_i^2$  sont les poids connectant les sorties des neurones cachés au neurone de sortie et  $b$  est le biais du neurone de sortie. La fonction d'activation  $g_o(.)$  est choisie linéaire dans le cas d'un problème de régression et sigmoïdale dans le cas d'un problème de classification.

La détermination des poids et biais du réseau qui en sont les paramètres s'effectuent par l'intermédiaire d'un apprentissage supervisé. Cet apprentissage s'effectue en deux phases :

- une phase d'initialisation. Le choix des poids et biais initiaux peut s'effectuer de manière aléatoire ou utiliser des algorithmes plus complexes (Thomas & Bloch, 1997),
- une phase d'apprentissage. Une fois de plus de nombreux algorithmes existent. Nous utilisons l'algorithme de Levenberg-Marquadt qui se comporte comme un algorithme du Hessien lorsque l'on se trouve loin de la solution et comme un algorithme du gradient lorsque l'on s'en rapproche (Thomas & Bloch, 1996).

A ces deux phases doit être ajoutée une phase de détermination de la structure optimale du réseau qui peut être réalisée de manière itérative ou par élimination des connections inutiles (Dreyfus, et al., 2002).

### II.2.1.3 *Modèle macroscopique boîte grise par réseaux de neurones*

De nombreux modèles macroscopiques ont été proposés dans la littérature permettant de construire un modèle théorique du trafic sur un tronçon de voie. La construction et l'exploitation d'un modèle neuronal va permettre de confronter simplement la théorie à la réalité. Pour ce faire, nous allons nous appuyer sur les notions d'offre et de demande de trafic (Buisson & Lebacque, 1997). Ces deux modèles d'offre et de demande peuvent être représentés par l'intermédiaire de deux neurones cachés. En posant arbitrairement, dans un premier temps, que le débit maximal du tronçon est fixé à 1, on peut définir les deux fonctions demande  $D$  et offre  $S$  par les relations :

$$\begin{cases} D = \tanh(w_1^1 . \rho + b_1^1) \\ S = \tanh(w_2^1 . \rho + b_2^1) \end{cases} \quad (5)$$

où  $\rho$  représente la densité sur le tronçon. Si les fonctions offre et demande ainsi définies sont choisies saturées respectivement pour  $\rho > \rho_{cr}$  et  $\rho < \rho_{cr}$  ( $\rho_{cr}$  étant la densité critique),

alors la forme générale du diagramme fondamental est donnée par la sortie d'un perceptron multicouche possédant une sortie, une entrée et deux neurones cachés :

$$\hat{q} = \sum_{i=1}^2 w_i^2 \cdot \tanh(w_i^1 \cdot \rho + b_1^1) + b \quad (6)$$

où  $\hat{q}$  représente l'estimation du débit (Messai, et al., 2001).

Ce modèle ne permet cependant pas de prendre en considération les phénomènes d'hystérésis observés aux alentours de la densité critique comme pris en compte dans un diagramme fondamental de type SIMAUT. Afin de représenter un tel phénomène, nous devons adjoindre un troisième neurone caché. Cependant, un tel neurone caché ne modélise plus une discontinuité comme dans le modèle SIMAUT mais bien plutôt une évolution rapide mais continue (Messai, et al., 2002).

Des résultats de simulation ont montré que ce modèle neuronal était tout à fait capable de représenter, avec une même structure initiale, des comportements de trafic de type STRADA, META ou SIMAUT pourtant assez différent (Messai, et al., 2002).

L'intérêt majeur de ce modèle macroscopique est donc de pouvoir le construire par apprentissage à partir de données. La particularité de ce modèle neuronal par rapport aux modèles neuronaux classiques est de pouvoir associer une signification physique à chacun des paramètres du réseau.

Ainsi, en considérant que la pente à l'origine de la sortie du réseau  $\hat{q}$  correspond à la vitesse libre de l'infrastructure nous obtenons la relation fournissant le poids connectant le neurone d'entrée au premier neurone caché :

$$w_1^1 = \frac{V_{free}}{w_1^2} \quad (7)$$

où  $V_{free}$  représente la vitesse libre du tronçon dont la valeur théorique est connue. Elle est par exemple en France de 50 km/h en ville, ou de 130 km/h sur autoroute.

On peut construire une relation donnant le poids connectant le neurone d'entrée au deuxième neurone caché en exploitant le fait que la demande doit égaler l'offre pour la densité critique  $\rho_{cr}$  :

$$w_2^1 = \frac{w_1^1 \cdot \rho_{cr}}{\rho_{cr} - \rho_{max}} = \frac{V_{free} \cdot \rho_{cr}}{w_1^2 (\rho_{cr} - \rho_{max})} \quad (8)$$

$\rho_{cr}$  est également une caractéristique du tronçon qui peut être déterminée théoriquement.

D'autre part, par définition, un débit nul va correspondre aussi bien à une densité nulle qu'à une densité maximale (saturation totale du tronçon) on obtient les relations suivantes permettant de déterminer les biais des neurones cachés :

$$\begin{cases} b_1^1 = 0 \\ b_2^1 = -w_2^1 \cdot \rho_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

La valeur des poids connectant les neurones cachés au neurone de sortie et le biais de sortie dépendent directement du débit maximal du tronçon  $q_{\max}$  :

$$w_1^2 = w_2^2 = -b = q_{\max} \quad (10)$$

L'intérêt de ces relations est double :

- elles permettent de déterminer les valeurs réelles des paramètres caractéristiques d'un tronçon (par exemple, une vitesse libre théorique de 50 km/h pour un tronçon en ville peut tomber en réalité à 30 km/h du fait d'un virage serré ou de la présence d'un dos d'âne),
- elles peuvent être utilisées pour initialiser les paramètres du réseau de neurones à des valeurs proches de la réalité.

Plusieurs algorithmes d'initialisation incluant plus ou moins de phénomènes aléatoires ont ainsi été construits et comparés sur des exemples de simulation et sur des données réelles provenant d'un carrefour urbain (Messai, et al., 2003).

Les modèles du premier ordre ainsi obtenus sont bien adaptés à divers problèmes de trafic tels que l'estimation de la capacité d'une infrastructure. Cependant, ces diagrammes fondamentaux restent statiques. Ils sont incapables, comme tous les modèles du premier ordre, de décrire les fluctuations de la vitesse autour de sa valeur d'équilibre ou de reproduire certains phénomènes observés comme l'amplification des petites perturbations en régime congestionnés (Jiang, et al., 2002). Dans ce cadre, nous avons proposé une méthodologie pour construire un modèle neuronal du trafic d'ordre supérieur (Messai, et al., 2002).

#### *II.2.1.4 Exploitation des modèles pour la surveillance*

Les méthodes de surveillances peuvent être classées en deux grandes catégories (Zwingelstein, 1995) : La surveillance sans modèle de référence et celle à base de modèle de référence. Nous nous positionnons clairement dans la deuxième catégorie.

Dans un premier temps, nous allons exploiter les modèles du premier ordre que nous avons définis au paragraphe précédent.

Classiquement deux approches sont utilisées pour détecter les incidents de trafic :

- soit on recherche les variations soudaines dans l'analyse des données en amont ou en aval d'un point considéré,
- soit on compare les conditions actuelles de trafic avec des historiques de données mesurées lors du fonctionnement normal.

La deuxième approche est cependant rarement utilisée du fait de la difficulté d'obtenir simplement un modèle performant représentatif de la réalité. L'algorithme proposé répond à ce besoin. Son principe se résume ainsi : un couple de données  $(\rho(t), q(t))$  mesurées à l'instant  $t$  est détecté comme étant un défaut si et seulement si ces données sont trop éloignées du diagramme fondamental décrit au paragraphe précédent. La détection de défauts résulte donc de la séparation de l'espace densité débit  $(\rho, q)$  en deux régions :

- une région admissible enveloppant le diagramme fondamental,
- une région de défauts, le reste de l'espace  $(\rho, q)$ .

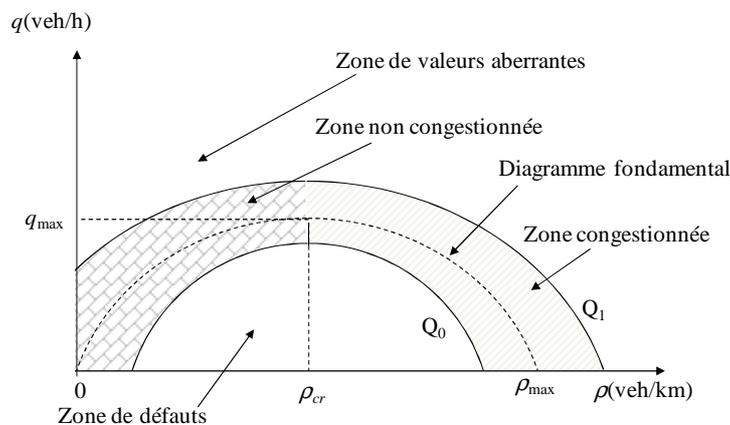


Figure 5 Définition de la région admissible

Une segmentation plus fine de ces deux régions permet de faire apparaître quatre zones distinctes Figure 5 :

- une zone de fonctionnement fluide (non congestionné) caractérisée par des couples  $(\rho(t), q(t))$  appartenant à la région admissible et correspondant à une densité inférieure à la densité critique  $\rho_{cr}$ ,
- une zone de fonctionnement congestionné caractérisée par des couples  $(\rho(t), q(t))$  appartenant à la région admissible et correspondant à une densité supérieur à la densité critique  $\rho_{cr}$ ,

- une zone d'erreurs de mesures ou de valeurs aberrantes caractérisée par des couples  $(\rho(t), q(t))$  n'appartenant pas à la région admissible et présentant des débits supérieurs au débit fourni par le diagramme fondamental,
- une zone de défauts caractérisée par des couples  $(\rho(t), q(t))$  n'appartenant pas à la région admissible et présentant des débits inférieurs au débit fourni par le diagramme fondamental.

Cet algorithme permet ainsi de détecter des incidents à partir d'un seul capteur (boucle magnétique). Le diagramme fondamental autour duquel l'ensemble de l'algorithme est construit est le modèle macroscopique neuronal du premier ordre décrit au paragraphe précédent et construit à partir des données réelles collectées. Les limites de la région admissibles sont construites en ajoutant ou soustrayant une quantité  $\Delta q$ . Les bornes ne sont pas nécessairement symétriques et la quantité à ajouter pour obtenir la borne supérieure n'est généralement pas égale à celle qu'il faut soustraire pour obtenir la borne inférieure. La fonction de surveillance est ainsi réalisée par un réseau de neurones composé de trois parties Figure 6 :

- un modèle macroscopique neuronal du 1<sup>er</sup> ordre représentant le fonctionnement normal du système,
- une couche de deux éléments adaptatifs à seuil,
- un post processeur logique

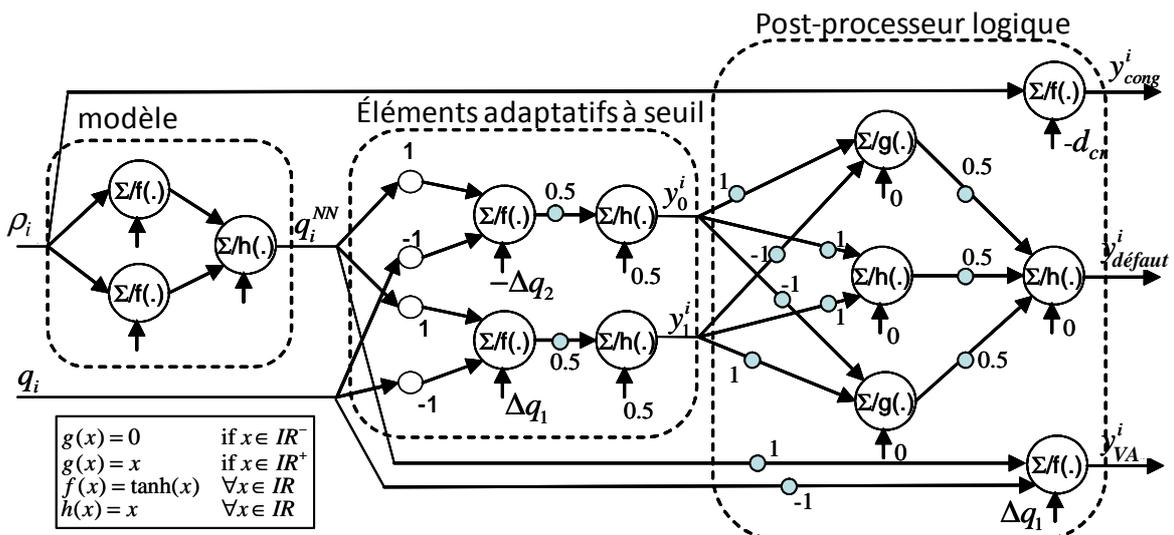


Figure 6 Architecture du réseau de surveillance

Les trois sorties du réseau de surveillance indiquent si le système se trouve dans la zone congestionnée ( $y_{cong}^i$ ), dans la zone de défauts ( $y_{defaut}^i$ ) ou dans la zone de valeurs aberrantes ( $y_{VA}^i$ ) (Lefebvre, et al., 2000; Messai, et al., 2003).

Le seul point restant à traiter est la détermination des bornes de la zone admissible ce qui revient à déterminer deux seuils ( $\Delta q_1$  et  $\Delta q_2$ ) qui encadrent le résidu :

$$\mathcal{E}(t) = q(t) - \hat{q}(t) \quad (11)$$

où  $q(t)$  représente le débit mesuré quand  $\hat{q}(t)$  représente le débit donné par le modèle neuronal.

Pour déterminer ces seuils, on s'appuie dans un premier temps sur l'exploitation d'un algorithme d'apprentissage robuste qui présente l'avantage de donner une estimation de la variance des résidus (Bloch, et al., 1997). Cette estimation de la variance peut alors être utilisée pour déterminer deux seuils symétriques (Messai, et al., 2003).

Les valeurs ainsi obtenues permettent d'initialiser les paramètres du réseau de surveillance (Figure 6). Les données de retour d'expériences peuvent ensuite être utilisées pour affiner ces valeurs de seuil par apprentissage. Cette approche de surveillance a été testée avec succès sur des exemples de simulation et sur des données réelles de trafic (Messai, et al., 2005).

## ***II.2.2 Estimation paramétrique de Réseaux de Petri (RdP)***

### *II.2.2.1 Introduction*

Si les réseaux de neurones sont bien adaptés à la modélisation de systèmes continus, la modélisation de systèmes à événements discrets nécessite d'autres formalismes et les réseaux de Petri (RdP) en sont un. Ces derniers ont été introduits par C.A. Petri dans sa thèse (Petri, 1966). Ils permettent de décrire les états possibles d'un système dynamique à événements discrets (SED) et l'effet d'actions externes sur ses états. L'intérêt majeur des RdP consiste dans la combinaison d'une représentation graphique intuitive avec un modèle mathématique sous-jacent (Brams, 1983).

Par définition, un RdP est un graphe dont les nœuds se trouvent sur un chemin formé d'arcs orientés et pondérés. Les nœuds sont de deux types (places et transitions). La représentation d'une place se fait par un cercle quand une transition est représentée par un trait ou un rectangle aplati. Des flèches représentent les connections reliant une place à

une transition ou une transition à une place. Ces connections sont pondérées, la pondération étant indiquée à côté de la connexion. Ce formalisme assez simple et intuitif est à la base du succès des RdP. De nombreux travaux ont abordé le problème de leur analyse (Askin & Standridge, 1993; Zerhouni, et al., 1995) ou de leur contrôle (Hirasawa, et al., 1998; Lefebvre, 1999). Cependant, leur estimation paramétrique est assez rarement étudiée. Ceci est dû au fait que les réseaux de Petri sont généralement vus comme des modèles de connaissance. En effet, les places possèdent une signification physique et le comportement des transitions (vitesses de franchissement, temporisations...) résulte généralement d'une connaissance a priori.

Cependant, comme dans beaucoup de domaines, et la modélisation par RdP ne fait pas exception, il existe généralement de grandes différences entre la théorie et la réalité. C'est pourquoi, il nous semble important de pouvoir exploiter les données disponibles afin de pouvoir confronter les hypothèses effectuées a priori avec la réalité du terrain en estimant les paramètres des RdP.

### II.2.2.2 Les différents réseaux de Petri

Depuis la définition initiale proposée par C.A. Petri dans les années soixante, de nombreuses extensions en ont été proposées. On peut citer, par exemple, les RdP temporisés (Chretienne, 1983), les RdP continus (David & Alla, 1997), les RdP stochastiques (Natkin, 1980), les RdP hybrides (Le Bail, et al., 1991), les RdP lots (Demongodin, 1994), les RdP colorés (Jensen, 1994)...

Nous nous sommes focalisés sur deux types de RdP particulièrement répandus, les RdP temporisés (RdPT) et les RdP continus à vitesse variable (RdPCV). Ces deux types de RdP sont deux extensions des RdP autonomes. Formellement, un RdP autonome est un quintuplet  $Q = \langle P, T, pre, post, M_1 \rangle$  où :

- $P = \{P_1, P_2 \dots P_n\}$  est un ensemble fini non vide de  $n$  places,
- $T = \{T_1, T_2 \dots T_p\}$  est un ensemble fini non vide de  $p$  transitions,  $P$  et  $T$  sont deux ensembles disjoints,
- $pre : P \times T \rightarrow \{0,1\}$  est la fonction de pré incidence telle que  $pre(P_i, T_j)$  est le poids de l'arc dirigé de  $P_i$  vers  $T_j$ ,

- $post : P \times T \rightarrow \{0,1\}$  est la fonction de post incidence telle que  $post(P_i, T_j)$  est le poids de l'arc dirigé de  $T_j$  vers  $P_i$ ,
- $M_I$  est le vecteur de marquage initial.

On note  ${}^*T_j$  l'ensemble des places en amont de  $T_j$  et  $T_j^*$  l'ensemble des places en aval de  $T_j$ . Le franchissement de la transition  $T_j$  ne peut s'effectuer que si l'ensemble des places  $P_i \in {}^*T_j$  contient un nombre de marques au moins égal au poids de l'arc reliant la place  $P_i$  à la transition  $T_j$ . On dit alors que la transition est validée. Le franchissement de la transition consiste alors à retirer dans chaque place  $P_i \in {}^*T_j$  un nombre de marques égal au poids de l'arc reliant la place  $P_i$  à la transition  $T_j$  et à ajouter dans chaque place  $P_i \in T_j^*$  un nombre de marques égal au poids de l'arc reliant la transition  $T_j$  à la place  $P_i$ . Il est possible de définir les matrices de pré-incidence et de post-incidence qui vont permettre de décrire l'évolution d'un RdP :

- la matrice de pré-incidence est  $W_{PR} = (w_{ij}^{PR})_{i=1..n; j=1..p}$  avec  $w_{ij}^{PR} = pre(P_i, T_j)$ ,
- et celle de post-incidence est  $W_{PO} = (w_{ij}^{PO})_{i=1..n; j=1..p}$  avec  $w_{ij}^{PO} = post(P_i, T_j)$ ,
- la matrice d'incidence est  $W = W_{PO} - W_{PR}$ .

Il est nécessaire également de définir  $M(t) = (m_i(t))_{i=1..n}$ , le vecteur de marquage à l'instant  $t$ , quand  $M_i$  correspond au marquage initial. Une séquence de franchissement est définie comme une série ordonnée de transitions successivement franchies permettant de passer du marquage  $M$  au marquage  $M'$ . Une telle séquence est représentée par son vecteur caractéristique  $X = (x_j)_{j=1..p}$  où  $x_j$  représente le nombre de franchissement de la transition  $T_j$  dans la séquence. On peut exprimer le marquage  $M'$  en fonction du marquage  $M$  et de la séquence de franchissement  $X$  :

$$M' = M + W.X \tag{12}$$

Lorsque deux transitions possèdent une place en commun dans leurs jeux de places en amont, on se trouve en présence d'un conflit structurel. Ce conflit structurel devient effectif lorsque la place en commun ne possède pas suffisamment de jeton pour tirer les deux transitions simultanément. Pour régler de tels conflits, il est nécessaire de mettre en œuvre un outil d'aide à la décision à associer au RdP. Dans les RdP autonomes sans

conflits que nous considérons, la séquence de franchissement  $X$  relative à un marquage  $M$  est :

$$x_j = \min_{P_i \in T_j} \left( \text{ent} \left( \frac{m_i}{w_{ij}^{PR}} \right) \right) \quad (13)$$

où  $\text{ent}(\cdot)$  représente la partie entière.

Les RdP temporisés sont une extension des RdP autonomes auxquels des temporisations sont associées soit au franchissement des transitions (RdP T-temporisés), soit au séjour des marques dans les places (RdP P-temporisés). Les deux modèles sont équivalents (David & Alla, 1997) et nous ne présenterons que les RdP T-temporisés (RdPT).

Un RdPT à  $n$  places et  $p$  transitions est défini comme un ensemble  $\langle RdP, D_{\min} \rangle$  où  $D_{\min} = (d_{\min j})_{j=1, \dots, p}$  est le vecteur des durées minimales de franchissement associées à chaque transition. Avant le franchissement de la transition  $T_j$ , les jetons sont réservés dans les places en amont de  $T_j$  pendant une durée  $d_{\min j}$ , et le franchissement de la transition n'est plus instantané.

En considérant une discrétisation temporelle de période  $\Delta t$ , le vecteur caractéristique de la séquence de franchissement à l'issue de l'intervalle de temps  $[(k-1).\Delta t, k.\Delta t[$  est  $X(k) = (x_j(k))_{j=1, \dots, p}$ . D'une manière similaire, on peut définir  $E(k) = (e_j(k))_{j=1, \dots, p}$ , le vecteur caractéristique de la séquence de franchissement commençant durant ce même intervalle de temps. Cette séquence est également connue sous le nom de séquence de validation. On peut alors définir :

- le vecteur des marquages réservés à l'instant  $k.\Delta t$  :  $R(k) = (r_i(k))_{i=1, \dots, n}$ ,
- le vecteur des marquages non réservés à l'instant  $k.\Delta t$  :  $L(k) = (l_i(k))_{i=1, \dots, n}$ .

Le marquage d'un RdPT est alors donné par :

$$\begin{aligned} R(k+1) &= R(k) + W_{PR} \cdot (E(k) - X(k)) \\ L(k+1) &= L(k) - W_{PR} \cdot E(k) + W_{PO} \cdot X(k) \\ M(k+1) &= R(k+1) + L(k+1) = M(k) + W \cdot X(k) \end{aligned} \quad (14)$$

Seuls les marquages non réservés peuvent être utilisés pour valider les transitions :

$$e_j(k) = \min_{P_i \in T_j} \left( \text{ent} \left( \frac{l_i(k)}{w_{ij}^{PR}} \right) \right) \quad (15)$$

et la séquence de franchissement est donnée par :

$$x_j(k) = e_j \left( k - \text{ent} \left( \frac{d_{\min j}}{\Delta t} \right) \right), \quad k \geq \frac{d_{\min j}}{\Delta t} \quad (16)$$

Les RdP continus résultent des RdPT et fournissent une approximation continue des caractéristiques du système considéré (David & Alla, 1997). Dans un RdP continu le marquage  $m_i(t)$  de chaque place  $P_i$  est une valeur réelle quand elle est une valeur entière dans un TPN. La transition  $T_j$  est franchie ponctuellement après un temps  $d_j$  dans un RdPT, elle est franchie continument dans un RdP continu.

Un RdP continu à  $n$  places et  $p$  transitions est défini comme un ensemble  $\langle RdP, X_{\max} \rangle$  où  $X_{\max} = (x_{\max j})_{j=1 \dots p}$  est le vecteur des vitesses maximales de franchissement associées à chaque transition. Chaque transition est franchie avec une vitesse réelle qui est inférieure ou égale à sa vitesse maximale de franchissement. Si on définit  $X(t) = (x_j(t))_{j=1 \dots p}$  le vecteur des vitesses de franchissement à l'instant  $t$ , l'évolution du marquage d'un RdP continu est donnée par le système d'équations différentielles :

$$\frac{dM(t)}{dt} = W.X(t) \quad (17)$$

Parmi les modèles existants de RdP continus, les plus utilisés sont les RdP continus à vitesse constante et les RdP continus à vitesse variable (RdPCV). Les RdPCV sont connus pour être la meilleure approximation des RdPT. Cette approximation s'améliore lorsque le nombre de marques parcourant le réseau augmente. De plus les RdPCV permettent d'obtenir la valeur moyenne du marquage en régime stationnaire y compris pour un petit nombre de marques (Lefebvre, 2000).

Dans les RdP continus, nous allons nous focaliser sur les RdPCV. Les RdPCV ne présentent jamais de situation de conflits effectifs. Les composantes du vecteur de marquage sont des fonctions continues du temps. De même, les composantes du vecteur des fréquences de franchissement  $X(t)$  dépendent continument du marquage des places et sont données par :

$$x_j(t) = x_{\max j} \cdot \mu_j(t) \quad (18)$$

où  $\mu_j(t)$  représente le marquage minimal des places amont de la transition :

$$\mu_j(t) = \min_{P_i \in T_j} (m_i(t)) \quad (19)$$

### II.2.2.3 Estimation paramétrique et analyse structurelle

L'objectif de l'estimation paramétrique est de déterminer les paramètres inconnus dans un modèle mathématique connu en exploitant une base de données. Ceci peut être effectué tant avec des modèles continus comme les RdPCV qu'avec des modèles discrets comme les RdPT.

Dans un premier temps, définissons :

- le sous-ensemble  $P_o \subset P$  de dimension  $q$  représentant l'ensemble des places observées (sorties),
- $M_o = Q.M$  le vecteur des marquages observés avec  $Q = (q_{ij})_{i=1 \dots q, j=1 \dots n}$ ,
- le sous-ensemble  $T_o \subset T$  de dimension  $\eta$  représentant l'ensemble des transitions observées (sorties),
- $X_o = B.X$  le vecteur de la séquence de franchissement observée (RdPT) ou le vecteurs des vitesses de franchissement observées (RdPCV) avec  $B = (b_{ij})_{i=1 \dots \eta, j=1 \dots p}$ ,
- $\theta$  le vecteur des paramètres à estimer. Ces paramètres peuvent être des paramètres d'incidence, c'est-à-dire des éléments des matrices de pré-incidence et post-incidence (RdPT et RdPCV), ou encore des paramètres temporels, c'est-à-dire des durées minimales de franchissement de transitions (RdPT) ou des vitesses maximales de franchissement de transitions (RdPCV).

Le problème de l'estimation paramétrique des RdPT et des RdPCV peut être formulé d'une manière unifiée en considérant un RdP incluant un ensemble de places observées  $P_o$ , éventuellement un ensemble de transitions observées  $T_o$  et un ensemble de paramètres inconnus  $\theta$  que l'on cherche à déterminer. La question est toujours, quelle information peut être extraite des données pour estimer les paramètres inconnus. Nous pouvons nous focaliser sur les deux aspects suivants (Lefebvre & Thomas, 2005) :

- D'un point de vue structurel, il est nécessaire de déterminer quels nœuds (places ou transitions) fournissent une information utile pour la détermination d'un

paramètre donné. D'une manière inverse, il est également utile de déterminer quel paramètre influe sur l'évolution du marquage d'une place donnée ou sur le franchissement d'une transition donnée.

- D'un point de vue fonctionnel, il est nécessaire d'adapter les outils classiques d'estimation paramétrique aux modèles RdP. C'est ce que nous verrons au paragraphe suivant.

Avant de poursuivre, il est nécessaire de rappeler que pour que les données fournissent l'information nécessaire à une bonne estimation des paramètres, il n'est pas seulement nécessaire d'observer les bons nœuds, il est également important d'exciter correctement le RdP avec un marquage initial adéquat.

L'analyse structurelle fournit des résultats qualitatifs nécessaires pour la phase d'estimation (Bondavalli, et al., 1999; Lefebvre, 2002). La sensibilité structurelle ou W-sensibilité des places (respectivement transitions) en fonction des conditions de franchissement des transitions du RdP dépend uniquement de la structure de ce dernier (Lefebvre, 2002). Des exemples de sensibilité structurelle sont présentés dans (Lefebvre & Thomas, 2005). Nous pouvons noter que les paramètres à estimer sont tous rattachés à une transition du RdP. En effet,  $(w_{ik}^{PR})_{i=1..n}$ ,  $(w_{ik}^{PO})_{i=1..n}$ ,  $d_{\min k}$  pour un RdPT et  $x_{\max k}$  pour un RdPCV sont tous associés à la transition  $T_k$ . Ces paramètres sont les conditions de franchissement de la transition  $T_k$ . On peut donc définir  $T_\theta \subset T$ , le sous-ensemble des transitions associées au vecteur des paramètres à estimer  $\theta$ .

#### II.2.2.4 Estimation paramétrique dans les RdPCV et RdPT

Les paramètres temporels et d'incidence de RdPT ou de RdPCV peuvent être estimés en exploitant des algorithmes hors ligne ou récursif des moindres carrés (Lefebvre & Thomas, 2002; Lefebvre & Thomas, 2005). Cette approche nécessite de mesurer à la fois le marquage des places mais également les séquences de franchissement des transitions dans les RdPT ou les vitesses de franchissement dans les RdPCV. Ceci revient à mesurer et utiliser simultanément l'état du système mais aussi l'occurrence des événements. Mais cela limite l'intérêt de ce type d'algorithme. Les algorithmes de descente du gradient permettent de dépasser cette limitation (Ljung, 1987; Lefebvre & Thomas, 2005). Cette approche est basée sur la minimisation d'une fonction coût qui évalue la distance entre la mesure et la sortie d'un estimateur.

Nous allons présenter ici le cas simple où une seule place est observée :  $P_o = \{P\}$ . Nous pouvons définir  $\theta^*$ , la valeur vraie et inconnue du vecteur des paramètres  $\theta$ .  $\theta(i)$  est la valeur estimée des paramètres à l'itération  $i$ . L'estimation de l'erreur instantanée est définie par :

$$\varepsilon(k, \theta(i)) = m(k, \theta^*) - m(k, \theta(i)) \quad (20)$$

où  $m(k, \theta(i))$  est le marquage de la place  $P$  à l'instant  $k.\Delta t$ .

A partir de cette erreur, il est possible de définir une fonction coût scalaire à minimiser :

$$v(H, \theta(i)) = \frac{1}{2} \sum_H \varepsilon^2(k, \theta(i)) \quad (21)$$

Le développement en série de Taylor de cette fonction coût autour de la valeur vraie  $\theta^*$  des paramètres puis la recherche des conditions de stationnarité du critère permettent de construire les algorithmes de descente du gradient en négligeant tous les termes d'ordre 2 et plus dans le développement de Taylor ou les algorithmes du Hessien en négligeant seulement les termes d'ordre supérieur à 2. Dans ce dernier cas, et en introduisant une amélioration due à Levenberg et Marquardt, nous obtenons l'algorithme d'évolution des paramètres du second ordre suivant (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963) :

$$\begin{aligned} \partial\theta(i) &= \theta(i+1) - \theta(i) \\ &= \left( \sum_H S(k, \theta(i)) \cdot S(k, \theta(i))^T + \alpha I \right)^{-1} \cdot \left( \sum_H S(k, \theta(i))^T \varepsilon(k, \theta(i)) \right) \end{aligned} \quad (22)$$

où  $\alpha I$  ( $\alpha$  est un scalaire positif ou nul et  $I$  la matrice identité) est un terme adaptatif permettant de toujours inverser la matrice Hessienne même quand cette dernière n'est pas régulière ou est mal conditionnée. L'évolution du paramètre  $\alpha$  permet d'osciller entre les deux cas extrêmes :

- Quand  $\alpha \gg 1$  alors l'algorithme (22) se comporte comme un algorithme de descente du gradient (premier ordre). C'est le cas notamment quand l'algorithme se rapproche de la solution, l'algorithme est alors plus lent mais évite les phénomènes d'oscillations autour de la solution,
- Quand  $\alpha \ll 1$  alors l'algorithme (22) se comporte comme un algorithme du Hessien (second ordre). C'est le cas lorsque l'algorithme se trouve loin de la solution. Dans ce cas, l'utilisation de la matrice Hessienne permet de d'accélérer la convergence.

Cet algorithme a bien entendu été généralisé au cas où l'ensemble des places observées  $P_o$  est de dimension supérieure à 1 :

$$\partial\theta(i) = \left( \sum_H \left( \sum_{P_j \in P_o} S_j(k, \theta(i)) \cdot S_j(k, \theta(i))^T + \alpha I \right) \right)^{-1} \cdot \left( \sum_H \left( \sum_{P_j \in P_o} S_j(k, \theta(i))^T \cdot \varepsilon_j(k, \theta(i)) \right) \right) \quad (23)$$

Cette fonction d'évolution des paramètres (23) fait apparaître un terme  $S_j(k, \theta(i))$  qui représente le vecteur de sensibilité du marquage de la place  $P_j$  en fonction des paramètres. L'ensemble de cet algorithme repose sur l'évaluation de cette fonction de sensibilité (conditions initiales nulles) donnée par (Lefebvre & Thomas, 2002; Lefebvre & Thomas, 2005) :

$$s_j(k+1, x_{\max \gamma}) = s_j(k, x_{\max \gamma}) + \left( w_{j\gamma} \cdot m_{f_\gamma}(k) + \sum_{T_l \in \bullet P_j \cup P_j^*} w_{jl} \cdot x_{\max l} \cdot s_{f_l}(k, x_{\max \gamma}) \right) \cdot \Delta t \quad (24)$$

où les fonctions  $f_l(M(t)) \in \{1, \dots, n\}$  sont définies telles que  $m_{f_l}(t) = \mu_l(t)$  pour  $l=1, \dots, p$  représente le marquage minimal des places amont de la transition.

D'une manière similaire, on peut déduire les fonctions de sensibilité du marquage du RdPCV en fonction des paramètres d'incidence :

$$s_\alpha(k+1, w_{\alpha\beta}) = s_\alpha(k, w_{\alpha\beta}) + \left( x_{\max \beta} \cdot m_{f_\beta}(k) + \sum_{T_l \in \bullet P_j \cup P_j^*} w_{\alpha l} \cdot x_{\max l} \cdot s_{f_l}(k, w_{\alpha\beta}) \right) \cdot \Delta t \quad (25)$$

$$s_j(k+1, w_{\alpha\beta}) = s_j(k, w_{\alpha\beta}) + \left( \sum_{T_l \in \bullet P_j \cup P_j^*} w_{jl} \cdot x_{\max l} \cdot s_{f_l}(k, w_{\alpha\beta}) \right) \cdot \Delta t \quad j \neq \alpha$$

Pour l'estimation des paramètres d'un RdPT, il est nécessaire de pouvoir estimer les durées minimales de franchissement associées aux transitions. Pour ce faire, il est possible d'exploiter l'équivalent RdPCV du modèle RdPT et l'estimation des fréquences de franchissement  $x_{\max \gamma}$  correspondra alors à l'estimation de  $1/D_{\min \gamma}$  de la transition  $T_\gamma$ .

Ces algorithmes ont été testés sur plusieurs exemples de modèles RdPCV et RdPT qui ont permis de montrer leurs bonnes performances (Lefebvre & Thomas, 2002; Lefebvre & Thomas, 2005). L'exploitation de ces algorithmes pour la surveillance et la détection de défauts ont permis de mettre en évidence leur rapidité de détection et leur sensibilité (Lefebvre & Thomas, 2005).

---

## *II.3 ÉVALUATION ET PILOTAGE DU TRAFIC*

Si dans le paragraphe précédent, nous avons montré qu'il est possible d'estimer les paramètres d'un RdP à partir d'un jeu de données, les RdP sont généralement vus comme des modèles de connaissances et nous allons ici construire des modèles de connaissances en exploitant le formalismes des RdP afin de modéliser le trafic dans un premier temps, puis d'exploiter ces modèles pour construire un modèle RdP hybride d'un carrefour à feux exploitables pour son pilotage. Ces modèles théoriques, une fois construits, peuvent être adaptés à la réalité en utilisant l'algorithme d'estimation paramétrique des RdP précédemment décrit.

### *II.3.1 Du microscopique au macroscopique : les RdP pour modéliser le trafic*

#### *II.3.1.1 Introduction*

Nous avons vu au paragraphe II.2.1.1 que le trafic peut être modélisé de manière macroscopique ou microscopique. Si les modèles macroscopiques, présentés précédemment, reposent sur l'assimilation des flux de véhicules à un fluide incompressible (paragraphe II.2.1.1), dans les modèles microscopiques le comportement de chaque conducteur est modélisé individuellement. Ces modèles ont pour but de représenter les interactions entre véhicules et permettent d'analyser le mouvement de l'ensemble des véhicules sur les infrastructures routières. Ces modèles microscopiques fournissent des informations abondantes sur le trafic mais ils nécessitent généralement un temps de calcul très élevé.

Les variables microscopiques sont liées à la dynamique des véhicules considérés individuellement (Cohen, 1990) :

- écart de temps inter-véhiculaire (durée entre les instants de passage de l'avant de deux véhicules successifs par le même point de la route),
- espacement inter-véhiculaire (distance séparant, à un instant donné, l'avant de deux véhicules successifs),
- vitesse (vitesse instantanée d'un véhicule),
- accélération (accélération instantanée).

Deux grandes classes de modèles microscopiques ont été proposées dans la littérature :

- les modèles de poursuite (ou modèles véhicule-suiveur) permettent de décrire les mécanismes régissant les interactions entre les véhicules et le mouvement de l'ensemble des véhicules sur les infrastructures. Ils exploitent une équation différentielle décrivant l'accélération d'un véhicule en fonction du comportement du véhicule le précédant (Herman & Potts, 1959). Le modèle de poursuite initial présente le désavantage d'introduire des comportements aberrants lors de l'analyse macroscopique du trafic comme une vitesse moyenne de flot de véhicule infinie pour une densité de trafic nulle. Ces défauts ont conduit à la proposition de nombreuses évolutions dans le but de les corriger avec plus ou moins de bonheur (Tolba, 2004).
- Les modèles de particules basés sur les automates cellulaires (AC) où le temps et l'espace sont discrétisés. Dans de tels modèles, la section de route étudiée est discrétisée en un nombre fini de cellules, chaque cellule pouvant contenir au plus un véhicule (Nagel, 1998).

La circulation du trafic est caractérisée par un mélange de comportements : continu sur les sections de voies et discret au niveau des intersections. Partant de ce constat d'autres outils issus de la théorie des systèmes à événements discrets ont été exploités pour modéliser le trafic. On peut citer les files d'attentes (Heidemann, 1996) et les RdP (Wang, et al., 1993).

Après avoir présenté la section de route prise en exemple au paragraphe suivant, dans le but d'estimer les caractéristiques moyennes du trafic, nous proposons au paragraphe II.3.1.3 un modèle macroscopique basé sur les RdPCV. La discrétisation spatiale de ce modèle en un modèle microscopique sera présentée au paragraphe II.3.1.4. Un modèle microscopique à base de RdPT en sera extrapolé au paragraphe II.3.1.5.

### *II.3.1.2 Une section de route*

Nous considérons ici une section de route ou d'autoroute sur lequel circule un grand nombre de véhicules. Si l'on suppose que la circulation des véhicules est supposée continue et stationnaire, alors, la modélisation de l'écoulement du trafic par l'intermédiaire d'un modèle macroscopique du 1<sup>er</sup> ordre est pertinente. En présence d'un phénomène complexifiant la circulation (rétrécissement de la chaussée, occurrence d'un accident...) l'exploitation d'un modèle du 1<sup>er</sup> ordre peut s'avérer complexe (Bourrel &

Henn, 2002) et de nombreux auteurs ont adopté la résolution numérique de ce modèle en effectuant une discrétisation spatio-temporelle (Daganzo, 1995; Lebacque, 1996).

La discrétisation spatiale consiste à subdiviser une route ou autoroute en  $N$  segments équidistants  $[x_{i-1}, x_i]$  de longueur  $\Delta_i$  usuellement choisie dans l'intervalle 100m – 3000m. Chaque segment peut posséder au plus une rampe d'accès et une rampe de sortie et sur chaque segment, les grandeurs caractéristiques de l'écoulement (densité, débit, vitesse) sont supposées dépendre uniquement du temps.

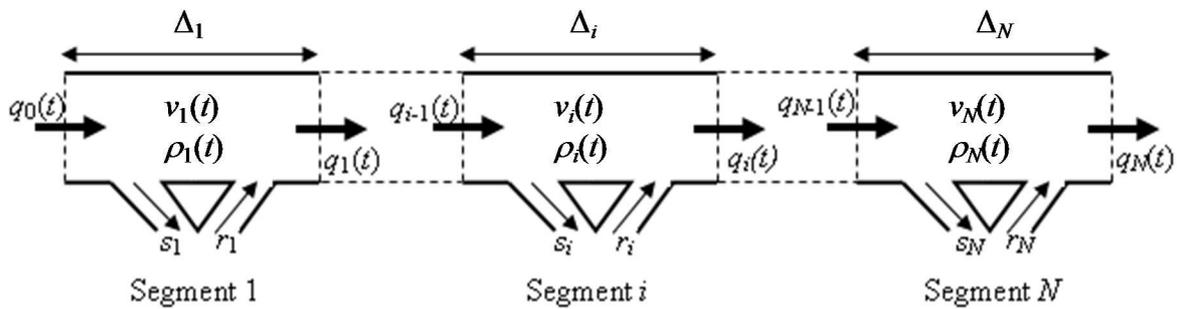


Figure 7 Discrétisation spatiale d'un segment de route

La discrétisation temporelle revient, classiquement, à choisir une période d'échantillonnage  $T$  ce qui permet de considérer l'ensemble des variables caractéristiques de l'écoulement comme constantes sur chaque intervalle  $[k.T, (k+1).T]$ .

Pour chaque segment, l'écoulement du trafic peut être modélisé à l'aide d'un modèle du 1<sup>er</sup> ordre caractérisé par son équation de conservation :

$$\rho_i(k+1) - \rho_i(k) = \frac{T}{\Delta_i} \cdot (q_{i-1}(k) - q_i(k)) + T \cdot (r_i(k) - s_i(k)) \quad (26)$$

et son diagramme fondamental :

$$q_i(k) = f_i(\rho_i(k)) \quad (27)$$

où  $r_i(k)$  et  $s_i(k)$  représentent les débits sur les rampes d'entrée et de sorties. Les paramètres caractéristiques ( $V_{free}$ ,  $\rho_{cr}$ ,  $\rho_{max}$ ,  $q_{max}$ ) sont supposés être les mêmes sur tous les segments à la condition qu'il n'y ait pas changement concernant le nombre de voies ou la vitesse maximale autorisée sur le tronçon de route considéré.

En s'appuyant sur cette discrétisation spatio-temporelle, il est possible de construire un modèle RdPCV du trafic.

### II.3.1.3 Modèle RdPCV macroscopique

Dans un premier temps considérons la modélisation macroscopique du trafic sur un tel tronçon routier discrétisé dans l'espace. Si l'on considère le cas simple qui ne comporte aucun flux d'entrée ou de sortie secondaire (pas de rampe d'accès  $r_i$  ou de sortie  $s_i$ ), alors chaque segment  $i$  de la section de route va être représenté par une place  $P_i$ . L'écoulement du flux de véhicules d'un segment  $i$  au segment  $i+1$  est représenté par la transition  $T_i$ . Enfin, le marquage  $m_i(t)$  de la place  $P_i$  va représenter le nombre de véhicules présents sur le segment  $i$  quand la vitesse de franchissement  $x_i(t)$  de la transition  $T_i$  représente le débit  $q_i(t)$ .

Ce modèle simpliste pourrait représenter la réalité si chaque tronçon ainsi modélisé était totalement indépendant et de capacité infinie ce qui n'est bien évidemment pas le cas. Considérons le diagramme fondamental (Figure 2) qui représente deux comportements distincts du trafic (trafic fluide et trafic congestionné). Ces deux comportements sont modélisés par deux fonctions non linéaires. Une première étape va consister à ajouter, pour chaque segment, une place  $P'_i$  dont le marquage  $m'_i(t)$  va permettre de représenter le nombre d'emplacements disponibles dans le tronçon  $i$ . La somme des marquages  $m_i(t)$  et  $m'_i(t)$  va donc représenter la capacité du tronçon. Par ailleurs, le débit  $q_i(t)$  entre les segments  $i$  et  $i+1$  dépend du nombre de véhicules présents dans le segment amont, c'est-à-dire du marquage  $m_i(t)$ , mais aussi, du nombre d'emplacements disponibles dans le segment aval, c'est-à-dire du marquage  $m'_{i+1}(t)$ , et enfin du nombre de véhicules moyens pouvant franchir à un instant donné, le segment  $i$ . Cette dernière notion va pouvoir être représentée en associant une place  $P''_i$  à chaque transition qui va permettre de limiter le nombre de franchissements simultanés. Le modèle résultant est présenté Figure 8 (Tolba, et al., 2001).

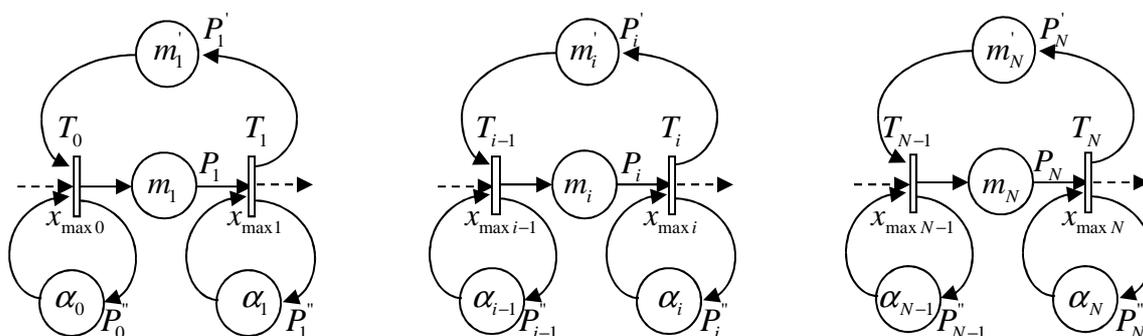


Figure 8 Modèle macroscopique RdPCV d'un segment de route



La stratégie de surveillance est basée sur l'estimation paramétrique des RdPCV décrite au paragraphe II.2.2. Ces travaux ont montré qu'il est possible de détecter l'occurrence d'une congestion sur un segment en étudiant les fréquences maximales de franchissement des transitions en exploitant l'évolution des marquages des places  $P_1$ ,  $P_2$  et  $P_3$  représentatifs du nombre de véhicules présents sur chaque segment (Thomas & Lefebvre, 2005).

Ce modèle macroscopique permet de reproduire le comportement moyen d'un flot de véhicules sur une autoroute donnée. Cependant, il ignore, comme dans tout modèle macroscopique, l'interaction inter véhiculaire. En effectuant une discrétisation spatiale de ce modèle macroscopique, nous pouvons établir un modèle microscopique d'un segment de route à base de RdPCV.

#### II.3.1.4 Du macroscopique au microscopique

Le modèle macroscopique RdPCV précédemment décrit permet de modéliser une portion de route en découpant ce dernier en un nombre restreint de segments. De ce fait, il parait évident qu'en augmentant la discrétisation spatiale, c'est-à-dire le nombre de segments, on va pouvoir se rapprocher d'une modélisation microscopique que l'on atteindra lorsque chaque segment représentera une portion de route d'une longueur de 7,5 m correspondant à la longueur d'un véhicule augmentée de l'espace inter-véhiculaire. On parlera alors de cellules qui seront toutes modélisées par un ensemble de places  $P_i$ ,  $P_i'$ ,  $P_i''$  comme présenté par la Figure 11 (Tolba, et al., 2002).

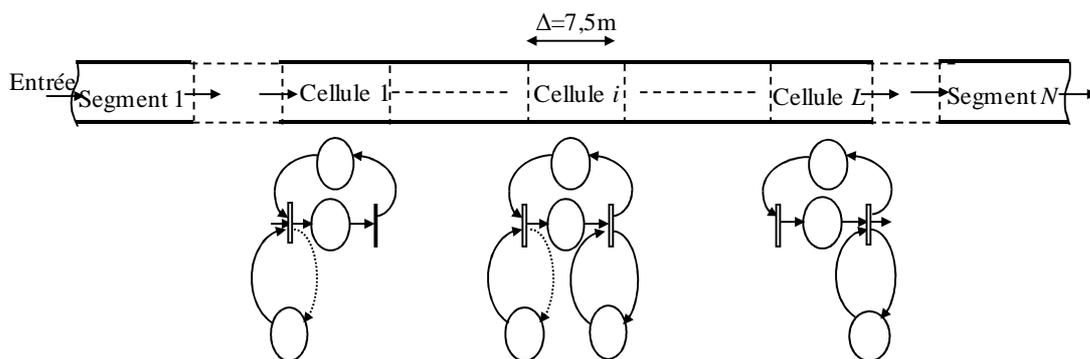


Figure 11 Modélisation microscopique RdPCV

Pour réaliser une modélisation microscopique l'équation (30) est remplacée par :

$$\alpha_i = \frac{\Delta_i}{1 + v_{free i}} \quad (31)$$

où  $\Delta_i = 7,5m$  représente la longueur d'une cellule (Tolba, et al., 2002).

### II.3.1.5 Modèle RdPT microscopique

Le modèle RdPCV microscopique permet de donner, d'un point de vue macroscopique, une représentation assez réaliste des flux de trafic. Cependant, du fait de l'évolution continue du marquage des RdPCV, le marquage de chaque cellule n'indique pas la présence ou non d'un véhicule dans la cellule, mais bien plutôt une probabilité de présence d'un véhicule dans la cellule. Ce fait induit certaines limitations dans la description individuelle des trajectoires des véhicules.

Les RdPCV sont une approximation continue des RdPT et il est toujours possible de transformer un RdPT en un RdPCV et vice et versa (cf. paragraphe II.2.2.2). Il est donc possible de construire un modèle RdPT du trafic dérivé du modèle RdPCV précédemment décrit. Cependant, si dans un RdPCV, il n'existe pas de notion de conflit, ce n'est pas le cas dans les RdPT et il est nécessaire de développer une stratégie pour les gérer.

En se référant aux méthodes de transformation des RdPT en RdPCV (David & Alla, 1997), le marquage des places, réel dans les RdPCV devient entier et il est nécessaire de remplacer la fréquence de franchissement maximale des transitions des RdPCV en une durée minimale associée à la transition  $T_i^j$  :

$$d_i^j = \frac{1}{v_{\max i}^j} = \frac{\Delta_i}{v_{free i}} \quad (32)$$

où  $i \in \{1, \dots, L\}$  est un index représentant la cellule et  $j \in \{1, \dots, v_{free}\}$  est un index représentant la vitesse du jeton dont le principe est explicité ci-dessous.

La transformation direct du RdPCV en un RdPT est cohérente dans des conditions de trafic où la vitesse libre est limitée à une cellule par seconde ce qui correspond à une avance de 7,5 m/s, correspondant à 27 km/h. Il est évident que cette contrainte est trop restrictive pour permettre de représenter toutes les conditions de trafic sur une autoroute où la vitesse maximale autorisée est de 130 km/h par exemple. Pour répondre à ce problème, il est possible d'introduire dans le modèle RdPT des transitions supplémentaires, dites transitions de sauts. Ainsi, il est possible à un jeton d'un RdPT représentant un véhicule circulant sur une autoroute d'atteindre 135 km/h à condition que ce jeton puisse sauter 5 cellules.

Toutefois, l'ajout de ces transitions de sauts produit des conflits structurels qu'il faut solutionner. En effet, lorsqu'un jeton représentant un véhicule arrive dans une place, il sensibilise l'ensemble des transitions de sortie de cette place (conflit effectif), chacune de ces transitions représentant une vitesse que peut prendre le véhicule. Dans ce cas, le choix entre ces transitions nécessite la mise au point des conditions de franchissement sur l'ensemble des transitions et l'application de règles de priorité. Pour résoudre ces conflits, deux approches peuvent être utilisées. La première consiste à mettre en places des arcs inhibiteurs, la deuxième est d'introduire des fonctions d'inhibition dans les durées associées aux transitions. Ces deux approches ont été proposées et comparées dans (Tolba, et al., 2005a).

Ces modèles microscopique (RdPCV et RdPT) ont été testés et comparés sur différents exemples de simulation et les résultats ont montré que ces modèles ont des comportements cohérents avec la réalité comparativement à ceux obtenus avec d'autres types de modèles tels que les modèles de particules ou les modèles véhicules suiveurs, tant au niveau du comportement microscopique que macroscopique (Tolba, et al., 2005a). Ces modèles sont exploitables dans des stratégies de contrôle de feux de trafic que nous allons maintenant présenter.

### ***II.3.2 Commande des feux de trafic***

Les modèles précédemment décrits permettent d'étudier le trafic sur des sections de route ou d'autoroute, tant du point de vue macroscopique que microscopique. Les carrefours à feux introduisent dans les flux de trafic des discontinuités dues aux commutations des feux. Ces commutations peuvent aisément être représentées à l'aide de RdPT. Il est donc possible, en associant les modèles précédemment décrits à un tel modèle de commutation, de construire un modèle global d'un carrefour à feux qui sera discret dans le cadre d'une approche microscopique ou hybride si l'on met en place une approche macroscopique. Ces modèles se trouvent à la base des algorithmes de commande que nous avons mis en place. Dans un premier temps, nous allons décrire le carrefour isolé que l'on cherche à modéliser avant d'en donner les modèles que nous exploiterons finalement dans un algorithme de commande.

### II.3.2.1 Description d'un carrefour isolé

Dans un but de simplification, nous allons nous focaliser sur un carrefour isolé comportant 4 voies ( $L_1, L_2, L_3, L_4$ ) contrôlé par 4 feux de signalisations ( $F_1, F_2, F_3, F_4$ ) Figure 12a. Le passage à un carrefour de plus grande taille se traitera de manière similaire.

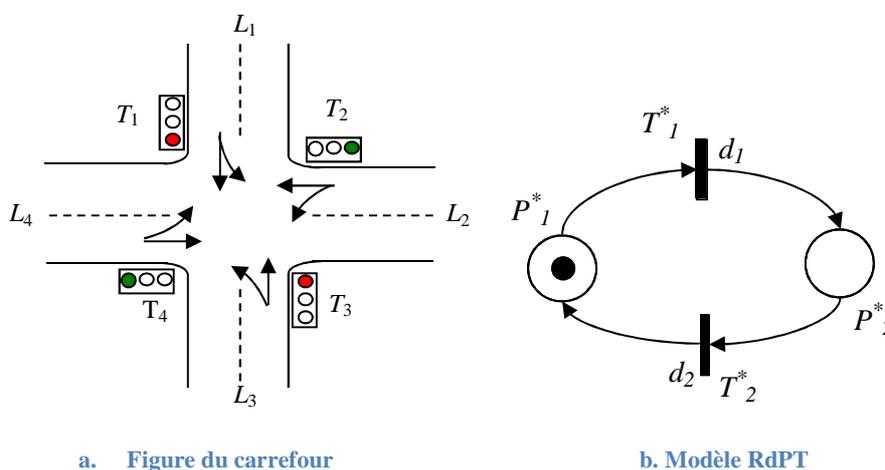


Figure 12 Carrefour à feux isolé

Les voies du carrefour sont caractérisées par un taux d'arrivée moyen, une capacité, une vitesse libre. Des boucles de détection des véhicules sont implantées à l'entrée de chaque voie. Le trafic s'écoule dans deux directions principales : Est-Ouest (E-O) et Nord-Sud (N-S) et les mouvements de « tourne à gauche » et « tourne à droite » sont exclus de l'étude toujours dans un souci de simplicité. Leur prise en compte peut se faire en considérant des voies supplémentaires dans le carrefour.

### II.3.2.2 Modèles RdP du carrefour

En exploitant les deux modèles du trafic microscopique et macroscopique décrits au paragraphe II.3.1, nous pouvons construire deux modèles RdP du carrefour à feux, microscopique à base de RdPT et macroscopique à base de RdP hybride.

Chaque feu de signalisation du carrefour possède trois états : vert, orange et rouge. La durée du feu orange est constante et par hypothèse, elle est ajoutée à celle du rouge. De la même manière, on peut prendre en compte les durées des feux piétons en les agrégeant à celles des feux rouges. De ce fait, seul subsiste, pour un feu, les deux états : « vert » et « rouge ». Les phénomènes de ralentissement et de démarrage des véhicules ne sont pas pris en compte. La modélisation du cycle des états du feu (vert, rouge, vert...) est réalisée à l'aide d'un RdPT représenté Figure 12b. Les places  $P_1^*$  et  $P_2^*$  représentent

respectivement l'état du feu sur la voie (E-O) et celui sur la voie (N-S). La présence d'un jeton dans la place indique que le feu correspondant est « vert ». Les durées associées aux transitions correspondent aux durées de « vert » de chaque feu. La construction du modèle de carrefour va pouvoir se faire de manière modulaire en associant le modèle RdPT des feux avec des modèles RdP des différentes voies du carrefour (Tolba, et al., 2003). Ainsi, en exploitant le modèle RdPT microscopique décrit au paragraphe II.3.1.5, nous obtenons le modèle RdPT microscopique du carrefour présenté Figure 13.

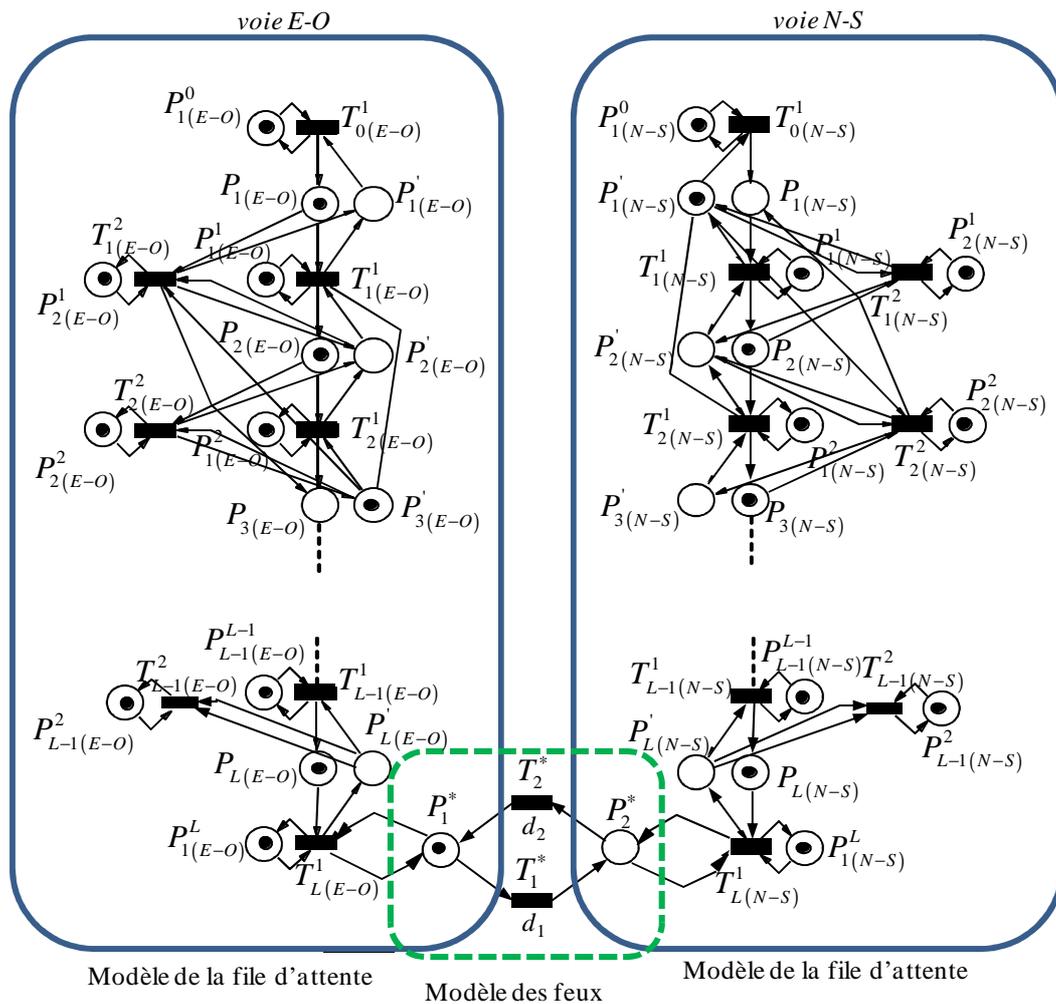


Figure 13 Modèle RdPT microscopique du carrefour

Ce modèle présente l'avantage de pouvoir décrire le comportement individuel de chaque véhicule entrant dans le carrefour, mais également le désavantage de devenir très complexe quand la taille des files d'attente ou quand le nombre de voies entrant dans le carrefour augmentent. Pour diminuer cette complexité, il est possible d'associer des

modèles RdPCV macroscopique au modèle RdPT des feux ce qui nous conduit à construire un modèle hybride du carrefour présenté Figure 14.

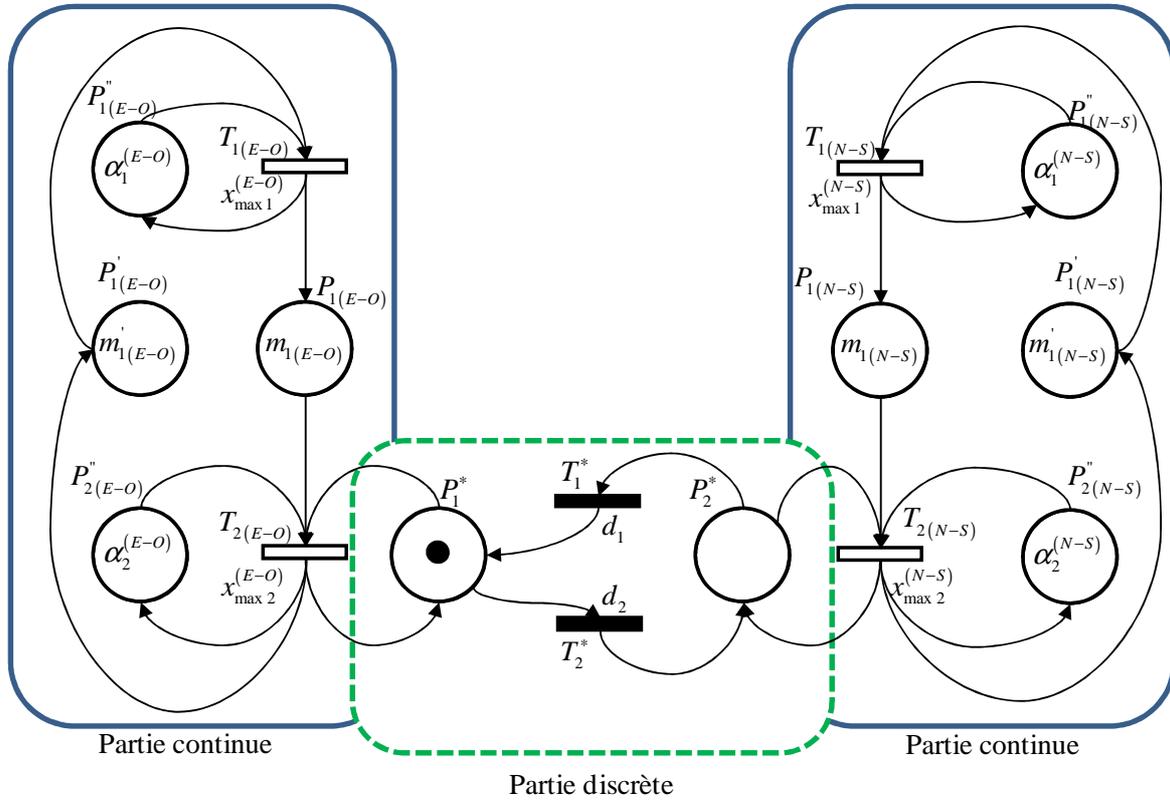


Figure 14 Modèle RdPH macroscopique du carrefour

Pendant un cycle de feu  $[t_0; t_f]$  correspondant à la somme des temps de « vert » et « rouge » sur la voie  $(E-O)$  et donc, aux temps de « rouge » et « vert » sur la voie  $(N-S)$ , l'écoulement du trafic dans l'intersection est régi par les deux systèmes d'équations suivant :

$$S_1 = \begin{cases} \dot{m}_{1(E-O)}(t) = x_{\max 1}^{(E-O)} \cdot \min(\alpha_1^{(E-O)}; m'_{1(E-O)}) - x_{\max 2}^{(E-O)} \cdot \min(\alpha_2^{(E-O)}; m_{1(E-O)}) & E-O \text{ feu vert} \\ \dot{m}_{1(N-S)}(t) = x_{\max 1}^{(N-S)} \cdot \min(\alpha_1^{(N-S)}; m'_{1(N-S)}) & N-S \text{ feu rouge} \end{cases} \quad (33)$$

pour  $t \in [t_0; t_c]$ ,  $t_c$  étant l'instant de commutation des feux, avec les conditions initiales

$m_{1(E-O)}(0)$  et  $m_{1(N-S)}(0)$  et :

$$S_2 = \begin{cases} \dot{m}_{1(E-O)}(t) = x_{\max 1}^{(E-O)} \cdot \min(\alpha_1^{(E-O)}; m'_{1(E-O)}) & E-O \text{ feu rouge} \\ \dot{m}_{1(N-S)}(t) = x_{\max 1}^{(N-S)} \cdot \min(\alpha_1^{(N-S)}; m'_{1(N-S)}) - x_{\max 2}^{(N-S)} \cdot \min(\alpha_2^{(N-S)}; m_{1(N-S)}) & N-S \text{ feu vert} \end{cases} \quad (34)$$

pour  $t \in ]t_c; t_f]$ , avec les conditions initiales  $m_{1(E-O)}(t_c)$  et  $m_{1(N-S)}(t_c)$  calculées par  $S_1$ .

Ces deux modèles ont été testés et comparés en exploitant dans un premier temps un algorithme de commande des feux intervalle-véhicule (Papagiorgiou, et al., 2003). Les résultats obtenus ont montré que le modèle macroscopique RdPH permet bien d'obtenir le comportement moyen du modèle de trafic microscopique RdPT (Tolba, et al., 2003).

Les algorithmes de commande des feux de trafic ont pour but de déterminer les durées optimales des phases de « vert » pour chaque feu. Ils reposent principalement sur l'estimation des temps d'attente et des longueurs de queues aux intersections, l'objectif étant de déterminer l'instant de commutation.

L'intersection isolée que nous avons modélisée est décrite par les deux systèmes  $S_1$  et  $S_2$  (équations 33 et 34) et ses interactions événementielles sur les transitions  $T_1^*$  et  $T_2^*$  (changement d'état du feu) est un système hybride non linéaire. C'est pourquoi, nous avons proposé une approche de commande de feux multi modèles dans laquelle les systèmes  $S_1$  et  $S_2$  sont décomposés en plusieurs modèles linéaires. Chacun de ces modèles linéaires décrit l'évolution de la file d'attente  $m_{1(E-O)}$  ou  $m_{1(N-S)}$  par des équations différentielles du premier ordre pendant une période de temps appelée phase linéaire  $E_j^i$  ( $i=E-O ; N-S$  et  $j$  désigne le numéro de la phase linéaire). La résolution des équations différentielles correspondant à chaque phase linéaire permet de représenter toutes les expressions des marquages  $m_{1(E-O)}$  et  $m_{1(N-S)}$ . La validation de deux phases linéaires pour chacune des voies  $E_j^{E-O}$  et  $E_j^{N-S}$  décrit la phase dynamique des systèmes  $S_1$  et  $S_2$ . Le passage d'une phase linéaire à la suivante se produit lorsqu'un marquage  $m_{1(E-O)}$  ou  $m_{1(N-S)}$  franchit un seuil à déterminer ou à l'occurrence d'un évènement sur  $T_1^*$  ou  $T_2^*$ . L'évolution des marquages  $m_{1(E-O)}$  et  $m_{1(N-S)}$  peut être représentée par deux automates hybrides, qui, une fois concaténés, permettent de décrire la dynamique complète des systèmes  $S_1$  et  $S_2$ . L'approche multi modèle ainsi obtenue permet de mettre en relief les interactions entre partie continue (phases linéaires) et discrètes (commutation de phases et changement d'état des feux). Du fonctionnement de ces automates, nous avons tiré trois stratégies de commandes portant sur la rupture des seuils (seuils bas ; seuils hauts ; seuils mixtes – hauts et bas).

La commande par rupture de seuil bas consiste à détecter la rupture des seuils bas sur la voie dont la phase est « vert ». On privilégie alors la résorption de la file d'attente sur la voie dont la phase est « vert ». A l'inverse, la commande par rupture de seuils hauts, appelés également seuils de saturation, sur la voie dont le feu est au « rouge » a pour but de limiter la formation de file d'attente sur la voie dont le feu est au « rouge ». La commande par rupture de seuils mixtes (hauts et bas) va avoir pour but de limiter la formation d'une file d'attente sur la voie dont le feu est « rouge » tout en cherchant à résorber la file d'attente sur la voie dont le feu est « vert ».

Ces trois algorithmes de commande ont été testés et comparés avec des méthodes de commande usuelles (cycle fixe (Webster, 1958) et intervalle-véhicule (Papagiorgiou, et al., 2003)) sur un carrefour isolé. Les résultats ont montré que les commandes à cycle fixe, intervalle-véhicule et rupture de seuil bas fournissent des résultats équivalents (Tolba, et al., 2005b) quand les stratégies de commande par rupture de seuils hauts et mixte permettent de minimiser la taille des files d'attente. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec la commande par rupture de seuils mixtes (Tolba, 2004; Tolba, et al., 2005b).

Dans un deuxième temps nous avons exploité cette stratégie de commande par rupture de seuils mixtes sur un réseau de 3 carrefours et nous avons à nouveau comparé les résultats avec la commande à cycle fixe. Nous avons adopté une approche décentralisée (aucun protocole de communication entre les 3 carrefours) pour les deux commandes. Les résultats ont à nouveau montré les bonnes performances de la commande par rupture de seuils mixtes qui permet de minimiser la taille des files d'attente (Tolba, et al., 2008)

## *II.4 BILAN*

Au cours des cinq années passées au SeT de 1999 à 2005, mon activité a été subdivisée en deux axes. Le premier concerne l'exploitation des techniques d'apprentissage en vue de modéliser et surveiller le trafic alors que le deuxième s'intéresse à la modélisation du trafic en vue de son pilotage par le contrôle des feux tricolores.

Sur le premier axe, les travaux menés ont permis de proposer, d'une part, des modèles macroscopiques de trafic basés sur les réseaux de neurones pouvant être synthétisés à partir des données par apprentissage et dont les paramètres possèdent une signification physique, et d'autre part, de proposer une stratégie d'estimation paramétrique de réseaux de Petri pouvant être exploitée, entre autre, pour la surveillance du trafic. Ces travaux ont

donnés lieu au co-encadrement d'une thèse, à 4 publications dans des revues internationales, 7 communications dans des conférences internationales et 4 communications dans des conférences francophones.

Concernant le deuxième axe, nous avons proposé des modèles de trafic macroscopique et microscopique du trafic à base de réseaux de Petri, ainsi qu'un modèle de carrefour par réseau de Petri hybride. Nous avons étudié l'évolution du trafic dans un carrefour et nous en avons déduit trois stratégies de commande des feux tricolore dont nous avons étudié les performances. Ces travaux ont donné lieu au co-encadrement d'une thèse, à 1 publication dans une revue internationale, 2 dans des revues nationales, 5 communications dans des conférences internationales et 1 communications dans des conférences francophones.



---

Chapitre

**III**

**III SYNTHÈSE DES TRAVAUX DE  
RECHERCHE MENÉS AU CRAN**



### *III.1 INTRODUCTION*

En septembre 2005, suite à une mutation, j'ai rejoint le groupe thématique SYMPA (Système de Production Ambiant) du CRAN et plus particulièrement l'équipe projet SP (Système Produit).

Les travaux menés par cette équipe abordent des problématiques a priori très différentes de celles abordées au sein du SeT. En effet, cette équipe s'intéresse à diverses manières de piloter les flux de produits dans les systèmes logistiques complexes (chaînes logistiques et intra-atelier) ainsi qu'aux moyens d'y apporter des services (concepts d'environnement ambiant) en prenant pour hypothèse que le produit est actif et/ou communicant.

Cependant, si les domaines applicatifs semblent différents (trafic urbain au SeT, chaînes logistiques au CRAN) ils présentent un point commun important : dans les deux cas on s'intéresse à la modélisation de flux (de véhicules au SeT, de pièces, produits ou lots au CRAN). Il est donc logique que les outils, techniques, méthodes... que j'ai exploités et développés durant ma première partie de carrière ont pu être adaptés à ce nouveau domaine applicatif.

Les travaux de l'équipe projet SP ont donc concerné le pilotage de flux de produits centralisé/distribué, l'identification biométrique, les systèmes contrôlés par le produit (SCP) et leur outillage. De manière schématique, deux grandes philosophies coexistent concernant la planification et le pilotage de la production : les approches centralisées et les approches distribuées. Les approches centralisées ont l'avantage de fournir une gestion optimale au niveau global mais elles présentent, entre autres désavantages, une faible réactivité aux événements non prévus. Les approches distribuées, au contraire, présentent une bonne réactivité aux aléas mais peuvent être affectées d'un problème de myopie (optimisation d'un optimum local au détriment de l'optimum global). C'est pourquoi l'équipe SP s'est intéressé à l'hybridation centralisé/distribué des systèmes de pilotage en exploitant le concept SCP.

Le concept SCP repose sur le principe que les produits sont intelligents et, au minimum communicant, ce qui les rend aptes à se communiquer des informations sur leurs états respectifs entre eux, mais également avec le système de production, afin de faire émerger une décision (d'ordonnancement ou de routage par exemple). Pour faire un parallèle avec les systèmes de transports, Il est possible de comparer le concept SCP avec les nouvelles

---

généralisations de systèmes de transports intelligents (ITS) en train d'émerger et qui font appel aux communications C2C (car to car), C2I (car to infrastructure) et I2C (infrastructure to car) (Monteil, et al., 2013).

Un des principaux problèmes rencontrés dans le concept SCP est la difficulté d'évaluer la pertinence et les effets d'une décision prise localement sur l'ensemble du système. Pour répondre à ce problème, il est nécessaire de mettre en œuvre des modèles de simulation/émulation permettant d'évaluer l'impact d'un choix entre plusieurs solutions alternatives.

Dans le concept SCP, c'est le produit, en tant que produit (intelligent) inclus dans un système contrôlé par le produit, qui permet de synchroniser les flux physiques avec les flux d'informations. Ceci permet également de synchroniser les informations intrinsèques au produit avec les informations du système de production. L'ensemble de ces données peuvent alors servir conjointement à élaborer des modèles de simulation servant à mettre en œuvre des stratégies de pilotage ou encore à expliciter, en mettant en place des procédures de traçabilité, des événements comme des taux de défaillance ou des défauts de qualité par exemple.

De ce fait, et de manière similaire à ce que l'on a pu voir dans les systèmes de transport, de nombreuses données sont collectées et archivées à chaque instant et ne sont pas exploitées à leur plein potentiel. Aussi, comme pour les systèmes de transport, nous pouvons adresser des problèmes d'apprentissage de comportement et d'évaluation de pilotage des systèmes. A ce niveau, la principale différence entre le concept SCP et les modèles de trafic présentés au chapitre précédent concerne la nature des données et informations exploitables. En effet, si dans le chapitre précédant, une seule source de données (boucle magnétique) fournissait toujours des informations de nature similaire, il n'en est plus de même dans le cadre du concept SCP puisque l'on va devoir être capable de manipuler des données en provenance des produits, mais aussi, des lots de produits, des machines ou des ateliers par exemples. Ces données seront alors de nature (discrètes, continues) différentes, mais également relatives à des concepts de nature différentes (niveau d'en cours d'un atelier, gamme de production d'un produit, durée d'usinage...).

Quoi qu'il ne soit, et comme pour les systèmes de transport, il est possible d'exploiter ces données afin de mettre en œuvre facilement et rapidement des modèles de simulation/émulation de flux. Ces modèles doivent en particulier, permettre d'évaluer rapidement l'impact d'une décision, et être capables de s'adapter à une évolution du

système. Dans ce cadre, les techniques d'apprentissage permettent d'automatiser partiellement la tâche de modélisation. La possibilité d'effectuer un réapprentissage permet d'adapter le modèle à un changement de comportement du système. Enfin, le modèle doit être suffisamment simple pour pouvoir évaluer rapidement plusieurs solutions concurrentes afin d'être capable de prendre une décision en temps réel.

D'autre part, il est également nécessaire de mettre en œuvre des stratégies d'évaluation et de pilotage des SCP. Pour cela, nous proposons d'exploiter une approche de contrôle de modèles Réseaux de Petri que nous appliquerons au pilotage d'un système Kanban.

Au cours de ce chapitre, nous allons commencer par présenter plus en détail le concept SCP au paragraphe III.2. Le paragraphe III.3. présentera l'approche de modélisation des flux réduite. Enfin, le paragraphe III.4. sera dédié à la présentation de l'approche de contrôle de modèles RdP qui est appliquée à une stratégie de pilotage de flux de produits dans un contexte de système kanban.

### ***III.2 LES SYSTEMES CONTROLES PAR LE PRODUIT***

Comme expliqué précédemment, le concept de système piloté par le produit repose sur le fait que les produits sont intelligents (au minimum communiquant) et sont à même de prendre des décisions. Ils constituent la dernière évolution des systèmes de planification et pilotage de production qui à l'origine, adoptaient une approche centralisée.

#### ***III.2.1 Des approches centralisées au SCP***

L'ère industrielle a vu évoluer les objectifs et la complexité des entreprises allant vers une automatisation des processus et une optimisation des activités de planification et de pilotage de la production. Concernant les systèmes de planification et de pilotage de la production, on a vu émerger dans les années soixante, les systèmes « Material Requirement Planning » (MRP). Bien que ces systèmes aient apporté des réponses aux problèmes liés aux retards d'ordres, de consommation discontinue du stock ou encore de gestion de la consommation future de matières premières, ils restent encore des systèmes induisant de l'inertie dans les réactions aux événements non prévus survenant lors de la mise en production.

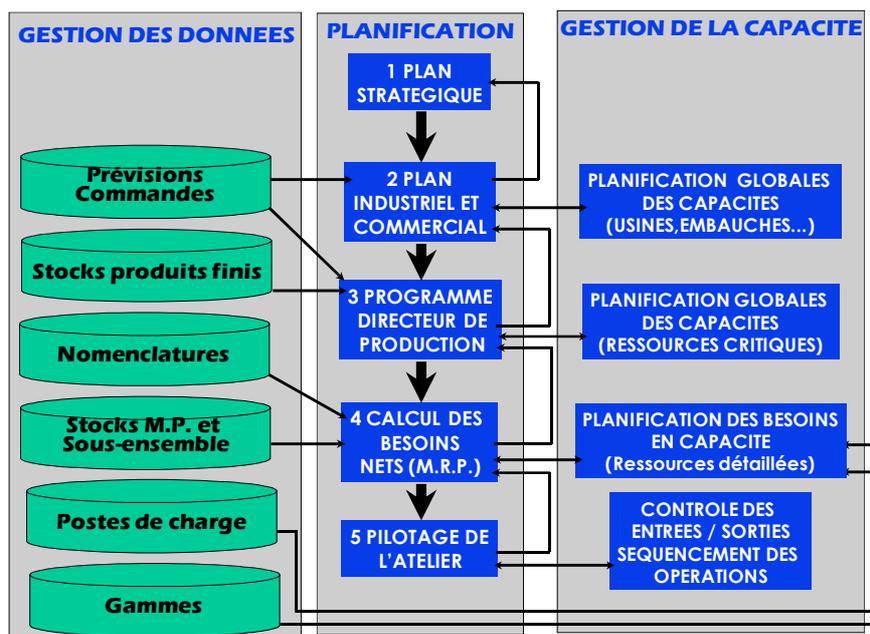


Figure 15. Les différents niveaux de décision des systèmes MRP<sup>2</sup>

Pour combler ces limites, une nouvelle génération de système de pilotage, « Manufacturing Resource Planning » (MRP<sup>2</sup>) a été conçue dans une logique de boucle fermée (Vollman, et al., 1997). Un point notable de ces systèmes est la différence entre les horizons de planification selon les niveaux de décisions. Ces horizons peuvent être classés en horizons de long terme (années, semestres), de moyen terme (trimestres, mois ou semaines), de court-terme (jours) et très court terme (heures ou minutes). Au regard de ces différents horizons de planification, il est possible d'identifier quatre niveaux de décisions, ces niveaux sont : le niveau stratégique, le niveau tactique, le niveau opérationnel et le niveau contrôle ou exécution. La Figure 15 montre ces différents niveaux de décision.

Au début des années quatre-vingts, de nouvelles philosophies de gestion sont apparues engendrant des changements radicaux dans la gestion de la production. Ces changements ont eu pour but d'améliorer la réactivité et la flexibilité, d'une part, et le contrôle de la qualité par les hommes, d'autre part. Ces enjeux restent aujourd'hui d'actualité. Ces changements ont été principalement portés par la philosophie du juste à temps (JàT) et par la théorie des contraintes (ToC).

L'idée principale de la philosophie JàT est basée sur l'utilisation efficace des ressources productives, telles que la main-d'œuvre, les matières premières et les machines. Cette philosophie s'est déclinée en diverses approches comme le Lean manufacturing (Krafcik, 1988), ou le Demand Flow Technology (Costanza, 1996), ou encore le Six Sigma (Tennant, 2001)... Au niveau des ateliers de production, l'outil principal de cette

philosophie pour le pilotage des flux physiques est la méthode Kanban. Par cette démarche, on remplace uniquement la matière consommée par le processus suivant. La philosophie lean manufacturing et surtout la méthode Kanban, ont provoqué une grande révolution dans la gestion de la production. Le changement principal consiste dans le fait que cette fonction n'est plus conçue d'une façon hiérarchique et centralisée comme elle l'était dans les systèmes MRP<sup>2</sup>. Ainsi, les décisions au niveau du flux de production commencent à se faire de manière plus distribuée.

Malgré cet enthousiasme initial pour la décentralisation des décisions, l'apparition de la ToC proposa un point de vue différent et complémentaire de cette conception décentralisée du système, par la recherche d'un optimum global. Ce qui a constitué un retour à la voie centralisée. Ce qui est sous-jacent à la ToC réside dans le fait que l'évolution des organisations peut être mesurée et contrôlée par les changements de trois indicateurs : produit financier généré par les ventes, frais opérationnels et matières premières. La ToC repose sur le fait que la gestion de goulots est la clé pour obtenir le succès. C'est là où la production totale du système peut être maximisée et les stocks peuvent être réduits (Goldratt & Cox, 1992). Cependant, ce traitement de l'information nécessite de revenir à une centralisation des décisions.

Le développement de ces trois philosophies de gestion de la production a bien sûr provoqué l'apparition de beaucoup de systèmes hybrides qui utilisent des techniques provenant indistinctement de MRP<sup>2</sup>, JàT ou ToC et que l'on trouve implémentées dans divers progiciels tels les ERP (Enterprise resources Planning), APS (Advanced Planning Systems), SCM (Supply Chain Management Systems)...

Comme conséquence du développement des systèmes de gestion de la production, à la fin des années quatre-vingts, le concept de production intégrée par ordinateur « Computer Integrated Manufacturing (CIM) » (Waldner, 1992) se renforce. Ce système a pour objectif général de mettre en interconnexion l'ensemble des systèmes d'information inclus dans le système de production. En fait, les systèmes CIM avaient pour objectif de fournir la surveillance et le contrôle de toutes les opérations de l'entreprise. Le paradigme, régnant à cette époque est que ce type de systèmes intégrés serait capable d'avoir une grande flexibilité face aux changements et aussi, de façon générale, pourrait fournir de meilleures solutions face aux problèmes qui se poseront au niveau du système de production. La réalité n'a pas été si belle. On a vu des implémentations qui ont conduit à des systèmes rigides et centralisés incapables de donner des réponses rapides aux changements. Pour

autant, un certain nombre d'ateliers flexibles se sont avérés être très productifs. En conséquence, au début des années quatre-vingt-dix, les systèmes CIM ne seront plus vus comme la solution à tous les problèmes des entreprises de production (Babiceanu & Chen, 2006).

Au vu de ces résultats peu encourageants en termes de flexibilité et de réactivité, obtenus par les systèmes fortement intégrés, au début des années quatre-vingt-dix, une série d'initiatives conjointes entre centres de recherche, universités et entreprises ont vu le jour autour d'un objectif commun : Concevoir et développer les systèmes de production de l'avenir. Dans ce cadre, une des plus importantes initiatives a été l'Intelligent Manufacturing Systems (IMS) Project (Yoshikawa, 1995). Les idées de base d'IMS sont la conception et l'implémentation de systèmes décentralisés dont l'objectif est d'être hautement flexible pour répondre rapidement aux perturbations propres aux processus de production. Jusqu'alors c'étaient les hommes qui observaient et modifiaient les ordres relatifs aux flux. L'idée a été d'en automatiser une partie (voire tout ?) grâce aux nouvelles technologies de communication (Auto-ID, MAS...). Ces nouveaux systèmes se veulent robustes, reconfigurables et réutilisables (Leitao, 2009). De tels systèmes industriels doivent permettre :

- une intégration totale de logiciels hétérogènes et des systèmes de hardware dans une entreprise, une entreprise virtuelle, ou à travers la chaîne logistique,
- une architecture ouverte permettant de disposer de nouveaux sous-systèmes (logiciels ou hardware) ou de ne plus prendre en compte des sous-systèmes existants,
- la communication efficiente et efficace et une coopération entre des départements dans une entreprise et entre des entreprises,
- l'incorporation de facteurs humains dans des systèmes industriels,
- la réponse rapide à des changements d'ordre externe et des perturbations inattendues provenant de l'environnement industriel interne et externe,
- la tolérance aux défauts, autant au niveau du système qu'au niveau des sous-systèmes, pour récupérer les sources des défauts et pour minimiser son impact dans la production.

Parmi les éléments centraux sur lesquels s'est appuyée cette nouvelle conception de systèmes de production, on trouve les systèmes multi-agents provenant de l'intelligence artificielle (Wooldridge & Jennings, 1995). Un autre élément important qui a provoqué

l'adoption de cette vision décentralisée des systèmes de production, a été l'évolution de la programmation structurée à la programmation orientée objets dans les années quatre-vingts. Ces changements conduisent à une conception des systèmes de production de plus en plus décentralisée. Au vu de ce critère, les systèmes de production ont été classés en quatre types (Babiceanu & Chen, 2006) : les systèmes centralisés, hiérarchiques, hiérarchiques modifiés et les systèmes hétérarchiques. Autour de la conception des systèmes décentralisés, vont apparaître différents types de systèmes et de concepts (Tharumarajah, 1996); les principaux seront les systèmes de production bioniques (Ueda, 1992), fractals (Warnecke & Hüser, 1993) et holoniques.

Ces derniers sont basés sur le concept de holon qui est une entité pouvant être contenue dans d'autres holons (Van Brussel, et al., 1998). Les holons sont organisés dans des holarchies et montrent des propriétés comme l'autonomie et la coopération. Ce paradigme a pour objectif principal le fait que la structure du système préserve sa hiérarchie et qu'elle conserve une flexibilité dynamique au niveau hétérarchique.

La comparaison entre le concept d'agent et le concept de holon est assez fréquente. Ainsi, plusieurs auteurs utilisent indistinctement les deux concepts sans faire une claire différence entre eux. Bien qu'un holon puisse être conçu comme un agent, la principale différence est que dans un holon la partie contrôle n'est pas séparée de la partie physique. Tandis que dans le cas d'un agent, (qui est une entité abstraite) une entité physique peut être confondue ou représentée par une entité abstraite.

Le concept de système contrôlé par le produit (SCP) fait évoluer la vision précédente vers un système plus interopérable et intelligent, en définissant le produit comme le contrôleur des ressources des entreprises industrielles (Morel, et al., 2003). Cela mène à la conception d'un produit intelligent. Celui-ci a été défini comme une entité avec une représentation physique et informationnelle, capable d'influencer des décisions qui peuvent l'affecter lui-même (McFarlane, et al., 2003; Meyer, et al., 2009). Dans une perspective pratique, l'identification par radiofréquence (RFID) a été largement acceptée comme une technologie capable de lier l'information avec l'environnement physique (Vrba, et al., 2008). L'idée centrale est le changement de perspective d'une vision classique hiérarchique et agrégée de la fonction de planification et de pilotage de la production vers une perspective distribuée de la prise de décision, dans laquelle, une partie de la décision est réalisée de façon locale et ce, tout au long du cycle de vie des produits. Ainsi, l'information nécessaire est réduite et traitée de manière plus locale. Les systèmes

---

contrôlés par le produit ont été généralement conçus comme une classe particulière des systèmes holoniques.

### ***III.2.2 Des modèles pour un concept***

Dans le concept de SCP, la décision est distribuée sur les différentes entités constituant le système. Les approches de modélisation ont pour but de construire un modèle explicite du système de pilotage et des entités ainsi que des relations existant entre elles. Patriti (Patriti, 1998) distingue quatre écoles de modélisation : les systèmes multi-agents, les systèmes hétérarchiques, les systèmes bionique de production et les systèmes holoniques. Trentesaux (Trentesaux, 2002) a noté que cette typologie n'est pas homogène car elle fait apparaître un amalgame entre critères structurels (hétérarchie) et critères conceptuels (agents, holon). Aussi a-t-il proposé une autre typologie basée sur les outils employés pour concevoir ces modèles : approche par processus, approche multi-agents, approche holonique et autres approches (bionique, fractale...).

L'approche par processus consiste à définir des modèles d'entités orientés vers la dimension temporelle des processus et activités. Dans cette approche on affecte des fonctions de pilotage aux entités ce qui conduit naturellement à la conception de systèmes de pilotage distribués.

L'approche holonique repose sur le concept d'holon qui correspond à un élément d'un système manufacturier autonome et coopératif. Un holon peut être constituant d'un autre holon ce qui induit une démarche récursive. Une holarchie est constituée d'un ensemble d'holons autonomes coopérant entre eux (Van Brussel, et al., 1998).

Les systèmes multi-agents constituent un domaine de l'intelligence artificielle distribuée. Ils sont constitués d'agents aptes à percevoir et agir sur leur environnement tout en se comportant de manière rationnelle (Ferber, 1997). Un système d'agents est conçu pour atteindre des objectifs programmés d'avance par son concepteur.

Parmi les autres approches, sont regroupées deux familles distinctes : les approches bioniques et fractales.

La bionique correspond à l'adaptation du monde vivant et de son comportement pour modéliser d'autres systèmes. Pour ce faire, il est possible d'imiter l'organisation cellulaire où on comparera, par exemple, une unité de production à une cellule ce qui va conduire à une organisation naturellement hiérarchique (cellule, organe, être vivant...). Une autre approche bionique consiste à faire une analogie avec les systèmes à populations sociales

(colonie de fourmis, essaim d'abeilles...) ce qui va conduire à une organisation plutôt hétérarchique.

L'approche fractale repose sur la théorie mathématique des fractales initiée par B. Mandelbrot (Mandelbrot, 2010). La fractalité caractérise une courbe constituée d'un ensemble continu de singularité auto similaires telles que la partie de l'ensemble limite est identique à l'ensemble total. Dans le cadre de la production, le concept d'entreprise fractale s'inspire des structures fractales afin de modéliser de manière récursive les entreprises par des fractales définies par des objectifs et capables de coopération et d'itération (Warnecke & Hüser, 1993).

D'autres auteurs (Herrera, 2011; Tharumarajah, 1996; Ryu & Jung, 2003) ont proposé une autre typologie dans laquelle ils différencient systèmes bioniques (BMS), systèmes fractals (FrMS) et les systèmes holoniques (HMS) auxquels ils associent les systèmes multi-agents.

	<b>FrMS</b>	<b>HMS</b>	<b>BMS</b>
Unité de base	Fractal (BFU) : autonome et auto-similaire en considérant son environnement	Holon : autonome et coopératif défini par une décomposition fonctionnelle du système en exploitant des concepts orientés objets	Cellule (Modelon) : entité biologique utilisant des concepts biologiques tels que l'ADN ou les enzymes
Création d'unité	Prédéfinie mais reproduite ou réorganisée dynamiquement en exploitant une auto-organisation	Prédéfinie et dynamique mais limitée par la décomposition fonctionnelle et par les critères définis en phase de conception	Prédéfinie mais reproduite ou réorganisée dynamiquement en exploitant l'évolution et l'auto-organisation
Fonction de l'unité	Prédéfinie initialement mais pouvant être dynamiquement réassignée à de nouvelles fonctions en phase d'exploitation	Prédéfinie, de nouveaux holons (ou groupe d'holons) embarquant des fonctions particulières peuvent être définis en phase de conception	Prédéfinie, de nouvelles cellules embarquant des fonctions particulières peuvent être définies en phase de conception ou peuvent être divisées ou fusionnées en phase d'exploitation
Flexibilité de l'unité	Réagit en souplesse aux états environnementaux en exploitant une restructuration dynamique, des processus d'auto-optimisation ou d'auto-organisation	Réagit en souplesse aux changements de statut des autres holons en exploitant leurs caractéristiques de coopération et de négociation	Réagit en souplesse aux changements de l'environnement d'exploitation en exploitant des approches biologiques
Définition de groupe	Prédéfinie, mais pouvant être dynamiquement redéfini comme une fractal (un individu ou un ensemble de fractals)	Ensemble d'holons prédéfinis en holarchie permettant de supporter des fonctions spécifiques	Dynamiquement définie comme un organe par l'intermédiaire d'une division en cellules permettant de supporter des fonctions spécifiques
Signification de Reconfiguration	Évolution de la structure fractal en construisant de nouvelles fractals ou en réassignant de nouvelles fonctions à des fractals existantes	Évolution des ressources par réaffectation de ressources à des holons sous réserve de modifier les critères	Évolution des flux de processus en réarrangeant les lignes de flux entre cellules vivantes (disponibles)

Tableau 3. Comparaison structurelle des FrMS, HMS et BMS (Ryu & Jung, 2003)

En effet, ils notent que la principale différence entre un holon et un agent consiste dans le fait qu'un agent est une entité abstraite alors qu'un holon est une entité physique qui peut être représentée ou confondue avec une entité abstraite. Plusieurs architectures de modèles associent d'ailleurs les deux concepts. Ils remarquent d'autre part que les fractales correspondent à des agents particuliers quant aux systèmes bioniques, ils sont bien souvent embarqués dans des agents. Enfin nous pouvons rappeler que les systèmes

multi-agents sont eux-mêmes inspirés de l'étude des comportements sociaux de certaines familles d'insectes (Barbosa & Leitao, 2010). Il n'est donc pas étonnant que ces divers concepts présentent des caractéristiques très proches. Les Tableau 3. Comparaison structurelle des FrMS, HMS et BMS et Tableau 4. Comparaison Fonctionnelle des FrMS, HMS et BMS présentent une comparaison structurelle et fonctionnelle des systèmes fractals, holoniques et bioniques.

	<b>FrMS</b>	<b>HMS</b>	<b>BMS</b>
Tâches/opérations	Coordination itérative des objectifs exploitant un processus de formation d'objectifs simultané et utilisant des coopérations latérales et hiérarchique entre niveaux adjacents	Amélioration itérative descendante des plans et ascendante des décisions et retour d'expériences en suivant une règle LOLA (LOW and LAte commitment)	Spécification des tâches de manière descendante et décision ascendante entre niveaux local et global
Autonomie	Chaque fractal poursuit un objectif individuel en utilisant une résolution de conflits réactive en vue d'atteindre un objectif global	Chaque holon possède son propre traitement pour les mesures d'urgences et une approche intégrative pour la coopération mais régies par un ensemble de règles	Une cellule est dépendante de son environnement et des commandes des opérateurs
Contrôle des unités	Contrôle autonome en vue d'une optimisation et exploitant les caractéristiques des fractals (auto-organisation, auto-optimisation, objectif, restructuration dynamique...)	Réaction autonome aux besoins opérationnels en tant qu'entité auto-suffisante et auto-stable	Réaction douce aux changements environnementaux basés sur des méthodes bio inspirées (calcul évolutionniste, auto-organisation, apprentissage par renforcement...)
Coopération	Par négociation entre les fractals selon une approche orientée objectif	Par négociation entre holon suivant une règle LOLA	Par reproduction et combinaison ADN entre cellules
Coordination	Toute fractal peut être simultanément médiateur et participant (absence de coordinateur)	Utilisation d'holons médiateurs (statiques et dynamiques) pour coordonner les activités des holons	Utilisation d'opérateurs enzymatiques (coordinateurs)
Planification et ordonnancement	Les deux opérations sont effectuées dynamiquement par négociation entre fractals	Planification statique et ordonnancement dynamique (négociation nécessaire pour effectuer une allocation dynamique de ressources)	Planification hiérarchique et ordonnancement dynamique et adaptatif exploitant des approches évolutionnistes
Programme de négociation	Mobile Agent-based Negotiation Process (MANpro)	Contract Net Protocol (CNP)	Approche par simulation

**Tableau 4. Comparaison Fonctionnelle des FrMS, HMS et BMS (Ryu & Jung, 2003)**

### III.2.2.1 Quelques exemples d'architectures de modèles

Dans ce cadre, on peut citer, sans être exhaustif, plusieurs exemples d'architectures de systèmes holoniques basés sur des agents que nous allons présenter succinctement. Une des premières fut YAMS (Van Dyke Parunak, 1987) dont l'objectif principal est de transférer l'intelligence au plus proche du point d'application. C'est une architecture fortement hiérarchique mais incorporant une prise de décision hybride, centralisée au plus haut niveau et coopérative à des niveaux plus bas.

AARIA (Van Dyke Parunak, et al., 1997) est une architecture pour un système de production à base d'agents pour les niveaux opérationnels et d'exécution. Dans cette architecture, les agents sont classés en deux groupes : « agents persistants » (ressources, processus...) et « agents transitoires » (produits, matériaux...). Cette architecture, au contraire de YAMS, n'est pas organisée de manière hiérarchique.

METAMORPH (Maturana, et al., 1999) a été défini comme une architecture multi-agents adaptative pour les systèmes de production. Cette approche repose sur l'utilisation d'agents médiateurs gérant la communication entre groupes d'agents organisés en fédération d'agents. Les agents médiateurs, outre les capacités d'autonomie et de coopération possèdent également des capacités d'apprentissage à partir des activités externes et internes du système.

L'architecture PROSA (Van Brussel, et al., 1998) est une architecture pour la modélisation et l'implémentation d'un système de production holonique. PROSA définit trois types d'holons de base : l'holon ordre, l'holon produit et l'holon ressource. Il est possible de définir des holons staff qui permettent de définir des procédures de décision ou de connaissance. L'ensemble des holons est organisé en une holarchie permettant de réaliser les activités de production. L'holarchie de PROSA est réalisée en construisant des agrégats d'holons de manière dynamique en fonction des activités à réaliser. Cette approche induit une structure hybride hiérarchique/hétéroarchique permettant d'intégrer les approches conventionnelles. Dans cette approche, le système de contrôle est intégré au système de production ce qui induit l'absence de séparation entre parties physique et informationnelle. Un point important dans PROSA est l'interprétation du produit comme une entité active dans le processus de production. Cette possibilité n'est cependant pas toujours utilisée dans les applications de PROSA où, bien souvent, on déporte l'intelligence dans un environnement virtuel plutôt que de la laisser sur le produit. La Figure 16 présente les relations ainsi que la répartition des données et traitements entre les holons de base de l'architecture PROSA.

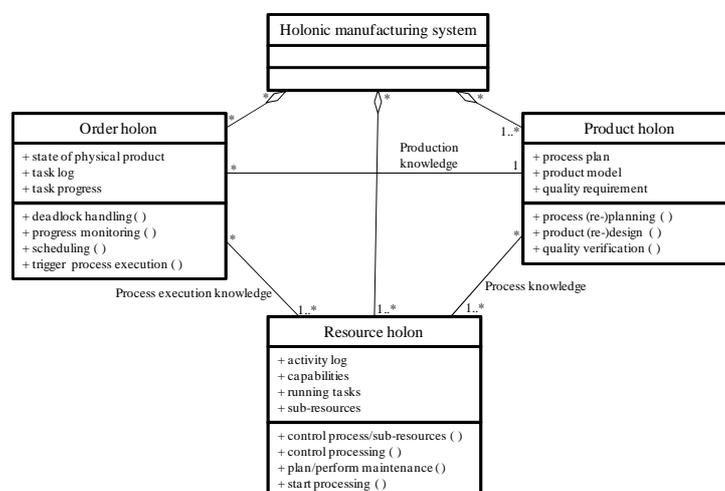


Figure 16. Répartition des données et des traitements entre les holons de PROSA (Van Brussel, et al., 1998)

---

InteRRaP (Fisher, 1999) a été proposé pour des systèmes flexibles de production. Il repose sur la définition d'un agent comme étant un ensemble de couches fonctionnelles liées par une structure de contrôle basée sur la communication. Ces couches correspondent aux trois activités de base que les agents doivent réaliser : coordination, résolution de problèmes locaux et exécution des plans.

ADACOR (Leitao, 2004) est une architecture dédiée à la modélisation et l'implémentation de systèmes agiles de production. L'objectif principal de cette architecture est de réaliser l'intégration des composants de l'entreprise par une organisation distribuée de sa structure. Dans ce cadre, le système requiert la synchronisation des sous-systèmes locaux et de leurs processus de supervision. Pour ce faire, ADACOR définit cinq types d'agents : agents d'opérations, agents surveillants, agents produits, agents ordres et agents interface. Les agents opérations représentent les composants physiques du système et ont la capacité d'interagir avec d'autres agents de manière autonome. Les agents produits spécifient la gamme et possèdent des fonctions d'apprentissage pour, en particulier, intégrer les capacités des machines afin, par exemple, de pouvoir décider de poursuivre une opération ou au contraire de lancer un ré-ordonnancement en cas d'aléa.

Pabadis Promise (Wunsch & Bratukhin, 2007) est une architecture dédiée au contrôle de la production et basée sur une pyramide à trois niveaux (niveaux tactique, opérationnel et de contrôle). Elle exploite deux types d'agents principaux (les agents ordres et ressources) et deux entités de liaisons (les agents surveillants des ordres, les agents surveillants de ressources) assurant la liaison avec l'ERP, et un agent de service (agent base de données) qui met à disposition les informations concernant en particulier les nomenclatures et génération de gammes. Cette architecture a clairement une structure hiérarchique.

Fractal Manufacturing Systems (FrMS) (Ryu & Jung, 2003) est une architecture basée sur le concept d'agents autonomes coopératifs particuliers appelés fractal. L'agent de base est un Basic Fractal Unit (BFU) qui intègre cinq modules fonctionnels : observateur, analyseur, résolveur, organisateur et reporteur. La coordination et la coopération entre ces cinq modules fonctionnels permet au FrMS d'effectuer des opérations dans le but d'atteindre un objectif selon les caractéristiques spécifiques d'une fractal. Ces caractéristiques sont décrites et modélisées en utilisant le concept d'agent dans un univers distribué. Les principales caractéristiques d'une fractal sont l'auto-organisation, l'auto-optimisation, l'objectif individuel, l'autosimilarité, la dynamique et la vitalité. Chaque

BFU fournit des services en considérant un objectif individuel et agit de manière indépendante. L'objectif global est recherché par l'intermédiaire d'un processus de définition d'objectifs individuels supporté par un mécanisme d'héritage. De ce fait, les FrMS sont clairement des systèmes hétérarchiques. Le FrMS proposé par Ryu et Jung (Ryu & Jung, 2003) repose sur trois modèles : modèle de fonction de base du BFU (IDF0), modèle opérationnel (RdP) et le modèle statique/dynamique (UML).

NEIMS (Gu, et al., 2011) est une architecture de type BMS basée sur une analogie avec les principes de contrôle neuronal et régulation hormonale. L'unité de base de NEIMS est une Bio-Inspired Manufacturing Cell (BIMC) incluant des composants fonctionnels assurant le contrôle, la prise de décision, l'exécution et la perception. Ce sont des entités autonomes capables d'effectuer certaines tâches dans le but d'atteindre leur objectif et de s'auto-régler en présence de perturbations. Elles ne sont pas totalement indépendantes mais sont capables de demander services et assistance aux autres BIMC en cas de besoin. NEIMS effectue un contrôle neuronal en fonctionnement normal et applique une régulation hormonale en présence de nouvelle configuration du système. En fonctionnement normal, NEIMS fonctionne donc selon une structure hiérarchique. En présence de nouvelle configuration (défaillance de machine...) un mécanisme de régulation hormonale, initiée par le BIMC détecteur de la perturbation, prend le relais pour ajuster localement le fonctionnement en vue de revenir à un fonctionnement normal. Cette architecture est donc une architecture hybride hiérarchique/hétérarchique.

Comme on vient de le voir, et sans être exhaustif, de nombreuses méthodologies ont été proposées pour la modélisation d'approches distribuées (PROSA, ADACOR, METAMORFH, etc.). Malgré cela, il n'existe pas encore de critères standardisés pour réaliser la modélisation. Ainsi, on peut constater que la modélisation peut être conduite en se focalisant sur les aspects fonctionnels, physiques ou abstraits (Créput 2008). Pourtant, le choix d'outils, critères et modèles reste fortement liés aux préférences et compétences de chaque concepteur.

### *III.2.2.2 Un cadre générique de modélisation*

Au sein de l'équipe SIA, un cadre générique de modélisation a été développé qui exploite et mixe les approches bionique, multi-agents et holonique.

Herrera (Herrera, 2011) a proposé de s'appuyer sur le modèle de système viable (VSM) (Beer, 1984) en l'associant au concept de système contrôlé par le produit pour modéliser

---

un système de planification et de pilotage de la production MRP<sup>2</sup>. Dans un système viable, les composants les plus élémentaires possèdent des capacités d'autonomie, d'auto-organisation, et d'autorégulation permettant de représenter des systèmes complexes sans que les sous-systèmes ne perdent leurs capacités. La récursivité de l'approche permet de prendre en charge la complexité d'un système tout en conservant une structure de modèle simple.

D'autre part, un système de planification et de pilotage de la production de type MRP<sup>2</sup> comprend en général cinq fonctionnalités principales auxquelles sont associées des prises de décisions sur des horizons différents :

- le plan stratégique (horizon annuel),
- le plan Industriel et Commercial PIC (horizon mensuel),
- le Programme Directeur de Production PDP (horizon hebdomadaire),
- l'ordonnancement (horizon journalier),
- la mise en œuvre (temps réel).

Toutes ces fonctions concernent à chaque niveau, différentes agrégations de produits.

En notant que, dans un système contrôlé par le produit, la brique élémentaire est le produit intelligent qui, du fait de ses capacités de communication et d'archivage de l'information, peut interagir avec et sur son environnement. Il est possible d'associer à ce produit intelligent les caractères d'autonomie, d'auto organisation et d'autorégulation nécessaires pour construire, autour de lui, un VSM suffisamment complet pour représenter tous les niveaux d'un système MRP<sup>2</sup>. En s'appuyant sur l'ensemble de ces considérations, Herrera (Herrera, 2011) a proposé de modéliser un système de planification et de pilotage de la production hybride contrôlé par le produit. Nous exploiterons ce modèle en tant que fil rouge pour présenter notre projet dans le chapitre IV. Nous y effectuerons quelques liens avec les modèles présentés au paragraphe précédent afin d'illustrer l'applicabilité de l'approche à d'autres modèles.

La Figure 17 montre la vision générale du système hybride de planification et de pilotage de la production (Herrera, 2011). Dans ce modèle les produits embarquent de l'intelligence en exploitant, par exemple, la technologie RFID pour communiquer des informations. Ce modèle est basé sur le cadre général de modélisation VSM (bionique) dans lequel l'holarchie de produits est construite de telle sorte que chaque niveau de décision correspond à un niveau d'agrégation. Le système holonique résultant est décrit

dans la Figure 17 selon ses 4 quadrants différenciés selon les aspects planification/contrôle d'une part informationnel/physique d'autre part.

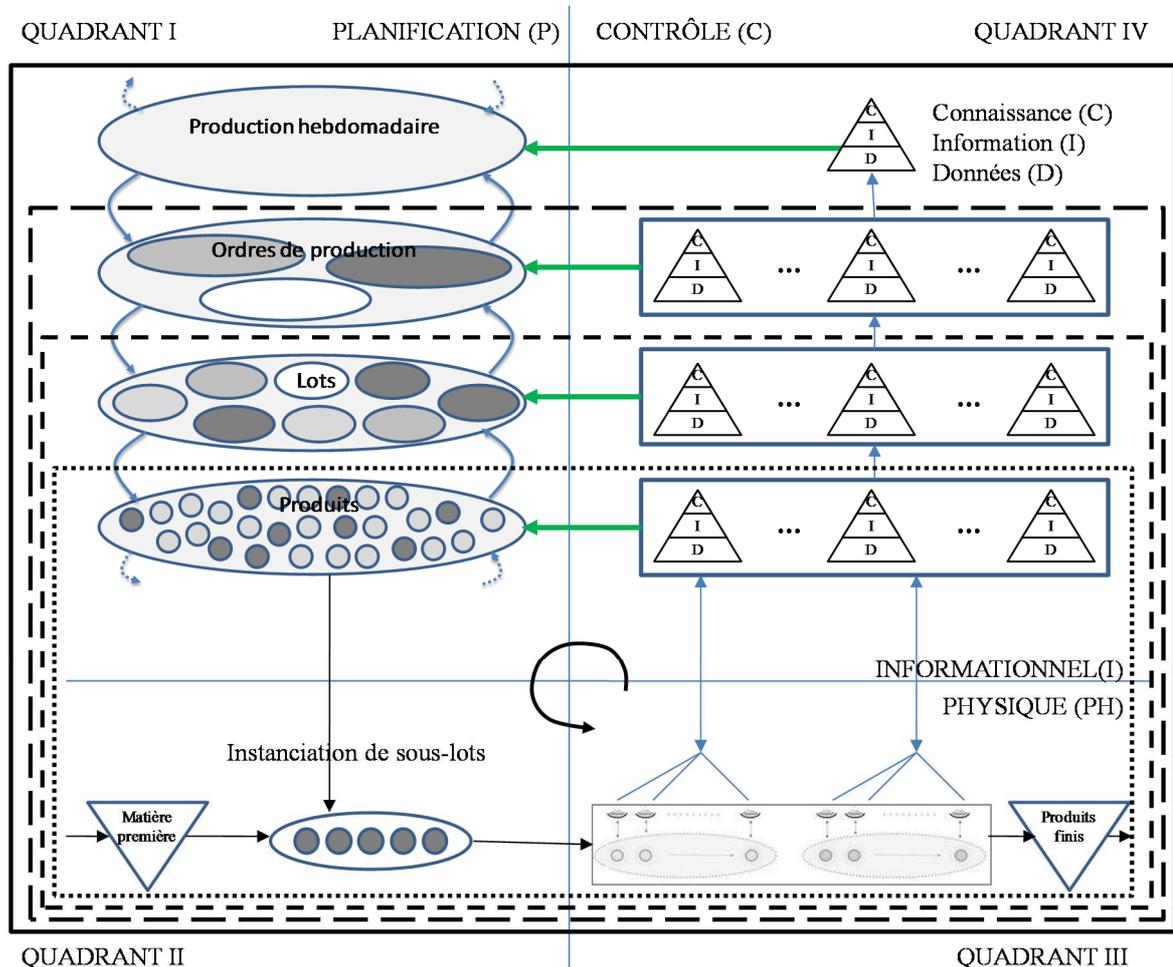


Figure 17. Système hybride de planification et pilotage de la production

Le quadrant I représente la planification/informatique qui peut être centralisée ou coopérative. Elle se décompose, ici, selon un choix a priori, en quatre niveaux d'agrégation des entités produits dérivé des systèmes MRP<sup>2</sup> (production hebdomadaire, ordres de production, lots, produits). A chaque niveau, les entités sont modélisées comme des agents dont il faut organiser la communauté (SMA). Les entités produits sont définies comme des agents possédant un degré de contrôle/autonomie spécifique ce qui permet de représenter tous les degrés d'hybridation du système en partant d'un système purement centralisé (les agents produits ne font que transmettre des informations aux niveaux

---

supérieurs où se passe la décision) jusqu'au système purement distribué ou hétérarchique (les agents communiquent entre eux pour prendre toutes les décisions).

Le quadrant II représente la planification/physique et correspond à l'instanciation des produits au niveau physique sous forme d'holons (holonique) embarquant de l'intelligence et des fonctions leur permettant d'interagir avec l'environnement et d'acquérir le degré d'autonomie désiré.

Le quadrant III représente le contrôle/physique dans lequel les holons produits agissent en fonction des événements les concernant.

Le quadrant IV représente le contrôle/informatique et correspond au processus de transformation des données en provenance de l'atelier physique en information permettant de faire émerger de la connaissance.

C'est cette connaissance que l'on va chercher à inclure dans les agents du quadrant I afin d'améliorer leurs capacités d'adaptation aux événements selon le principe du retour d'expérience.

### *III.3 APPRENTISSAGE DE COMPORTEMENTS DE SYSTEMES CONTROLES PAR LE PRODUIT*

Une des principales difficultés dans la mise en place de systèmes contrôlé par le produit est la difficulté d'évaluer de manière pertinente et rapidement les effets de plusieurs solutions alternatives permettant de prendre la bonne décision, et ce dans un temps restreint. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer de modèles de simulation/émulation suffisamment précis pour que la prise de décision s'appuie sur des informations pertinentes et suffisamment rapide pour que l'information ne soit pas obsolète.

La plupart des systèmes industriels collectent et archivent des données. Cependant, du fait du manque de synchronisation entre les différentes bases de données, il n'est pas toujours possible d'utiliser conjointement des données produits et des données du système de production. Les systèmes contrôlés par le produit présentent l'avantage supplémentaire de synchroniser les flux physiques et informationnels ce qui induit une synchronisation de fait des différentes bases de données. Il est alors possible d'exploiter concurremment dans le même modèle des données systèmes de production et des données produits. De la même manière que dans le cas des systèmes de transport, l'extraction de connaissance de ces données peut se révéler une tâche ardue et l'apprentissage est une voie intéressante pour le

faire. Enfin, ces modèles doivent être simples de construction et rapides d'exécution. Une des voies pour le faire est de construire des modèles de simulation de flux réduits.

### ***III.3.1 Modèles de simulation réduit : un modèle hybride NN-files d'attentes***

#### *III.3.1.1 Introduction*

L'un des objectifs principaux de la simulation de chaînes logistiques est d'évaluer les performances du système d'aide à la prise de décision relatif au contrôle et pilotage de celle-ci. Classiquement, les décisions y sont prises selon trois niveaux :

- niveau stratégique (conception ou re-conception de chaîne logistique, localisation d'usines et d'entrepôts, sélection de partenaires...),
- niveau tactique (validation des capacités de production prévisionnelles en fonction de la demande provisionnelle), et
- niveau opérationnel (politique de pilotage, ordonnancement, politique de coopération entre ateliers...).

Le modèle de simulation doit être construit en fonction de son objectif tout autant que de la chaîne à modéliser. Kleijnen and Smits (Kleijnen & Smits, 2003) distinguent quatre types de simulation pour le contrôle d'une chaîne logistique parmi lesquels on retrouve la simulation à événement discrets qui présente l'avantage d'être assez détaillée et de pouvoir prendre en compte des incertitudes.

Les deux difficultés principales que l'on rencontre lors de la modélisation d'une chaîne logistique sont la taille du système et la complexité de son système de pilotage. Notons de plus, que la modélisation est le résultat du travail d'un modélisateur qui peut lui-même introduire de la complexité. Dans ces conditions, un tel modèle complexe risque d'être gourmand en temps de calcul lors de l'évaluation de solutions. Or ces modèles sont utilisés pour aider à la prise de décision. Ceci fait que la durée d'une simulation peut devenir beaucoup trop longue pour être utilisable et le temps même mis par le modélisateur pour construire son modèle peut être prohibitif au regard des bénéfices attendus (Thierry, et al., 2008). Les mêmes difficultés ont été relevées par Thomas et Charpentier (Thomas et Charpentier, 2005) pour l'étude de la modélisation d'ateliers. Il peut donc être nécessaire de réduire la taille du modèle de simulation. Trois approches peuvent être employées pour cela :

- L'abstraction qui permet de réduire la complexité du modèle tout en préservant la validité des résultats (Frantz, 1995),
- L'agrégation qui est une forme d'abstraction où un groupe de données ou de variables sont agrégées (Aldanondo & Mercé, 1991),
- la réduction du nombre d'événements dans lequel une partie d'un modèle discret est remplacée par une variable ou une formule (Zeigler, 1976).

### *III.3.1.2 De la réduction de modèles de simulation*

Depuis les premiers travaux de Zeigler dans les années 70, de nombreux chercheurs se sont intéressés à cette problématique. Ainsi, Innis et Rexstad (Innis & Rexstad, 1983) ont listé 15 techniques de simplification de modèles, leur approche étant décomposée en quatre étapes principales : hypothèses (identifier les parties principales du système), formulation (spécification du modèle), codage (construction du modèle) et expérimentation.

Brook et Tobias se sont focalisés sur les cas où le temps d'écoulement moyen est le principal indicateur. Leur approche conduit à un modèle réduit très simple pour lequel des solutions analytiques peuvent être construites (Brooks & Tobias, 2000).

Dans l'industrie des semi-conducteurs, l'un des principaux indicateurs utilisés est le temps de cycle. Dans ce cadre Hung et Leachman ont proposé une technique de modélisation adaptée à la gestion d'entreprise de wafer qui utilise le temps de cycle total et le taux d'utilisation comme indicateurs de décision (Hung & Leachman, 1999).

Tseng *et al.* suggèrent de réduire la complexité d'un modèle en mixant les approches macroscopiques et microscopiques afin de réduire au minimum les erreurs dans les modèles complexes. Pour l'approche microscopique, ils construisent un modèle de régression individuel afin d'estimer le temps d'écoulement individuel. L'agrégation des temps d'écoulement individuels permet de construire l'indicateur macro à optimiser (durée de cycle totale, temps d'écoulement...) (Tseng, et al., 1999).

Li *et al.* ont proposé une approche de réduction de modèle basée sur l'agrégation de machines d'une ligne de production. Ils partent d'un modèle complet et, si les deux dernières machines forment une ligne série, ils les agrègent. Ils font de même si les deux premières machines forment une ligne série. Ces étapes d'agrégation sont ensuite itérées jusqu'à, dans le cas limite d'une ligne série, ne plus avoir qu'une seule macro machine (Li, et al., 2009). Dans le même esprit, certains travaux exploitent les réseaux de Petri afin de

simplifier la structure d'un modèle par l'exploitation des macro-places (Doumeingts, et al., 1987) (Hwang, et al., 1999).

La spécificité commune à l'ensemble de ces travaux est que la première étape de modélisation consiste en la construction d'un modèle complet du système à modéliser et c'est seulement dans une seconde étape que l'on va chercher à réduire la complexité du modèle. Si cette approche permet de répondre au besoin d'amélioration du temps de simulation, la tâche du modélisateur n'en est pas simplifiée pour autant.

### *III.3.1.3 Proposition d'un modèle réduit*

La question est donc : comment éviter la tâche complexe de conception du modèle complet ? Cet objectif sera atteint s'il est possible de construire directement un modèle réduit sans avoir à passer par un modèle complet.

Goldratt et Cox ont proposé de manager l'ensemble d'un atelier en se focalisant sur les goulots d'étranglements (Goldratt & Cox, 1992). Notre objectif est donc d'évaluer le taux d'utilisation des goulots d'étranglement tout en simplifiant la construction du modèle de simulation pour le modélisateur.

Pour ce faire, nous avons proposé d'associer des modèles à événements discrets à des modèles continus dans le but de construire un modèle de simulation. L'idée d'exploiter des approximations continues de modèles discrets est ancienne. On peut citer, par exemple, les travaux de Ho (Ho, 1987) et Suri et Fu (Suri & Fu, 1994) qui ont utilisé des modèles à flux continus pour approximer des environnements manufacturiers discrets ou encore la proposition de réseaux de Petri continus comme approximation de réseaux de Petri temporisés (David & Alla, 1997). Une autre approche consiste à utiliser des méta-modèles (régression linéaire, splines, Kriging, ...) pour construire des modèles de simulation (Kleijnen & Sargent, 2000).

La particularité de notre approche est que nous avons choisi « d'hybrider » notre modèle en y associant des sous-modèles continus et discrets. L'approche que nous avons proposée s'appuie sur la théorie des contraintes qui est le principe fondateur des travaux de Goldratt et Cox. Ce dernier concept a été défini de différentes façons dans la littérature, et bien d'autres définitions sont utilisées en pratique. La plupart d'entre elles définissent le goulot d'étranglement comme la pire machine, c'est-à-dire, la machine possédant la plus petite efficacité. D'autres auteurs considèrent comme goulot d'étranglement la machine ayant l'impact le plus important sur le temps d'écoulement (Li, et al., 2009). Nous

exploiterons les définitions proposées par Thomas et Charpentier qui différencient deux types de goulots (Thomas & Charpentier, 2005) :

- « Goulots conjoncturels » (goulots à l’instant considéré) qui sont les Postes de Charge (PC) saturés pour le Plan Directeur de Production (PDP) de l’ordonnancement prévisionnel considéré. Ceci signifie, que pour ce PDP, ces postes de charge utilisent toute leur capacité de production.
- « Goulots structurels » qui sont les postes de charge qui se trouvent le plus souvent saturés selon l’historique de la production. Ces goulots structurels sont déterminés par retour d’expérience.

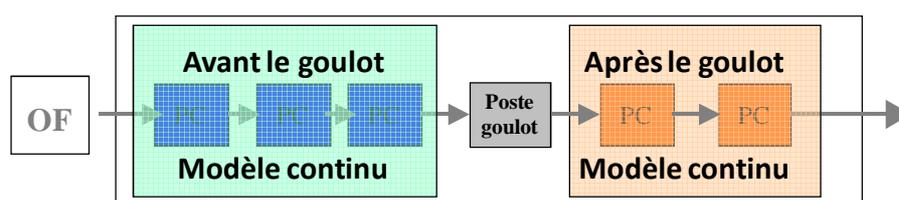


Figure 18. Principe du modèle réduit

La construction d’un modèle de simulation réduit va s’appuyer sur le principe décrit par la Figure 18. Selon ce principe, en accord avec la théorie des contraintes, nous allons focaliser le modèle sur le fonctionnement des postes goulots. Les autres postes de charges seront alors modélisés à l’aide d’un modèle plus grossier de type continu. Cette construction s’effectuera alors en exploitant l’algorithme de la Figure 19 dont les principales étapes sont récapitulées ci-dessous :

- a) identifier les PC qui sont des goulots structurels, c'est-à-dire, ainsi qu’expliqué précédemment, les PC qui ont été le plus souvent contraint en capacité dans le passé,
- b) identifier les goulots conjoncturels pour la liasse d’ordres de fabrications (OF) du PDP considéré,
- c) Parmi les PC qui ne sont pas des goulots d’étranglements, c'est-à-dire, ceux qui n’ont pas été considérés en a) et b), identifier ceux (PC de synchronisation) qui satisfont les 2 conditions suivantes :
  - Utilisés conjointement avec les goulots conjoncturels dans au moins un des OF considéré,
  - Largement utilisés quand toute la liasse d’OF est considérée.
- d) Modéliser tous les PC qui n’ont pas été retenus dans les étapes précédentes par un modèle continu.

- e) Construire le modèle discret des goulots et des postes de synchronisation.
- f) Associer les deux modèles pour créer le modèle hybride.

Dans cette construction, la partie discrète du modèle correspond à la partie réellement importante pour le pilotage du système (goulots d'étranglement, postes de synchronisation). Cette partie concentre la majeure partie de la valeur ajoutée du modèle et c'est sur cette partie que le modélisateur doit concentrer son travail. Pour construire cette partie de modèle, nous avons exploité la théorie des files d'attentes.

Au contraire, la partie continue, nécessaire pour le fonctionnement global du modèle, permet de modéliser plus grossièrement l'ensemble des postes de travail qui ne représentent pas une contrainte pour l'évaluation du pilotage. Nous avons rendu cette étape la plus automatique possible pour consommer le moins de temps du modélisateur. Nous avons proposé de construire ces modèles continus à l'aide de réseaux de neurones de type perceptron multicouche qui exploitent un apprentissage supervisé. Ces modèles continus ont pour but de déterminer comment sont approvisionnés les stocks d'entrée des goulots. Pour ce faire, les réseaux de neurones doivent modéliser le temps d'écoulement entre deux goulots ou d'une manière générale en amont de tout goulot. Les principaux intérêts de cette approche sont :

- le modélisateur peut se concentrer sur la description des goulots d'étranglement,
- les éléments non cruciaux pour l'évaluation du pilotage d'un atelier ou d'une chaîne logistique sont modélisés par apprentissage (automatisation de cette phase),
- le modèle résultat est moins complexe qu'un modèle complet,
- le temps de simulation est plus court qu'avec un modèle complet.

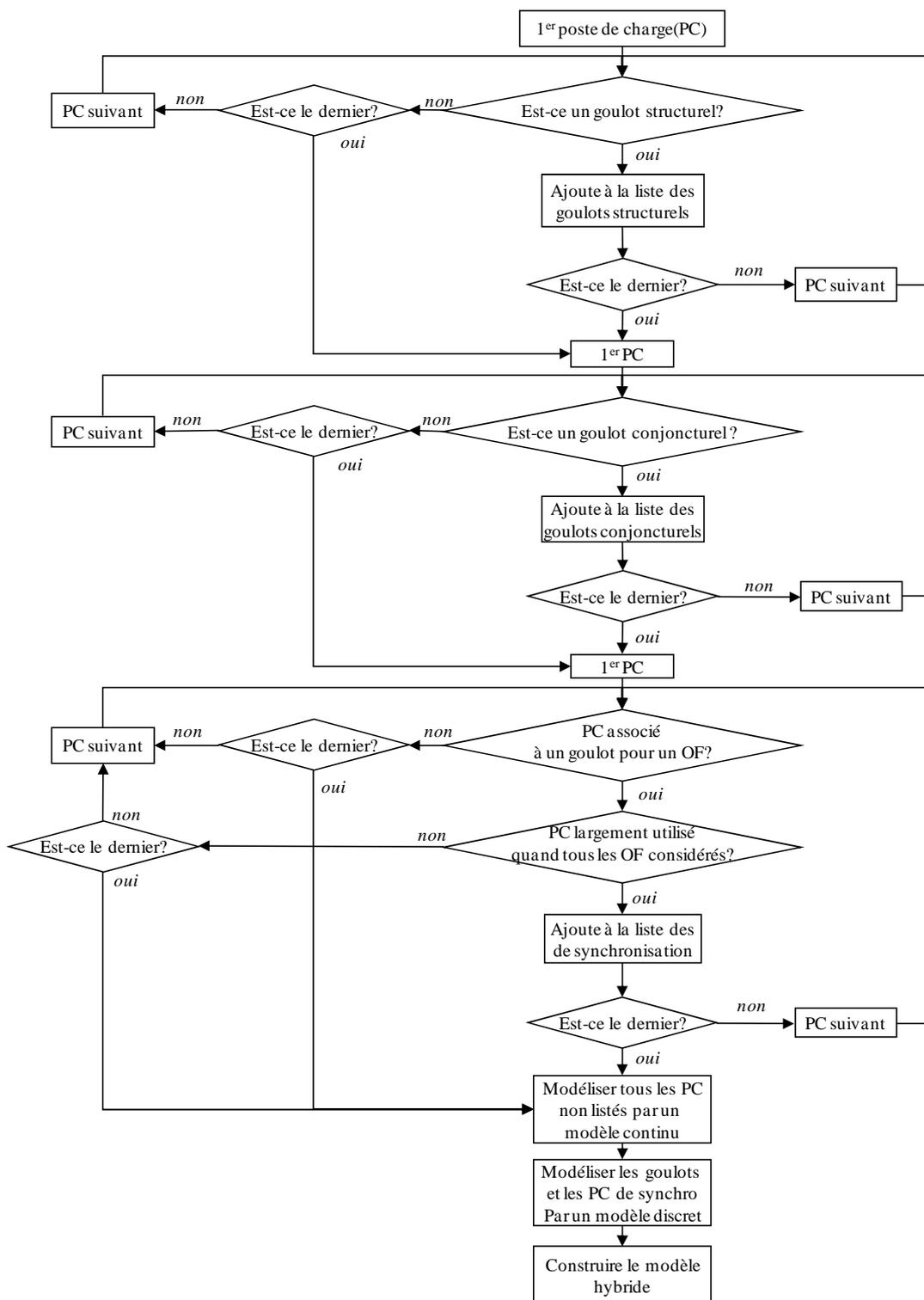


Figure 19. Élaboration d'un modèle réduit

### III.3.2 Élaboration du modèle neuronal

La structure du réseau de neurones utilisée est celle du perceptron multicouche décrit au paragraphe II.2.1.2. Les algorithmes d'initialisation et d'apprentissage utilisés sont

présentés dans le même paragraphe. Le modèle neuronal a pour but de décrire l'alimentation d'un goulot d'étranglement. Son but sera de modéliser un temps d'écoulement de pièces en amont des goulots d'étranglement. Ce temps d'écoulement est une notion continue parfaitement modélisable à l'aide d'un réseau de neurones.

Une première étape consiste donc à collecter ces temps d'écoulement dans l'historique de production ainsi que les valeurs des variables explicatives correspondantes qui serviront, elles, d'entrées des modèles neuronaux.

Par contre, si ces variables explicatives peuvent être d'autres notions continues comme, par exemple, des taux d'occupations de machine, des tailles de stocks tampons..., elles peuvent également être des notions discrètes telles qu'un choix de gamme, le passage sur une machine A plutôt qu'une machine B ou C... La question est alors, comment prendre en compte ces données discrètes ?

### III.3.2.1 Modèle continu et données discrètes

Nous avons montré que si certaines données discrètes peuvent être utilisées sans précautions particulières, ce n'est pas le cas de toutes, et l'apprentissage ne parvient pas toujours à prendre correctement en compte certaines données discrètes (Thomas, et al., 2009).

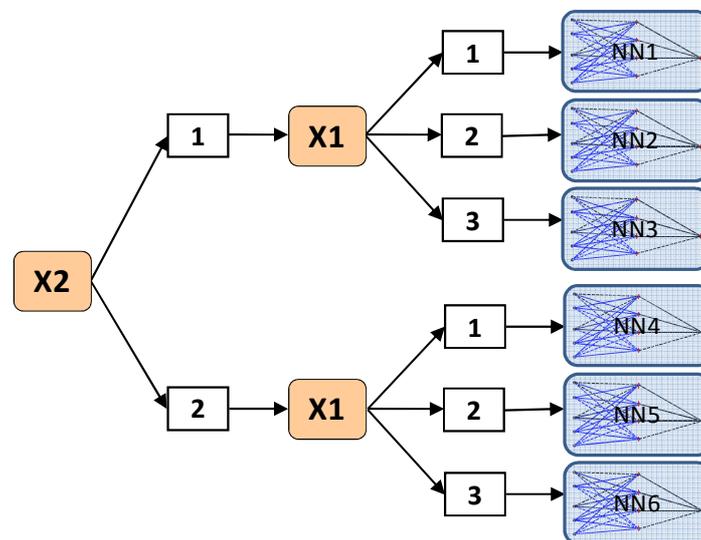


Figure 20. Prise en compte de données discrètes –approche multi modèles

Pour répondre à ce problème, deux approches peuvent être utilisées.

La première se rapproche de la philosophie des multi modèles. En effet, nous pouvons considérer que si certaines données discrètes ne peuvent être prises en compte, c'est dû au fait que leur changement d'état induit des changements de comportement trop important

pour le système. C'est-à-dire, que les données discrètes vont permettre de définir différentes zones de fonctionnement du système et il sera alors nécessaire de construire un modèle neuronal par zone de fonctionnement. Ainsi par exemple, si notre système possède 2 variables discrètes  $X_1$  et  $X_2$  pouvant prendre 3 et 2 états respectivement, notre système pourra se trouver dans  $2 \times 3 = 6$  zones de fonctionnement et nécessitera 6 modèles neuronaux à apprendre (Figure 20). Les avantages de cette approche sont que, tous les modèles neuronaux n'utilisent que des données continues en entrées ce qui simplifie l'apprentissage. De plus, la structure des modèles neuronaux comprendra moins de neurones d'entrée et moins de neurones cachés ce qui diminuera les temps de calcul aussi bien durant les phases d'apprentissage que d'exploitation. A contrario, les principaux points négatifs sont la multiplication du nombre de réseaux de neurones à construire et la nécessité de mettre en place un système de sélection de modèle en fonction des états des variables discrètes (Thomas, et al., 2011).

La deuxième approche va consister à binariser les variables discrètes qui posent problème et à utiliser ces nouvelles variables comme entrée du réseau de neurones. En reprenant le même exemple que précédemment, nous utiliserons alors 5 variables pouvant prendre les états 0 ou 1 : «  $X_2=1$  » ; «  $X_2=2$  » ; «  $X_1=1$  » ; «  $X_1=2$  » ; «  $X_1=3$  ». Le principal avantage de cette approche est que nous n'utilisons qu'un seul réseau de neurones qui modélise l'ensemble du système. A contrario, ce modèle neuronal comprend beaucoup plus de neurones d'entrée et cachés ce qui allonge les temps de calculs durant les phases d'apprentissage et d'exploitation (Thomas & Thomas, 2009).

Ces deux approches ne sont pas antinomiques et une solution optimale consiste vraisemblablement en un mixe des deux afin de limiter à la fois l'explosion du nombre de modèles neuronaux à apprendre et la taille de chacun de ces modèles.

### *III.3.2.2 Détermination de la structure du réseau de neurones*

Pour construire un modèle neuronal, il est nécessaire d'en déterminer la structure et cette tâche reste un problème crucial. En effet, même si les travaux de Cybenko (Cybenko, 1989) et Funahashi (Funahashi, 1989) ont montré qu'une seule couche cachée utilisant des fonctions d'activation du type sigmoïdal était suffisant pour pouvoir approximer toute fonction non linéaire avec la précision voulue, rien n'est dit a priori sur le nombre de neurones cachés à utiliser. L'idée la plus naturelle consisterait donc à choisir le plus grand nombre de neurones cachés possible ce qui permettrait d'obtenir la plus grande précision.

Malheureusement, nous ne nous posons pas un problème d'approximation uniforme mais bien un problème d'ajustement d'une fonction à un nombre fini de points (Dreyfus, et al., 2002). Dans ce cadre, le risque est que le réseau apprenne le bruit sur la fonction et non plus la fonction et nous nous trouvons face à un problème de sur apprentissage. Pour répondre à ce problème, diverses techniques ont été proposées comme les méthodes de régularisation telle que l'arrêt prématuré (early stopping) (Drucker, 2002) ou les méthodes de pénalisation (Bartlett, 1996) (Cawley & Talbot, 2007). L'utilisation de critère robuste permet également de limiter les effets du sur apprentissage (Thomas & Bloch, 1998).

Cependant, la recherche de la structure optimale du réseau permet, à la fois, d'éviter le problème de sur apprentissage tout en optimisant les temps de calcul. Deux approches existent pour construire la structure du réseau. La première est une approche constructive où la couche cachée est construite de manière itérative. On peut citer par exemple, les travaux de Rivals et Personnaz (Rivals & Personnaz, 2003), de Ma et Khorasani (Ma & Khorasani, 2004) ou encore de Setiono (Setiono, 2001).

Pour notre part, nous privilégions la deuxième approche qui consiste à partir d'une structure incluant un grand nombre de neurones cachés puis d'éliminer ces derniers en commençant par les moins significatifs (Hassibi, et al., 1993; Reed, 1993; Xu & Ho, 2006; Zeng & Yeung, 2006). L'avantage de cette approche est de permettre pour un certain nombre d'algorithmes d'effectuer simultanément la détermination de la taille de la couche cachée et la sélection des variables d'entrées en éliminant les variables non pertinentes (Engelbrecht, 2001; Hassibi, et al., 1993; Setiono & Leow, 2000; Thomas & Thomas, 2008).

Ces algorithmes sont regroupés sous le terme d'algorithmes d'élagages (pruning algorithms). Ils peuvent être subdivisés en deux sous-groupes (Lauret, et al., 2006) :

- « Weight saliencies pruning »,
- « Output sensitivity analysis pruning ».

Le « weight saliencies pruning » exploite l'évolution de la fonction coût à minimiser face à de petites variations sur les poids. Une mesure de l'impact relatif des différents poids (saliency) est alors déterminée. Le poids présentant le plus petit impact est alors éliminé. Les algorithmes Optimal Brain Damage (OBD), Optimal Brain Surgeon (OBS) et tous ceux qui en dérivent exploitent un développement en série de Taylor d'ordre 2 de la fonction coût à minimiser pour déterminer cet impact (Hassibi, et al., 1993; Thomas & Bloch, 1998; Leung, et al., 2001). D'autres algorithmes exploitent un filtre de Kalman ou

la matrice d'information de Fisher pour déterminer la saliency des paramètres (Cottrell, et al., 1995; Tang, et al., 2007).

Le « output sensitivity analysis pruning » est basé sur l'analyse de la variance de la sensibilité des paramètres fournie par la dérivée partielle de la sortie du réseau de neurones par rapport aux paramètres (Engelbrecht, 2001). Différentes variantes autour de cette idée ont été proposées. On peut citer, par exemple, l'idée d'introduire une perturbation sur l'entrée et d'étudier son effet sur la sortie (Zeng & Yeung, 2006), ou encore celle d'utiliser le test FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test) afin de déterminer les paramètres à supprimer (Lauret, et al., 2006).

L'algorithme N2PFA (Neural Network Pruning for Function Approximation) s'appuie sur l'utilisation de l'erreur absolue moyenne (MAD) afin de mesurer la performance du réseau. Le principe de cet algorithme est d'évaluer, dans un premier temps, l'impact de la suppression de chaque neurone caché sur la sortie du réseau, de supprimer celui avec le plus faible impact et de vérifier que les performances du réseau ne sont pas trop dégradées. Cette étape est bouclée tant que tous les neurones cachés superflus ne sont pas supprimés. Dans un deuxième temps, on effectue le même travail mais cette fois-ci sur les entrées.

L'algorithme proposé par Engelbrecht repose lui sur l'utilisation de la « Variance Nullity Measure » (VNM) (Engelbrecht, 2001). L'idée de base est de tester si la variance de la sensibilité d'une entrée ou d'un neurone caché pour différentes données est significativement différente de zéro. Une extension de cet algorithme permettant de tester les paramètres un à un a été proposée (Thomas & Thomas, 2008a). Dans cet algorithme, trois catégories de paramètres  $\theta_k$  peuvent être éliminés :

- poids connectant les entrées aux neurones cachés  $w_{ih}^1$ ,
- biais des neurones cachés  $b_i^1$ ,
- poids connectant les neurones cachés à la sortie  $w_i^2$ .

Il est à noter que la sensibilité de la sortie  $z$  par rapport au biais  $b$  du neurone de sortie est constante et vaut 1, et donc, ce paramètre ne peut jamais être éliminé. Pour chacun de ces types de paramètres, il est nécessaire de connaître la sensibilité de la sortie  $z$  par rapport au paramètre considéré. Cette sensibilité correspond à la contribution de ce paramètre sur l'erreur totale faite en sortie, contribution qui est classiquement déterminée

par la dérivée partielle de la sortie du réseau  $z$  par rapport au paramètre considéré. Ainsi, pour les poids  $w_i^2$  connectant les neurones cachés à la sortie, cette contribution est :

$$S_{w_i^2}(p) = \frac{\partial z(p)}{\partial w_i^2} = x_i^1(p) \quad p=1 \dots P \quad (35)$$

où  $p$  est l'indice de la donnée extraite de la base de données d'apprentissage qui comprend  $P$  données. D'une manière similaire, on détermine la contribution des biais des neurones cachés  $b_i^1$  :

$$S_{b_i^1}(p) = \frac{\partial z(p)}{\partial b_i^1} = \frac{\partial z(p)}{\partial x_i^1(p)} \cdot \frac{\partial x_i^1(p)}{\partial z_i^1(p)} \cdot \frac{\partial z_i^1(p)}{\partial b_i^1} = w_i^2 \cdot g'(z_i^1(p)) \cdot 1 = w_i^2 \cdot \left(1 - (x_i^1(p))^2\right) \quad p=1 \dots P \quad (36)$$

ainsi que la contribution des poids connectant les entrées aux neurones cachés  $w_{ih}^1$  :

$$\begin{aligned} S_{w_{ih}^1}(p) &= \frac{\partial z(p)}{\partial w_{ih}^1} = \frac{\partial z(p)}{\partial x_i^1(p)} \cdot \frac{\partial x_i^1(p)}{\partial z_i^1(p)} \cdot \frac{\partial z_i^1(p)}{\partial w_{ih}^1} \\ &= w_i^2 \cdot g'(z_i^1(p)) \cdot x_h^0(p) = w_i^2 \cdot \left(1 - (x_i^1(p))^2\right) \cdot x_h^0(p) \quad p=1 \dots P \end{aligned} \quad (37)$$

Il est également possible de déterminer la contribution d'une entrée du réseau  $x_h^0$  :

$$\begin{aligned} S_{x_h^0}(p) &= \frac{\partial z(p)}{\partial x_h^0} = \sum_{i=1}^{n_1} \frac{\partial z(p)}{\partial x_i^1(p)} \cdot \frac{\partial x_i^1(p)}{\partial z_i^1(p)} \cdot \frac{\partial z_i^1(p)}{\partial x_h^0} \\ &= \sum_{i=1}^{n_1} w_i^2 \cdot g'(z_i^1(p)) \cdot w_{ih}^1 = \sum_{i=1}^{n_1} w_i^2 \cdot \left(1 - (x_i^1(p))^2\right) \cdot w_{ih}^1 \quad p=1 \dots P \end{aligned} \quad (38)$$

La sensibilité par rapport à un paramètre (biais  $b_i^1$ , poids  $w_{ih}^1$  ou  $w_i^2$ , ou entrée  $x_h^0$ ) est notée  $S_{\theta_k}(p)$  ( $p=1 \dots P$  et  $k=1 \dots K=n_0+n_1$ ). Cette sensibilité sera donc déterminée par les équations (35), (36), (37) et (38) selon les cas. La VNM correspond à la variance  $\sigma_{\theta_k}^2$  du paramètre  $\theta_k$  considéré :

$$\sigma_{\theta_k}^2 = \frac{\sum_{p=1}^P (S_{\theta_k}(p) - \overline{S_{\theta_k}})^2}{P-1} \quad p=1 \dots P \quad (39)$$

où  $\overline{S_{\theta_k}}$  est la moyenne de la sensibilité de la sortie à  $\theta_k$  :

$$\overline{S_{\theta_k}} = \frac{\sum_{p=1}^P S_{\theta_k}(p)}{P} \quad (40)$$

En utilisant le fait que la VNM suit une distribution du  $\chi^2(\nu)$  à  $\nu=P-1$  degrés de liberté dans le cas d'un jeu de données comprenant  $P$  données, nous pouvons tester l'hypothèse que la variance de la sensibilité pour le paramètre  $\theta_k$  considéré est approximativement nulle en construisant le test d'hypothèse suivant où l'hypothèses  $\mathcal{H}_0$  (que la variance de la sensibilité du paramètre est approximativement nulle) et son alternative  $\mathcal{H}_1$  sont :

$$\begin{cases} \mathcal{H}_0 : \sigma_{\theta_k}^2 \leq \sigma_0^2 \\ \mathcal{H}_1 : \sigma_{\theta_k}^2 > \sigma_0^2 \end{cases} \quad (41)$$

où  $\sigma_0^2$  est un petit réel positif.

En utilisant le fait que, selon l'hypothèse de nullité, la relation :

$$\Gamma_{\theta_k} = \frac{(N-1) \cdot \hat{\sigma}_{\theta_k}^2}{\sigma_0^2} \quad (42)$$

suit une distribution du  $\chi^2(\nu)$ , avec  $\nu=P-1$  degrés de liberté dans le cas de  $P$  données, le test décrit par (41) est réalisé en comparant (42) avec la valeur critique  $\Gamma_c$  obtenue des tables du  $\chi^2$  :

$$\Gamma_c = \chi^2(\nu, 1-\alpha) \quad (43)$$

où  $\alpha$  est le niveau de confiance du test. Si  $\Gamma_{\theta_k} \geq \Gamma_c$ , l'élément considéré est conservé, sinon, il est élagué.

L'algorithme proposé par Engelbrecht et son extension ont été testés et comparés aux algorithmes OBS et N2PFA sur deux exemples de simulation (Thomas & Thomas, 2008a), et également pour construire le modèle réduit d'une scierie (Thomas & Thomas, 2008b).

Ces études ont montré que, pris individuellement, l'algorithme proposé est le plus performant pour déterminer le nombre optimal de neurones cachés. Par contre, pour la suppression des entrées inutiles, c'est l'algorithme N2PFA qui s'est montré le plus performant. D'autre part, lorsque l'on s'intéresse au temps de calcul, l'algorithme proposé par Engelbrecht et son extension sont les plus rapides et d'autant plus avantageux que la taille du réseau initial grossit.

De ces résultats, on peut préjuger que l'association de ces deux algorithmes (extension de l'algorithme d'Engelbrecht et N2PFA) permet d'obtenir, dans les meilleurs délais, la structure optimale du réseau de neurones. En effet une première phase de pruning utilisant

l'algorithme le plus rapide, c'est-à-dire, l'extension de l'algorithme d'Engelbrecht permet de rapidement estimer correctement le nombre de neurones cachés nécessaires. Dans une deuxième phase, l'algorithme N2PFA, travaillant sur une structure initiale plus réduite (moins de neurones cachés), va permettre de finaliser la structure du réseau de neurones en supprimant les entrées inutiles. Ce phénomène attendu s'est confirmé lors des essais et l'association de ces deux algorithmes a bien permis de trouver la structure optimale du réseau de neurones, et ce, avec un temps de calcul inférieur à celui nécessaire pour effectuer un pruning à l'aide de l'algorithme N2PFA seul.

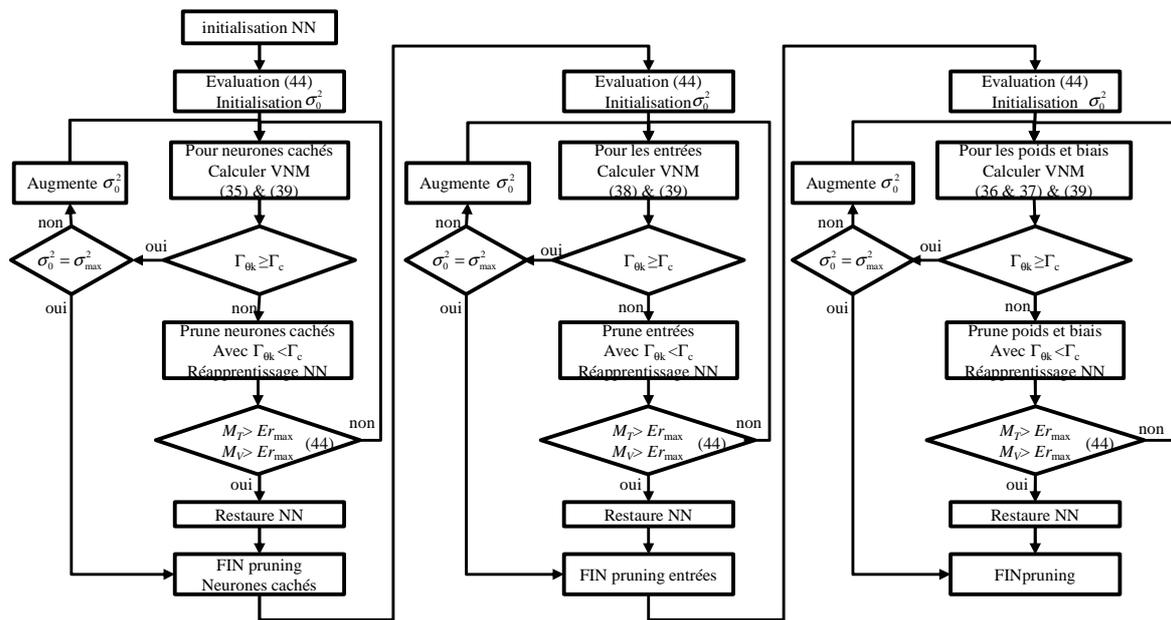


Figure 21. Algorithme de pruning séquentiel NNSP

Par ailleurs, nous avons proposé un algorithme de pruning basé sur l'évaluation de la VNM (Thomas & Suhner, 2014) et présenté Figure 21. L'idée principale de cet algorithme est d'évaluer et d'élaguer séquentiellement les différents types d'éléments, l'objectif étant d'améliorer simultanément le temps de calcul et le résultat de l'élagage. Cet algorithme est subdivisé en trois étapes durant lesquelles on va élaguer successivement, les neurones cachés, puis les entrées, et enfin les poids et biais connectant la couche d'entrée à la couche cachée. Pour chaque étape, deux critères d'arrêts sont utilisés. Le premier correspond au fait que le paramètres  $\sigma_0^2$  (41) atteint sa valeur maximale. Le second est basé sur la Mean Absolute Deviation (MAD) qui mesure la performance du réseau (Setiono & Leow, 2000). Deux valeurs de MAD sont déterminées concernant le jeu de données d'apprentissage (indice T) et le jeu de données de validation (indice V) :

$$\begin{cases} M_T = \frac{1}{P_T} \cdot \sum_{p=1}^{P_T} |y_T(p) - \hat{y}_T(p)| \\ M_V = \frac{1}{P_V} \cdot \sum_{p=1}^{P_V} |y_V(p) - \hat{y}_V(p)| \end{cases} \quad (44)$$

où  $P_T$  et  $P_V$  correspondent respectivement au nombre de données dans les jeux de données d'apprentissage et de validation.

L'algorithme est initialisé en calculant  $M_T$  et  $M_V$  et en initialisant les mémoires  $M_T^{best} = M_T$ ,  $M_V^{best} = M_V$  et le seuil  $Er_{max} = (\max\{M_T^{best}; M_V^{best}\}) * (1 + \delta)$ , où  $\delta$  est utilisé pour éviter l'arrêt prématuré de l'élagage.

La phase d'élagage des neurones cachés commence avec un perceptron multicouche surdimensionné. Une phase d'initialisation de  $\sigma_0^2$ , des valeurs MAD  $M_T$  et  $M_V$ , et du seuil  $Er_{max}$ . L'algorithme calcule les mesures VNM de tous les neurones cachés. En exploitant les équations (35) et (39). Les valeurs de  $\Gamma_{\theta_k}$  (42) pour tous les neurones cachés sont comparées au seuil  $\Gamma_c$ . Si aucun des  $\Gamma_{\theta_k}$  n'est inférieur à ce seuil, le paramètre  $\sigma_0^2$  est multiplié par 10 et les valeurs  $\Gamma_{\theta_k}$  sont recalculées.

Si certains des  $\Gamma_{\theta_k}$  sont inférieurs au seuil  $\Gamma_c$ , les neurones cachés correspondant sont éliminés et le réseau résultant est réappris. Les deux valeurs MAD sont calculées par (44), et sont comparées au seuil  $Er_{max}$ . Si la nouvelle structure améliore les résultats, les mémoires  $M_T^{best}$ ,  $M_V^{best}$ , et le seuil  $Er_{max}$  sont réglés à leurs nouvelles valeurs. Si au contraire le réseau résultant dégrade trop les résultats, la structure précédente est restaurée et la phase d'élagage des neurones cachés est terminée, et la phase d'élagage des entrées commence suivie de la phase d'élagage des poids et biais liant la couche d'entrée à la couche cachée. Ces deux dernières phases utilisent le même principe en exploitant les équations (38) et (36) et (37) respectivement. Quatre variantes de cet algorithme ont été testées et comparées à quatre algorithmes tirés de la littérature sur trois problèmes de classification et trois problèmes de régression (Thomas & Suhner, 2014). Les résultats ont montré que cet algorithme permettait d'améliorer à la fois le temps de calcul et la précision des résultats.

### ***III.3.3 Application à la modélisation d'une scierie***

L'approche décrite précédemment a été appliquée pour construire le modèle réduit d'une scierie. L'objectif du modèle est d'aider les managers dans leurs tâches quotidiennes de prise de décision lors de l'élaboration du Plan Directeur de Production (PDP). Dans ce cadre, un tel modèle doit servir à :

- évaluer l'efficacité du PDP,
- maximiser son taux de charge, et donc, sa productivité globale,
- expliquer l'occurrence de phénomènes de congestion sur le poste de travail d'éboutage (goulot).

Dans le but de construire ce modèle d'émulation, nous avons appliqué l'algorithme décrit au paragraphe III.3.1.3. Le modèle est construit à l'aide du formalisme des files d'attentes en utilisant le logiciel Arena®. Le modèle neuronal est inclut dans le modèle réduit par l'intermédiaire d'un module VBA. La prise en compte des données discrètes a été réalisée selon les deux approches décrites au paragraphe III.3.2.1 ce qui va conduire à l'obtention de deux modèles qui ont été comparés (Thomas & Thomas, 2009).

Pour le cas d'étude considéré, après apprentissage et détermination de la structure optimale du ou des réseaux, les deux approches donnent des résultats tout à fait équivalent et pertinent comparés aux résultats obtenus avec le modèle complet servant de référence.

Dans ce cas précis, le temps d'apprentissage et de pruning des deux réseaux de neurones de l'approche multi modèles est supérieur au temps d'apprentissage de réseau unique de l'approche binarisation. Par contre, il est possible de paralléliser le travail dans l'approche multi modèle ce qui n'est pas le cas dans l'autre. D'autre, part, en fonction des systèmes, il peut arriver que construire et apprendre plusieurs petits modèles peut s'avérer moins gourmand en temps de calcul que de ne construire qu'un seul grand réseau. Ceci est dû au fait qu'en subdivisant le modèle en plusieurs réseaux de neurones on diminue la taille des matrices rentrant en ligne de compte (taille de la couche d'entrée, de la couche cachée, et de la base de données). De ce fait, en fonction du cas d'application, l'une ou l'autre ou un mixe des deux approches peut s'avérer la stratégie la plus pertinente d'un point de vue temps d'élaboration.

---

### ***III.3.4 Surveillance de la qualité on-line***

Les modèles de simulation de flux sont nécessaire pour évaluer correctement les diverses solutions possibles en vue d'une prise de décision. Cependant, pour qu'une telle approche soit réellement performante, il est nécessaire que les flux ne soient pas trop perturbés. Hors, de nombreuses entreprises produisant des produits à haute valeur ajoutée subissent de fort taux de non qualité ou de reprise, qui entre autres problèmes, perturbent ces flux. La maîtrise de la qualité est donc un enjeu majeur qui a un impact financier et organisationnel important. Différents outils peuvent être utilisés pour améliorer la qualité, tels que les sept outils de base de la qualité (diagramme d'Ishikawa, carte de contrôle, histogramme...), ou les plans d'expériences. La première approche de contrôle de la qualité fut d'effectuer ce contrôle a posteriori ce qui conduit à rejeter ou déclasser une fraction importante de la production. Taguchi a été le premier à proposer de contrôler la qualité avant même la production en réglant de manière optimale les paramètres de production. Cependant, cette approche présente le désavantage d'être offline et de ne pas pouvoir s'adapter à la variation des paramètres environnementaux par exemple. Bien qu'il soit possible de réaliser des plans d'expériences robustes à de telles variations, les réglages ainsi obtenus seront souvent sous optimaux.

Par ailleurs, les besoins de traçabilité conduisent les industriels à collecter de plus en plus de données concernant leur production. C'est pourquoi nous avons proposé d'exploiter ces données de production pour construire un modèle prédictif de la qualité exploitable pour sélectionner on-line le réglage optimal des paramètres contrôlables en fonction de l'état des paramètres non-contrôlables.

Dans ce cadre, nous avons proposé d'utiliser les machines d'apprentissage en général, et les réseaux de neurones en particulier pour extraire des données collectées ce modèle de prédiction de la qualité. Ce modèle est dans un second temps, exploité pour simuler un plan d'expériences complet permettant de trouver les paramètres optimaux en fonction des conditions (Noyel, et al., 2013b).

Par ailleurs, les systèmes de production sont, eux même, des systèmes évolutifs (usure de pièces, modification de machines...). Un modèle statique d'un système évolutif va forcément faire apparaître une dérive entre les comportements du système et du modèle. C'est pourquoi il est nécessaire de mettre en place un outil de contrôle du système de contrôle de la qualité afin de resynchronisé le modèle avec la réalité. Cette tâche de

resynchronisation pouvant être gourmande en temps de calcul, il est nécessaire d'optimiser la fréquence de resynchronisation. Trois approches peuvent être mise en place pour cette resynchronisation : sur évènement (nouvelle donnée, sollicitation d'un opérateur...); périodiquement (toutes les heures, jours, semaines...); sur décision statistique.

Nous préconisons d'utiliser la troisième approche qui associe l'avantage de ne réaliser une synchronisation que si elle est nécessaire, et également de détecter l'occurrence d'une telle dérive qui peut également être la conséquence d'une défaillance du système de production (auquel cas, c'est le système qui doit être réparé et pas le modèle corrigé).

Pour ce faire, nous préconisons d'utiliser une carte de contrôle capable de déterminer si le taux de mauvaise classification (non-détection et fausse alarme) du modèle augmente. La ligne centrale (LC) correspond au pourcentage de mauvaise classification obtenu sur le jeu de données de validation lors de l'apprentissage initial. Seule la limite de contrôle supérieure est utile dans notre cas et peut être calculée en utilisant deux bornes représentant un niveau de confiance de 95% ou de 99,8% qui peuvent être utilisées en niveau d'alarme et en niveau de resynchronisation :

$$\begin{aligned} LCS_{95\%} &= LC + 1,96\sqrt{\frac{LC(1-LC)}{n}} \\ LCS_{99,8\%} &= LC + 3\sqrt{\frac{LC(1-LC)}{n}} \end{aligned} \quad (45)$$

où  $n$  représente la taille de la carte.

Cette approche a été appliquée au contrôle de la qualité d'un robot de laquage d'une entreprise sous-traitant de cuisinistes (Noyel, et al., 2013b).

### III.4 ÉVALUATION ET PILOTAGE DE SYSTEMES CONTROLES PAR LE PRODUIT

Les données qui nous ont permis de construire un modèle d'un système peuvent également être exploitées pour son pilotage. Les RdP sont un outil intéressant pour le pilotage des systèmes à évènements discrets qui recouvrent un grand nombre de systèmes de production. Nous allons présenter dans un premier temps une technique de pilotage d'un système modélisé par un RdP. Dans un second temps, nous appliquerons cette approche au pilotage d'un système kanban.

### ***III.4.1 L'apprentissage pour contrôler un RdP***

#### *III.4.1.1 Introduction*

Les réseaux de Petri (RdP) continus sont bien adaptés à l'étude des systèmes à événements discrets (SED) ainsi qu'aux systèmes dynamiques hybrides (SDH) car ils combinent des aspects structurels et discrets (graphe orienté sous-jacent) avec des comportements continus (équations différentielles du premier ordre qui déterminent l'évolution temporelle du marquage) (David & Alla, 1997; Diaz, 2001; Murata, 1989).

De nombreux résultats ont été établis avec les réseaux de Petri continus pour la commande de systèmes de production. En particulier le cas où la commande des flux repose sur une approximation continue du système étudié et sur des régulateurs continus qui calculent les fréquences de franchissement des transitions (Silva & Recalde, 2003). Cette approche a été développée avec différents types de régulateurs. On peut citer, par exemple, le régulateur par retour d'état contraint (Amrah, et al., 1996), régulateurs flous (Ghabri, 1995), programmation linéaire (Hanzalek, 2003) ou commande optimale (Egilmez & Sharifnia, 1994).

Nous proposons pour notre part de nous inspirer de l'approche continue. Les systèmes sont modélisés à l'aide de réseaux de Petri continus à vitesses variables étudiés dans l'espace d'état. Le vecteur d'état correspond au vecteur de marquage, chaque composante du vecteur de sortie est définie comme la somme pondérée d'un sous ensemble de places, et le vecteur d'entrée est défini comme le vecteur des fréquences maximales de franchissement des transitions commandables.

Les réseaux de Petri (RdP), réseaux de Petri Temporisés (RdPT), et réseaux de Petri Continus à vitesse variables (RdPCV) ont été présentés au paragraphe II.2.2.2.

#### *III.4.1.2 Représentation dans l'espace d'état*

Nous pouvons rappeler que l'évolution du marquage dans un RdPCV est donnée par l'équation différentielle :

$$\frac{dM(t)}{dt} = W.X(t) \quad (46)$$

où  $M$  représente le marquage,  $W$  est la matrice d'incidence et  $X$  est le vecteur caractéristique de la séquence de franchissement. Les éléments constitutifs de ce vecteur dépendent continument du marquage des places selon les équations :

$$x_j(t) = x_{\max j} \cdot \mu_j(t) \quad (47)$$

avec :

$$\mu_j(t) = \min_{P_i \in {}^oT_j} (m_i(t)) \quad (48)$$

L'équation (48) présente des commutations dues à l'opérateur « min » et l'équation (47) fait apparaître des produits entre le vecteur d'état et le vecteur des entrées. De ce fait, les RdPCV ne peuvent pas être décrits à l'aide d'un modèle d'état linéaire. En revanche une représentation bilinéaire par morceaux peut en être donnée (Lefebvre, et al., 2004).

Définissons  $U(t)$  et  $Y(t)$  comme étant, respectivement, les vecteurs d'entrée et de sortie du RdPCV à l'instant  $t$ . Le vecteur d'entre  $U(t)$  est défini comme représentant les fréquences maximales de franchissement de certaines transitions. De ce fait, l'ensemble des transitions est subdivisé en deux sous-ensembles  $T_C$ , et  $T_{NC}$  tel que  $T = T_C \cup T_{NC}$ .  $T_C$  est l'ensemble des transitions commandables et  $T_{NC}$ , celui des transitions non commandables. Par extension, nous pouvons définir  $X_C(t) = (x_j(t))_{T_j \in T_C} \in \mathbb{R}^{+d}$  et  $X_{NC}(t) = (x_j(t))_{T_j \in T_{NC}} \in \mathbb{R}^{+p-d}$  que l'on peut écrire sous la forme :

$$D^{-1} \cdot X(t) = \begin{pmatrix} X_C(t) \\ X_{NC}(t) \end{pmatrix} \quad (49)$$

avec  $D \in \mathbb{R}^{p \times p}$  une matrice de permutation qui rassemble les transitions en deux groupes, les transitions commandables et celles non commandables.

Le vecteur des entrées de commande  $U(t) = X_{\max C}(t) \in \mathbb{R}^{+d}$  correspond aux fréquences maximales de franchissement des transitions commandables. Le vecteur des entrées est contraint entre deux bornes ( $0 \leq U(t) \leq U_{\max}$ ) pour limiter les fréquences de franchissement à un intervalle positif et borné.

Les composantes du vecteur des sorties  $Y(t) \in \mathbb{R}^{+e}$  sont définies comme des sommes pondérées de sous-ensembles de places qui sont supposées mesurables. Soit  $Q = (q_{ki})_{k=1, \dots, e, i=1, \dots, n} \in \mathbb{R}^{e \times n}$  une matrice de projection dont les termes sont tous non négatifs. L'équation (46) peut être réécrite :

$$\begin{aligned}\frac{dM(t)}{dt} &= W_C \cdot X_C(t) + W_{NC} \cdot X_{NC}(t) \\ Y(t) &= Q \cdot M(t)\end{aligned}\tag{50}$$

avec  $W_C = (w_{Cij})_{i=1,\dots,n, j=1,\dots,d} \in \mathbb{R}^{n \times d}$  et  $W_{NC} = (w_{NCij})_{i=1,\dots,n, j=1,\dots,p-d} \in \mathbb{R}^{n \times (p-d)}$  tels que  $(W_C / W_{NC}) = W \cdot D$ .

Plusieurs phases apparaissent successivement dans la réponse temporelle du RdPCV. Chaque phase  $\varphi$  est active pendant la durée qui sépare deux commutations successives des opérateurs « min » dans (48) et correspond à une configuration particulière de ces opérateurs caractérisée par les  $p$  fonctions de classification  $f_j$  :

$$\begin{aligned}\forall T_j \in T : \quad f_j : \mathbb{R}^{+n} &\rightarrow \{1, \dots, n\} \\ M(t) &\rightarrow f_j(M(t)) \text{ telle que } m_{f_j}(t) = \mu_j(t)\end{aligned}\tag{51}$$

Chaque fonction  $f_j$  spécifie la place d'entrée de  $T_j$  de marquage minimal. Au cours de chaque phase  $\varphi$  il existe une relation constante entre les composantes des vecteurs  $X_C(t)$  et  $M(t)$  ainsi que  $X_{NC}(t)$  et  $M(t)$  que l'on peut exprimer sous forme scalaire à l'aide des fonctions  $f_j$  ou sous forme vectorielle à l'aide de familles de vecteurs lignes  $A_j(\varphi) \in \{0, 1\}^{1 \times n}$  et  $B_j(\varphi) \in \{0, 1\}^{1 \times n}$  constants sur chaque phase mais qui varient d'une phase à la suivante :

$$\begin{aligned}x_{Cj}(t) &= u_j(t) \cdot m_{f_j}(t) = u_j(t) \cdot A_j(\varphi) \cdot M(t), \quad j = 1, \dots, d \\ x_{NCj}(t) &= x_{\max NCj} \cdot m_{f_j}(t) = x_{\max NCj} \cdot B_j(\varphi) \cdot M(t) \quad j = 1, \dots, p-d\end{aligned}\tag{52}$$

L'équation (50) peut être transformée sous forme scalaire :

$$\begin{aligned}\frac{dm_i(t)}{dt} &= \sum_{j=1}^d w_{Cij} \cdot u_j(t) \cdot m_{f_j}(t) + \sum_{j=1}^{p-d} w_{NCij} \cdot x_{\max NCj} \cdot m_{f_j}(t) \\ y_k(t) &= \sum_{i=1}^n q_{ki} \cdot m_i(t) \quad i = 1, \dots, n, \quad k = 1, \dots, e\end{aligned}\tag{53}$$

ou sous forme vectorielle :

$$\begin{aligned}\frac{dM(t)}{dt} &= \left( \sum_{j=1}^d u_j(t) \cdot W_{Cj} \cdot A_j(\varphi) + \sum_{j=1}^{p-d} x_{\max NCj} \cdot W_{NCj} \cdot B_j(\varphi) \right) \cdot M(t) \\ Y(t) &= Q \cdot M(t), \quad \varphi = 1, 2, \dots\end{aligned}\tag{54}$$

en désignant par  $W_{Cj}$  les colonnes de la matrice  $W_C$  et par  $W_{NCj}$  celles de  $W_{NC}$ . Les équations (53) et (54) sont des représentations bilinéaires par morceaux du RdPCV (46) (Mohler, 1973). Chaque phase est caractérisée par une famille de matrices

$W_{c_j}.A_j(\varphi) \in \mathbb{N}^{n \times n}$  associée aux transitions commandables et  $W_{NC_j}.B_j(\varphi) \in \mathbb{N}^{n \times n}$  associée aux transitions non commandables.

La mise en place d'un contrôleur exploitant la descente du gradient pour un RdPCV nécessite une analyse structurelle et fonctionnelle :

- L'analyse structurelle est nécessaire pour déterminer quelle entrée agit sur quelle sortie. Il est donc nécessaire de connaître quelles sorties sont sensibles à la variation d'une entrée donnée. L'analyse structurelle est étudiée au paragraphe II.2.2.3.
- L'analyse fonctionnelle consiste à adapter l'algorithme du gradient au cas considéré afin de contrôler les sorties du RdPCV en fonction du marquage désiré. Les fonctions de sensibilité sont définies et utilisées dans le but de mettre en œuvre un contrôleur basé sur la descente du gradient.

#### *III.4.1.3 Commande des RdPCV*

La commande des flux avec les réseaux de Petri continus a été étudiée par de nombreux auteurs (Amrah, et al., 1996; Ghabri, 1995; Hanzalek, 2003; Egilmez & Sharifnia, 1994; Silva & Recalde, 2003). Pour être performantes, ces commandes nécessitent souvent des conditions restrictives en ce qui concernent les transitions à commander et les places à observer. De plus, certains résultats sont locaux : ils ne sont valides que dans certaines régions de l'espace d'état, pendant certaines phases.

Notre approche, inspirée des algorithmes d'adaptation des réseaux de neurones, est moins restrictive. Elle tire profit de la propagation du gradient au travers du graphe orienté sous-jacent au RdPCV pour minimiser le carré de l'erreur instantanée entre les sorties désirées et les sorties mesurées en modifiant les fréquences maximales de franchissement des transitions commandables.

Les algorithmes d'adaptation basés sur la propagation du gradient sont généralement obtenus en minimisant un coût scalaire qui mesure la distance entre la sortie désirée  $Y_d(t)$  et la sortie mesurée  $Y(t)$  du système. On considère que les échantillons des sorties sont obtenus avec une fréquence d'échantillonnage  $\Delta t$  durant un horizon  $H$ . De ce fait, les algorithmes proposés travaillent en temps discret.

### a Régulateur à un pas de calcul

Dans un souci de simplification, nous développons dans un premier temps le régulateur dans le cas mono sortie. L'erreur instantanée est définie par  $\varepsilon(k) = y_d(k) - y(k)$ , où  $y_d(k)$  correspond à la sortie désirée à l'instant  $t = k \cdot \Delta t$ , et  $y(k)$  correspond à la sortie mesurée du RdPCV au même instant. Avec une méthode d'intégration numérique du premier ordre, on peut écrire :

$$y(k) = y(k-1) + \Delta t \cdot \left( \sum_{j=1}^d u_j(k-1) \cdot Q \cdot W_{C_j} \cdot A_j(\varphi) + \sum_{j=1}^{p-d} x_{\max, NC_j} \cdot Q \cdot W_{NC_j} \cdot B_j(\varphi) \right) \cdot M(k-1) \quad k > 0 \quad (55)$$

Soit le coût scalaire  $v(k)$  :

$$v(k) = \frac{1}{2} \varepsilon^2(k) \in \mathbb{R} \quad (56)$$

L'actualisation à chaque nouvel échantillon de mesures du vecteur  $U(k)$  des entrées est obtenue en écrivant un développement en série de Taylor du coût  $v$ . Les termes de second ordre sont habituellement négligés dans l'évaluation de la matrice Hessienne, mais un petit terme positif  $\lambda I$  est ajouté pour permettre l'inversion de la matrice lorsqu'elle est singulière ou mal conditionnée. L'actualisation de l'entrée de commande est donnée par (Lefebvre, et al., 2003) :

$$\delta U(k) = -(S(k) \cdot S(k)^T + \lambda I)^{-1} \cdot S(k) \cdot \varepsilon(k), \quad k \geq 0 \quad (57)$$

avec  $\delta U(k) = U(k) - U(k-1)$ .

$S(k) \in \mathbb{R}^d$  est le gradient de la sortie par rapport aux variations des entrées, calculé à l'instant  $t = k \cdot \Delta t$ .

L'algorithme de commande précédent peut être étendu au cas multi - sorties en considérant la fonction coût :

$$v(k) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{\alpha=1}^e \varepsilon_{\alpha}^2(k) \in \mathbb{R} \quad (58)$$

Le développement en série de Taylor de cette fonction coût est utilisé pour actualiser le vecteur des entrées  $U(k)$  à chaque nouvel échantillon de mesures :

$$\delta U(k) = - \left( \sum_{\alpha=1}^e (S_{\alpha}(k) \cdot S_{\alpha}(k)^T + \lambda I) \right)^{-1} \cdot \left( \sum_{\alpha=1}^e S_{\alpha}(k) \cdot \varepsilon_{\alpha}(k) \right) \quad (59)$$

où  $S_\alpha(k) \in \mathbb{R}^d$  est le gradient de la sortie  $y_\alpha$  par rapport aux variations du vecteur  $U$  des entrées, calculé à l'instant  $t = k \cdot \Delta t$ .

### *b Régulateur à plusieurs pas de calcul*

Pour converger efficacement vers un minimum de la fonction coût, les algorithmes d'adaptation basés sur le calcul du gradient sont généralement appliqués un grand nombre de fois sur l'ensemble des données d'apprentissage. Utilisés en ligne, ces algorithmes peuvent être itérés plusieurs fois sur chaque nouvel échantillon de mesure. Nous définissons l'erreur instantanée pour chaque échantillon et chaque itération  $\varepsilon(k, h) = y_d(k) - y(k, h)$ , où  $y(k, h)$  est la sortie  $y$  du RdPCV à l'instant  $t = k \cdot \Delta t$  obtenue à partir du marquage  $M(k-1)$  et du vecteur des entrées  $U(k-1, h)$  :

$$y(k, h) = y(k-1) + \Delta t \cdot \left( \sum_{j=1}^d u_j(k-1, h) \cdot Q \cdot W_{Cj} \cdot A_j(\varphi) + \sum_{j=1}^{p-d} x_{\max NC j} \cdot Q \cdot W_{NCj} \cdot B_j(\varphi) \right) \cdot M(k-1)$$

$$h = 1, \dots, N, \quad k > 0$$
(60)

Un nombre maximal  $N$  d'itérations est considéré pour actualiser l'entrée de commande et la sortie du RdPCV en temps borné :  $U(k) = U(k, N)$ , et  $y(k) = y(k, N)$ . L'équation (59) est réécrite :

$$\delta U(k, h) = -(S(k) \cdot S(k)^T + \lambda \cdot I)^{-1} \cdot S(k) \cdot \varepsilon(k, h),$$

$$U(k, 0) = U(k-1), \quad h = 0, \dots, N-1, \quad k \geq 0$$
(61)

avec  $\delta U(k, h) = U(k, h+1) - U(k, h)$ .

Les équations (60) et (61) se généralisent aux cas multi - sorties avec un raisonnement identique à celui du paragraphe précédent.

### *c Régulateur prédictif*

Lorsque des places intermédiaires et des transitions non commandées existent entre les entrées de commande et les sorties du RdPCV, les marques présentes dans ces places ne sont pas prises en compte lors de l'actualisation du vecteur  $U$  et le régulateur ne converge pas vers le marquage désiré (les places ont un effet cumulatif). Afin de surmonter cette difficulté, nous proposons d'utiliser un régulateur prédictif où le RdPCV devient un prédicteur qui calcule l'erreur  $\varepsilon(k, L) = y_d(k) - y(k+L)$ , entre la sortie désirée et la sortie du RdPCV  $y(k+L)$  à l'instant  $t = (k+L) \cdot \Delta t$  obtenue à partir du marquage  $M(k+i-1)$ ,  $i=0, \dots, L$ , et de l'entrée  $U(k-1)$  :

$$y(k+i) = y(k+i-1) + \Delta t \cdot \left( \sum_{j=1}^d u_j(k-1) \cdot Q \cdot W_{Cj} \cdot A_j(\varphi) + \sum_{j=1}^{p-d} x_{\max NC j} \cdot Q \cdot W_{NCj} \cdot B_j(\varphi) \right) \cdot M(k+i-1)$$

$$i = 1, \dots, L, \quad k > 0$$
(62)

Dans le calcul de  $\varepsilon(k, L)$ , le vecteur  $U(k-1)$  est considéré constant sur l'intervalle  $[k \cdot \Delta t, (k+L) \cdot \Delta t]$ . Le paramètre  $L$  correspond à l'horizon prédictif, il permet de prendre en compte le marquage des places intermédiaires qui n'apparaissent pas dans la définition des sorties ainsi que la dynamique des transitions non commandables. L'équation (59)  $\delta U(k) = -(S(k) \cdot S(k)^T + \lambda I)^{-1} \cdot S(k) \cdot \varepsilon(k)$ ,  $k \geq 0$  est remplacée par :

$$\delta U(k) = -(S(k+L) \cdot S(k+L)^T + \lambda I)^{-1} \cdot S(k+L) \cdot \varepsilon(k, L), \quad L \geq 0, k \geq 0$$
(63)

Le cas multi-sorties est résolu en utilisant un horizon prédictif  $L$  avec les équations (55)

$$y(k) = y(k-1) + \Delta t \cdot \left( \sum_{j=1}^d u_j(k-1) \cdot Q \cdot W_{Cj} \cdot A_j(\varphi) + \sum_{j=1}^{p-d} x_{\max NC j} \cdot Q \cdot W_{NCj} \cdot B_j(\varphi) \right) \cdot M(k-1) \quad k > 0$$

(57). La stabilité de ces algorithmes de commande a été étudiée par Lefebvre et al. (Lefebvre, et al., 2005). Pour mettre en œuvre ces algorithmes, il reste à déterminer le gradient des sorties par rapport aux entrées.

#### *d Les fonctions de sensibilité*

Les algorithmes du gradient reposent sur l'évaluation des fonctions de sensibilité. Ces fonctions sont définies en temps continu pour les RdPCV et sont déterminées en temps discret en fonction de la période d'échantillonnage  $\Delta t$ . Ces fonctions de sensibilité correspondent au gradient de la sortie par rapport aux entrées (Lefebvre, et al., 2013).

Le calcul du gradient revient à calculer la sensibilité de chaque sortie  $y_\alpha$  par rapport aux variations des entrées de commande  $U$ . Soit  $s_{\alpha\gamma}(k)$  le gradient de la sortie  $y_\alpha$  par rapport à l'entrée  $u_\gamma$  (i.e. la fréquence maximale de franchissement  $x_{\max C\gamma}$ ). Le gradient  $s_{\alpha\gamma}(k)$  est calculé par une méthode du premier ordre en utilisant les fonctions de classification  $f_j$  définies par l'équation (51) (Lefebvre, et al., 2003) :

$$\delta s_{\alpha\gamma}(k) = \sum_{i=1}^n q_{\alpha i} \cdot \left( w_{i\gamma} \cdot \mu_\gamma(k) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq \gamma}}^p w_{ij} \cdot x_{\max j} \cdot s_{fj\gamma}(k) \right) \cdot \Delta t$$
(64)

avec  $\delta s_{\alpha\gamma}(k) = s_{\alpha\gamma}(k) - s_{\alpha\gamma}(k-1)$  et  $s_{\alpha\gamma}(0) = 0$ .

### ***III.4.2 Pilotage d'une boucle Kanban***

#### *III.4.2.1 Introduction (JàT Kanban)*

L'origine du Juste à Temps (JàT) remonte au courant des années soixante-dix, plus particulièrement dans l'industrie Japonaise (Sugimori, et al., 1977; Monden, 1981; Di Mascolo, et al., 1991). Le principe de fonctionnement du JàT consiste à produire un bien ou un composant seulement à l'instant où l'on en a besoin. La mise en place d'une approche JàT induit souvent la mise en place d'un système kanban. Dans un système kanban, une carte kanban est attachée à chaque produit (ou à chaque lot). Dans ce cadre, l'utilisation d'une pièce (ou lot) produite libère la carte kanban qui lui est attachée et qui pourrait être alors attachée à une nouvelle pièce (ou lot) à produire. Cette libération de carte kanban induit l'équivalent d'un nouvel ordre de fabrication (ordre de remplètement). Nous nous trouvons alors dans un système de flux tiré. Un système kanban a été représenté par certains chercheurs en plusieurs étages ou mailles (Di Mascolo, et al., 1991).

Les systèmes JàT ont originellement été conçus pour des environnements de production déterministes présentant une demande stable et des temps de processus relativement constants. Dans ce contexte, les systèmes JàT présentent des performances intéressantes, le système Kanban traditionnel possède alors un nombre de cartes constant qui circulent dans le système. Dans un environnement instable (variabilité importante de la demande par exemple), un tel système devient inadapté et il est nécessaire de modifier ses paramètres pour qu'il puisse être encore adapté. Pour cela, deux grandes approches existent. Il est possible de modifier le nombre de cartes kanban présentes dans le système ou encore de modifier le nombre de pièces affectées à une carte. On parle alors de kanban dynamique (Shahabudeen & Sivakumar, 2007).

Les récents progrès dans le domaine des technologies d'identification automatique (Auto-ID), comme par exemple l'identification par radiofréquence (RFID-Radio Frequency Identification), rendent envisageable leur utilisation au profit de la production en permettant la collecte, le stockage et la communication d'informations précises et en temps réel (Klein & Thomas, 2009). Le produit, ou un élément du système physique (le Kanban, par exemple) instrumenté à l'aide des technologies RFID devient « actif ». C'est cette stratégie qui est employée par la société TRANE pour gérer une cellule de découpe de tôles. Le concept de « système contrôlé par le produit » (SCP, décrit précédemment) est

considéré comme une manière différente de voir le contrôle d'un atelier ou, d'une manière générale, des flux physiques de produits et de matières. Selon ce concept, le produit peut porter, de manière permanente et continue (ou discontinue), des informations. Il peut aussi en donner à et/ou en capter de son environnement immédiat. Il peut enfin sur la base de ces informations, et faisant suite à un traitement qu'il opérerait lui-même, prendre des décisions relatives à son propre devenir et les faire appliquer par les éléments constitutifs de son environnement (Thomas, et al., 2009). Il est donc envisageable qu'une telle approche permette de collecter des informations afin d'adapter (contrôler) en temps réel le système kanban.

#### III.4.2.2 Modèle RdP de système kanban

Depuis longtemps, les réseaux de Petri (RdP) ont montré qu'ils étaient utiles pour l'étude des systèmes à événements discrets (SED) et même des systèmes dynamiques hybrides (SDH), du fait qu'ils associent une représentation graphique intuitive à des expressions analytiques. De ce fait de nombreux modèles de systèmes Kanban utilisant la théorie de RdP ont été construits. On peut noter quelques exemples de modèle utilisant les RdP (Jain, et al., 2006), les RdP temporisés (Di Mascolo, et al., 1991; Panayiotou & Cassandras, 1999; Giua, et al., 2002; Bohez, 2004), les RdP Stochastiques (Nakashima & Gupta, 2003) ou les RdP colorés (Moore & Gupta, 1999; Mohanty, et al., 2003; Ullah & Bohez, 2008).

Nous nous sommes intéressés à un modèle RdPT proposés par Di Mascolo *et al.* (Di Mascolo, et al., 1991). Ce modèle présente l'avantage d'être simple et de pouvoir représenter une large gamme de situation. Notons que l'approche de pilotage utilisée peut être adaptée à tout modèle utilisant des RdPT et même à la plupart des modèles utilisant des RdP Colorés car il est toujours possible, à partir d'un RdP coloré, d'en construire un modèle équivalent à l'aide de RdPT.

Le système kanban qui nous a servi pour l'étude prend en compte les hypothèses suivantes :

- chaque étage est constitué d'une installation unique comprenant une ou plusieurs machines identiques,
- chaque étage a, au plus, un étage prédécesseur et un étage successeur,
- le système produit un et un seul type de pièces,
- la taille de tous les kanban est la même (une pièce),

- quand un kanban est détaché d'une pièce utilisée par l'étage suivant, il est immédiatement disponible (pas de délai) pour être attaché à une pièce de l'étage précédent.

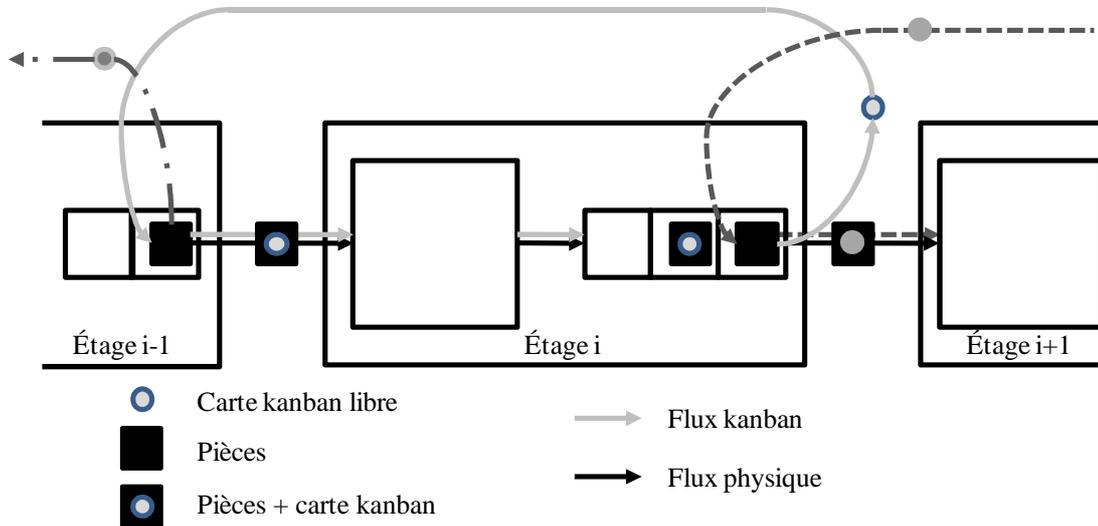


Figure 22. Système Kanban - Liens entre les différents étages

Le fonctionnement d'un tel système peut être décrit par la Figure 22 qui se focalise sur l'étage *i* et présente les flux de produits et de kanban entre les étages *i-1*, *i* et *i+1*. Si on considère l'étage *i*. Chaque kanban peut se trouver dans trois états distincts :

- il est libre et il attend d'être attaché à une nouvelle pièce de l'étage *i-1*,
- il est attaché à une pièce qui se trouve dans le process de production,
- il est attaché à une pièce présente dans le stock de sortie.

Un tel système kanban est modélisé à l'aide du RdPT présenté Figure 23 (Di Mascolo, et al., 1991).

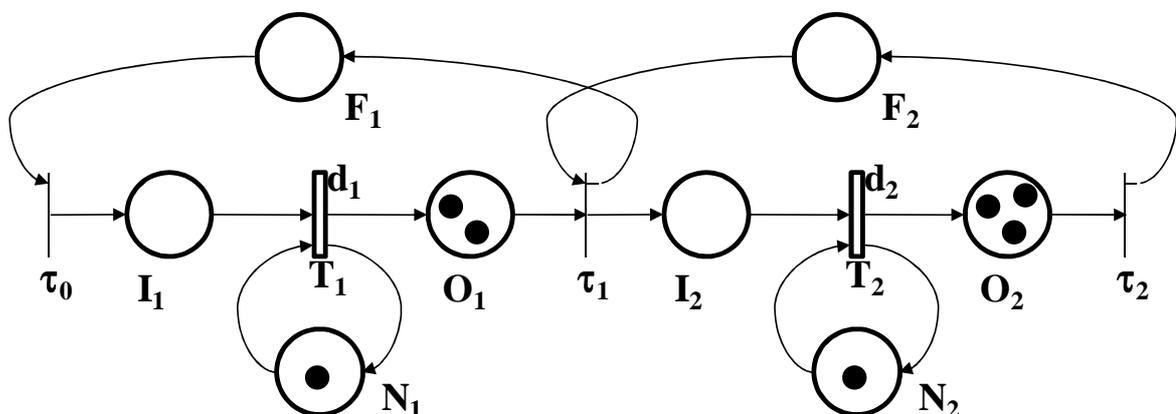


Figure 23. Modèle RdPT pour un système kanban à 2 étages

Dans ce modèle RdPT, les trois états dans lesquels peut se trouver une carte Kanban sont représentés par trois places dénotées respectivement  $F_i$ ,  $I_i$ , et  $O_i$ . Le nombre de jetons

dans la place  $I_i$  représente le nombre de pièces dans le process de production. Le nombre de jetons dans la place  $O_i$  représente le nombre de pièces présentent dans le stock de sortie quand celui dans  $F_i$  représente le nombre de cartes kanban libres. La transition  $T_i$  placée entre les places  $I_i$ , et  $O_i$  est une transition temporisée dont le délai  $d_i$  représente le temps opératoire de l'étage  $i$ . Le nombre de jetons dans la place  $N_i$  correspond au nombre de machines identiques présentes dans l'étage  $i$ . La transition  $\tau_i$  représente la synchronisation entre les étages  $i$  et  $i+1$ . Cette transition est une transition immédiate.

Ce RdPT correspond au cas où la demande et l'approvisionnement sont supposés infinis. Diverses variations ont été proposées sur ce même modèle pour prendre en compte, une demande limitée, un approvisionnement limité ou encore des demandes perdues (Di Mascolo, et al., 1991).

Notre objectif est ici de piloter le système kanban considéré en utilisant son modèle RdP et en exploitant des techniques de contrôles des RdPCV présentées au paragraphe précédent.

Lorsque les dynamiques d'un système physique sont nombreuses, sa modélisation par un RdP discret (ordinaire, temporisé ou coloré) conduit à complexifier énormément le modèle et en particulier à une augmentation très significative du nombre de marques. Pour pallier à cette difficulté, David et Alla ont proposé d'utiliser des RdP continus à vitesses variables (RdPCV) comme approximation de RdPT. De surcroît, des méthodes de transformation des RdPT en RdPCV et vice et versa ont été proposées (David & Alla, 1997). C'est ces méthodes de transformation qui vont nous permettre de convertir le modèle RdPT de la Figure 24 en un modèle RdPCV que nous pourrons exploiter.

Le passage d'un RdPT en un RdPCV nécessite plusieurs transformations. Le marquage discret des places doit être remplacé par un marquage continu. Les retards associés aux transitions du RdPT sont utilisés pour déterminer les fréquences maximales de franchissement des transitions du VCPN :

$$x_{\max_i} = \frac{1}{d_i} \quad (65)$$

La seule réelle difficulté consiste au traitement des transitions immédiates  $\tau_0$ ,  $\tau_1$  et  $\tau_2$  du modèle RdPT. En effet la durée de franchissement de ces transitions du RdPT est nulle ce qui conduit à une fréquence maximale de franchissement infinie dans le RdPCV. Pour répondre à cette difficulté, deux approches peuvent être exploitées.

La première va consister à considérer ces transitions immédiates comme des transitions temporisées avec un retard très court comparativement aux autres dynamiques du système. Cette approche correspond au cas où le passage du stock de sortie de l'étage  $i$  au stock d'entrée de l'étage  $i+1$  n'est pas instantané. Cette approche conduit au modèle RdPCV de la Figure 24 que l'on appellera modèle RdPCV complet.

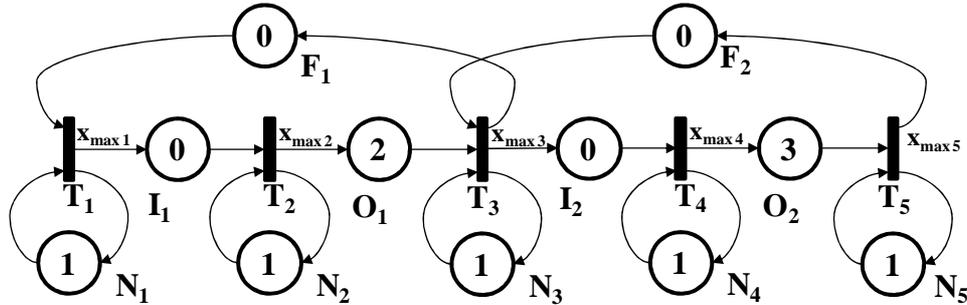


Figure 24. Modèle RdPCV d'un système Kanban à deux étages

Les transitions  $T_1$ ,  $T_3$  et  $T_5$  correspondent aux transitions immédiates du RdPT, et donc, possèdent de grandes fréquences maximales de franchissement. Les fréquences maximales de franchissement des transitions  $T_2$  et  $T_4$  correspondent aux vitesses de production des deux étages. Les marquages des places  $N_2$  et  $N_4$  correspondent aux nombres de machines des deux étages respectivement.

La deuxième approche consiste à considérer que puisque les transitions immédiates  $\tau_0$ ,  $\tau_1$  et  $\tau_2$  du RdPT ont par définition une durée de franchissement nulle, chaque jeton dans la place  $O_i$  implique que la transition  $\tau_i$  est immédiatement tirée et le jeton considéré est conduit dans la place  $I_{i+1}$ . Il est donc possible d'agréger les deux places  $O_i$  et  $I_{i+1}$  afin de préserver la durée nulle de franchissement. Cette approche correspond au cas où les stocks de sortie de l'étage  $i$  et d'entrée de l'étage  $i+1$  sont confondus. Cette approche conduit au modèle RdPCV de la Figure 25 que l'on appellera modèle réduit.

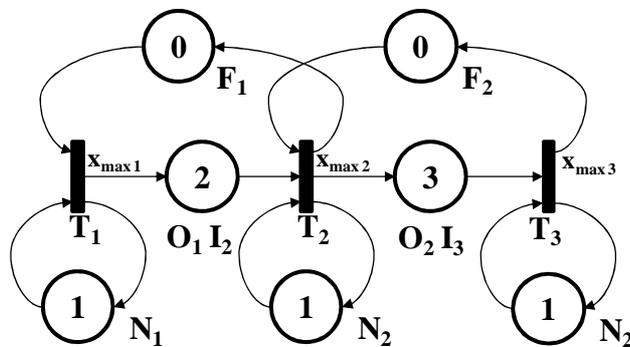


Figure 25. Modèle RdPCV réduit d'un système Kanban à deux étages

Une limitation de ce modèle réduit est qu'il est nécessaire d'avoir toujours des cartes kanban libres pour commencer le processus de fabrication. Cependant, considérant le fait que l'objectif est de déterminer le nombre optimal de cartes Kanban à mettre en circulation à chaque instant dans le système réel, le nombre de cartes Kanban dans le modèle doit être surdimensionné afin de permettre l'introduction d'une nouvelle carte. Ceci fait que cette limitation n'en est pas vraiment une.

#### *III.4.2.3 Pilotage d'une boucle Kanban*

Dans le paragraphe précédent, nous avons décrit deux modèles RdPCV d'un même système Kanban. Nous pouvons donc utiliser la stratégie de commande décrite au paragraphe III.4.1 afin de piloter le modèle du système Kanban en fonction de l'évolution de la demande et ainsi déterminer le nombre optimal de cartes à introduire dans chaque étage à chaque instant.

Le système considéré est celui décrit dans le paragraphe précédent et les deux approches d'approximation de modèles par RdPCV (complet et réduit) décrits par les Figure 24 et Figure 25 prenant en compte plusieurs configurations ont été testées et comparées (Thomas, et al., 2010; Thomas, et al., 2011a). Dans un premier temps la demande a été figée et les deux cas extrêmes suivants ont été testés :

- toutes les cartes Kanban sont libres à l'état initial (stock d'en cours vide),
- toutes les cartes Kanban sont associées à des pièces en attente d'être consommées par le système aval (stock d'en cours plein).

Dans les deux cas, et pour les deux modèles, l'objectif de marquage de la place représentant le stock de sortie ( $O_2$  pour le modèle complet et  $O_2I_3$  pour le modèle réduit) est atteint. Le modèle complet stabilise le nombre de cartes à introduire dans le système plus rapidement, cependant, le modèle réduit se trouve être, au final, plus parcimonieux. Ce premier travail montre que cette approche permet de calibrer un système kanban en évaluant le nombre de cartes à introduire dans le système, et ce, en fonction des objectifs fixés.

Notre objectif est cependant de rendre adaptatif le pilotage du système Kanban. Pour cela deux autres études ont été mises en œuvre.

La première consiste tout simplement à faire varier la demande et à étudier comment le contrôle permet d'adapter le nombre de cartes Kanban. Dans ce cas, la réponse du système est différente pour les deux modèles. Pour le modèle réduit une modification de la

demande entraîne immédiatement une modification des fréquences maximales de franchissement représentant les cadences de production ce qui entraîne de facto l'introduction de nouvelles cartes. Pour le modèle complet, le système commence par jouer sur la variation des stocks intermédiaires et n'agit sur les cadences de production que dans un second temps. Ceci implique que le modèle complet est plus stable, mais aussi, moins réactif que le modèle réduit.

La deuxième étude concerne l'impact de la défaillance d'une machine dans un étage qui doit être multi machines bien évidemment. Dans ce cadre, plusieurs stratégies peuvent être employées :

- le lot en cours attend que la machine en question soit réparée,
- la suite du lot en cours est terminée sur une autre machine de l'étage,
- on abandonne le lot en cours et on relance un autre ordre de fabrication.

Le choix d'une stratégie ou d'une autre peut être effectué en fonction du pourcentage de réalisation du lot. Nous n'avons testé que la deuxième stratégie, et les résultats ont montré que les deux modèles sont tout à fait équivalents et permettent d'adapter le fonctionnement du système à un tel aléa très rapidement.

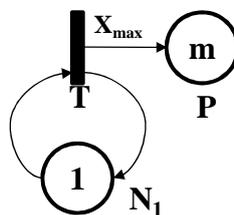


Figure 26. RdPCV convertisseur de commande

A ce stade, nous avons donc construit une commande continue d'un RdPCV permettant d'adapter le pilotage d'un système Kanban à la présence de différents aléas. Il peut être cependant utile de construire une commande discrète que l'on appliquera au système réel. Pour cela, il est possible d'exploiter l'équation (65) pour retrouver les délais à affecter aux transitions  $T_1$  et  $T_2$  du RdPT de la Figure 23 à partir des vitesses maximales de franchissement des transitions correspondantes ( $T_2$  et  $T_4$  pour le modèle complet et  $T_1$  et  $T_2$  pour le modèle réduit) des RdPCV. Une autre approche consiste à exploiter la structure du RdPCV présenté Figure 26, dont la fréquence maximale de franchissement de la transition source  $T$  est le signal de commande que l'on souhaite convertir en délais pour commander un RdPT. Pour obtenir ces délais, il suffit d'extraire les instants où le marquage  $m$  de la place  $P$  est un entier.

### *III.5 BILAN*

Au cours des neuf années passées au CRAN, de 2005 à maintenant, mon activité est clairement subdivisée en deux axes. Le premier concerne la construction de modèles réduits de simulation de flux quand le deuxième s'intéresse au pilotage d'un système de production de manière à le rendre adaptatif.

Sur le premier axe, les travaux menés ont montré qu'il était possible de construire un modèle réduit en associant une approche file d'attente pour le goulot d'étranglement à un modèle continu de type réseau de neurones pour représenter les postes de travail qui ne représentent pas des contraintes. Deux problèmes ont été plus particulièrement adressés, la détermination de la structure optimale du réseau de neurones, et l'impact de la présence de données discrètes dans le jeu de données d'entrée du réseau. Ces travaux ont donné lieu à 2 publications dans des revues internationales, 3 communications dans des conférences internationales et 4 communications dans des conférences francophones.

Concernant le deuxième axe, nous avons proposé une approche de contrôle de RdPCV basée sur le principe de la descente du gradient dérivée des techniques d'apprentissage des réseaux de neurones. Après avoir rappelé qu'il est possible de construire une approximation RdPCV d'un modèle RdPT, nous avons exploité un modèle RdPT d'un système kanban tiré de la littérature pour proposer une stratégie de pilotage de système kanban permettant de répondre à divers aléas comme, une variation de la demande, la défaillance d'un poste de travail. Ces travaux ont donné lieu à 1 publication dans une revue internationale, 3 communications dans des conférences internationales et 2 communications dans des conférences francophones.

---

Chapitre

**IV**

**IV PROJET DE RECHERCHE ET  
D'ENSEIGNEMENT**



## *IV.1 INTRODUCTION*

Le projet de recherche que je vais décrire ici s'intègre dans le département Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques (ISET) du CRAN et plus particulièrement dans le projet Systèmes à Intelligence Ambiante (SIA). Ce projet s'intéresse aux diverses approches pour piloter les flux de produits dans les systèmes logistiques complexes (chaînes logistiques et intra-atelier) ainsi qu'au moyen d'y apporter des services (concept d'environnement ambiant) en partant de l'hypothèse que le produit est actif et/ou communicant ce qui nous conduit au concept d'Holon et de système contrôlé par le produit. Les objectifs du projet peuvent être synthétisés en cinq points :

- mettre en relation des données quantitatives et qualitatives en provenance du produit ou du système de production afin de modéliser les informations relatives au système considéré,
- construire des modèles de simulation et d'émulation de type ED pour l'évaluation de flux,
- intégrer aux systèmes d'information des connaissances formalisées par des modèles de type NIAM ou SysML,
- formaliser et évaluer l'interopérabilité sémantique entre systèmes ce qui nécessite de sélectionner les informations pertinentes,
- définir des architectures de systèmes d'information distribués et des modèles de décision associés de type SMA ou holonique.

Pour chacun de ces objectifs, les questions récurrentes sont :

- Quelles données sont disponibles ?
- Quelle information ou connaissances sont nécessaire ?
- Comment doit-on les modéliser et les organiser ?
- ...

Ces problèmes sont bien entendu des problèmes récurrents que l'on retrouve dans les deux autres projets du département. Par exemple, dans le cadre du projet Sûreté de Fonctionnement Système (SdFS), des problèmes d'évaluation de fiabilité ou de disponibilité de systèmes, ou encore la prise en compte et la gestion des incertitudes nécessitent d'adresser ce type de problèmes. De manière identique, ces problèmes sont au cœur de la détermination des corrélations entre paramètres de nature différentes dans les

réseaux de capteurs, dans le projet Systèmes de Communications Contraintes (CO2), par exemple.

Une approche pour cela est d'exploiter les techniques d'apprentissage et d'extraction de connaissance à partir de données. Le département ISET étant organisé en trois projets (SdFS, SIA et CO2) et en domaines fédérateurs (transverses aux trois projets) (Figure 27), je me propose de développer et d'animer un autre domaine fédérateur transversal traitant de la structuration et de l'exploitation des données qui viendra en support des activités du projet SIA en particulier, et de l'ensemble du département ISET en général.

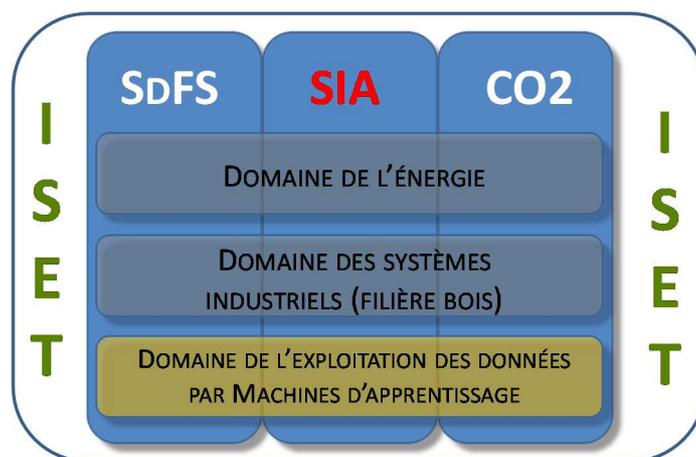


Figure 27. Organisation du département ISET

Le département ISET s'intéresse en particulier aux systèmes Eco-Techniques. Le concept Eco-Technique est relatif au génie écologique et à l'ensemble des techniques de préservation de l'environnement. En ce sens, le génie écologique associe les disciplines d'ingénierie traditionnelle (dont les sciences de l'ingénieur) et de l'écologie scientifique (étude des éco-systèmes). Ces systèmes sont des systèmes complexes « vivants » et donc évolutifs, évoluant dans un environnement changeant, communiquant (notion d'intelligence ambiante), récursifs et pouvant être constitués d'autres systèmes complexes. Un tel système peut être représenté par la Figure 28.

Ces systèmes doivent donc être capables de collecter les données les concernant, de les traiter pour en extraire de l'information qui doit être communiquée aux autres systèmes constituant son environnement. Les techniques d'apprentissages sont particulièrement bien adaptées à la construction des modèles permettant de régir leurs comportements. Le côté évolutif, tant du système lui-même que de son environnement, implique de surcroît que ces modèles doivent être adaptatifs. Là encore, les approches par apprentissage permettent d'adapter les modèles en cours de fonctionnement aux diverses évolutions.

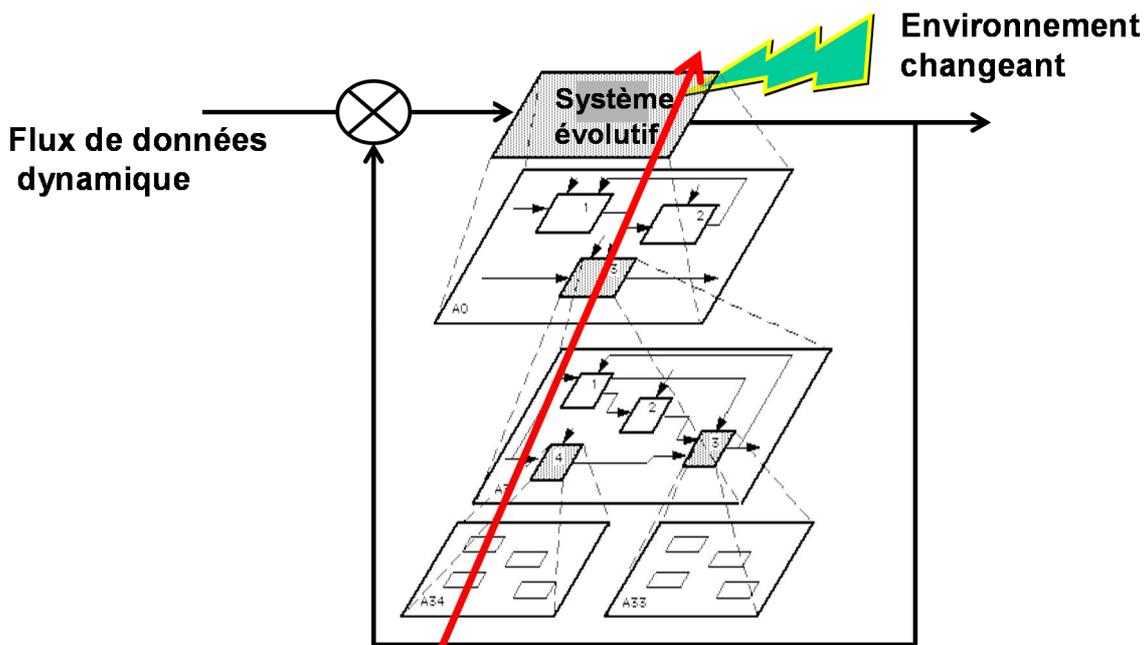


Figure 28. Représentation d'un système éco-technique

Outre la poursuite de mes activités en cours sur les outils et techniques précédemment décrites, le cœur de mon activité portera sur **le développement de techniques et outils permettant de construire et d'adapter de manière automatique des modèles pour les systèmes éco-techniques**. Comme expliqué précédemment ces systèmes sont eux-mêmes constitués ou constituent d'autres systèmes éco-techniques. Ils présentent donc une structure récursive qui nécessite une modélisation à deux niveaux : un niveau opérationnel et un niveau global. Au niveau opérationnel, il est nécessaire d'être capable de traiter des données, connaissances, informations... de nature et de provenance différentes. Au niveau global, il est nécessaire d'être capable d'agréger et désagréger des données, mais également de déterminer la structure récursive elle-même (liant les sous-systèmes entre eux).

D'autre part, bien que tout le monde s'accorde pour décrire le monde industriel comme un monde complexe et évolutif, la plupart des travaux en proposent des modèles ou systèmes de pilotage figés pouvant être centralisés ou hétérarchiques. L'approche que je propose a pour but de pouvoir adapter ces modèles, ou systèmes de pilotage, au changement car l'extraction de la connaissance à partir des données permet de :

- détecter une dérive entre le modèle de référence et le monde réel d'une part,
- proposer une évolution du modèle ou du système de pilotage prenant en compte les évolutions du système d'autre part.

Le projet de recherche que je vais maintenant détailler s'articule autour de deux axes et trois paragraphes ; le quatrième paragraphe concernant plutôt un projet d'enseignement. Le paragraphe suivant va être l'occasion de s'intéresser aux verrous relatifs au niveau opérationnel de ces systèmes récurrents en s'intéressant aux problèmes de l'hétérogénéité des données, d'une part, et de la détermination de la structure des modèles, d'autre part.

Le paragraphe IV.3 s'intéressera à la vision globale de ces systèmes éco-techniques. Au niveau global, on s'intéressera à la coexistence de notions différentes (données, informations, connaissances) dans les modèles et à l'élaboration de l'architecture globale du modèle.

Pour ces deux points, il sera nécessaire de garder à l'esprit que ces systèmes sont des systèmes évolutifs évoluant dans un environnement lui-même évolutif et les approches proposées devront permettre d'adapter les modèles à ces changements.

Le paragraphe IV.4 présentera un domaine applicatif de ces approches qui sera plus particulièrement adressé, à savoir la modélisation et le pilotage de systèmes contrôlés par le produit.

Le paragraphe IV.5 présentera lui le projet d'ouverture d'un nouveau département que je porte au sein de l'IUT d'Epinal Hubert Curien.

## *IV.2 AU NIVEAU OPERATIONNEL*

### *IV.2.1 Introduction*

Comme nous venons de le voir, un des points important pour modéliser ou piloter un système éco-technique est l'élaboration et la maintenance de la connaissance à incorporer dans les entités élémentaires le constituant. Dans le chapitre précédent, nous avons proposé une approche de réduction de modèle de simulation ou d'émulation basée sur l'association d'un modèle discret de type files d'attentes avec un modèle continu de type réseau de neurones. Cette approche donne des résultats intéressants pouvant être exploités pour l'élaboration de cette connaissance au niveau local mais pouvant être améliorés selon deux axes principalement.

Le premier axe concerne l'aspect stochastique des données qui n'est peu, pas ou mal pris en compte dans le modèle. En effet, si la partie discrète du modèle peut très facilement prendre en compte des données stochastiques influant sur le système comme les notions de fiabilité ou de maintenabilité par exemple, il n'en est pas de même de la

partie continue du modèle basée sur les réseaux de neurones. Dans ce cadre, nous proposons de remplacer l'outil réseau de neurones par un autre outil déjà exploité dans le domaine de la sûreté de fonctionnement qu'il faudra adapter à nos besoins. Ce point fera l'objet du paragraphe suivant.

Le second point est que le réseau de neurones est un outil bien adapté à la réalisation d'un mapping d'un espace continu vers un autre espace continu. Cependant, comme nous l'avons vu au paragraphe III.3.2.1, la réduction de modèle de simulation nécessite bien souvent de prendre en compte des données discrètes que le réseau de neurones peut avoir du mal à apprendre sans effectuer au préalable un pré traitement sur les données pour, soit les binariser, soit subdiviser le problème en différents sous problèmes qui seront alors modélisés individuellement. Ces deux approches, bien que permettant de répondre au problème, ne sont pas totalement satisfaisantes car elles compliquent la tâche du modéleur. La recherche d'un outil permettant de prendre en compte, indifféremment et automatiquement, aussi bien des données, discrètes que continues, fera l'objet du paragraphe IV.2.3.

#### ***IV.2.2 Des données stochastiques***

Un système de production n'est pas un processus déterministe. En effet, même si le procédé de fabrication était totalement maîtrisé, il resterait toujours l'imprévu dû aux pannes notamment. Si les modèles discrets, de type réseau de files d'attente, peuvent prendre en compte cet aspect stochastique sous forme de loi de probabilité de défaillance, de réparation, d'arrivée de pièces..., il n'en est pas de même des réseaux de neurones. Aussi l'approximation engendrée par la non prise en compte de ces aspects stochastiques peut s'avérer dans certains cas préjudiciables.

Dans ce cas, notre objectif va être de construire un modèle de temps d'écoulement prenant en compte des données déterministes et stochastiques. Nous proposons d'exploiter une approche utilisant les Modèles Graphiques Probabilistes (MGP) reposant sur la théorie des graphes et celle des probabilités et connus dans la littérature sous diverses dénominations comme réseaux probabilistes, réseaux de croyances, réseaux bayésiens par exemple. Ces outils ont été largement utilisés dans la communauté sûreté de fonctionnement et diverses extensions en ont été proposées. Nous nous intéressons plus particulièrement à une extension de ces MGP, les Modèles Graphiques de Durée (MGD)

dont la finalité est bien de modéliser un système dynamique (Donat, 2009). Cet outil a été créé pour modéliser :

- des temps d'écoulement entre deux évènements (ex. : durée de vie),
- des transitions entre deux évènements (ex. : transition entre deux états de fonctionnement).

Cet outil semble donc bien convenir à notre problématique.

Un MGD est un MGP Markovien discret et fini reposant sur la structure graphique de la Figure 29. Les qualificatifs « discret » et « fini » indiquent que l'espace des états doit être un ensemble dénombrable et fini. Le modèle MGD s'articule autour des variables aléatoires  $X_t$ ,  $S_t$  et  $A_t$ , représentant respectivement à l'instant  $t$  l'état du système, le temps de séjour restant dans cet état et l'action sélectionnée.

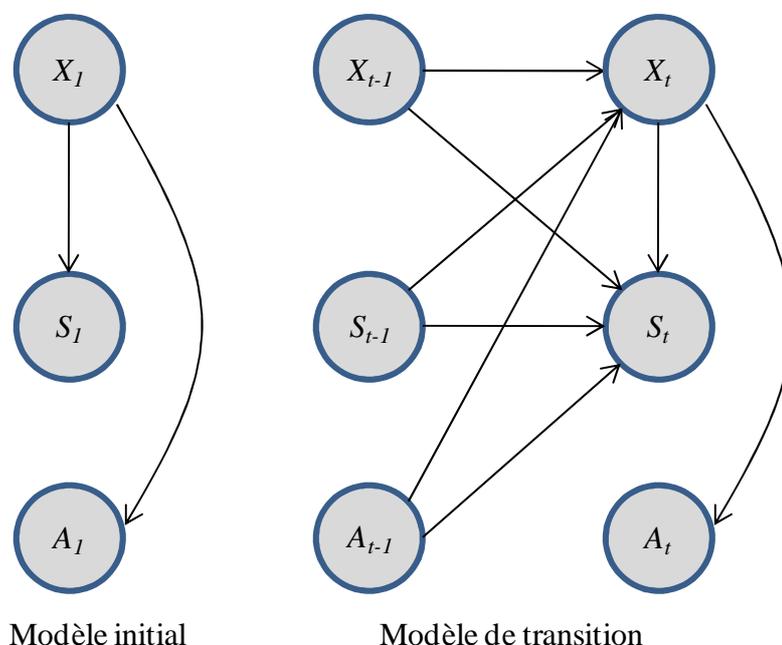


Figure 29. Structure du MGD

L'étude de ce graphe montre la structure réursive du modèle MGD. L'état à l'instant  $t$  dépend à la fois de l'état à l'instant précédent, du temps de séjour à l'instant  $t-1$  et de l'action sélectionnée au pas précédent. Ce graphique montre aussi une première limitation de ce modèle, la nécessité de travailler en temps discret. Se pose donc un premier problème, quel pas de discrétisation du temps adopter. Un pas trop court va conduire à un temps de calcul prohibitif du modèle, un pas trop long peut conduire à une instabilité du modèle.

La deuxième difficulté va être la prise en compte des informations déterministes dans le modèle. En effet, les arcs du modèle représentent des lois de probabilités conditionnelles par nature stochastiques. Les algorithmes d'apprentissage ou d'inférence sont-ils toujours valide en présence de variables déterministes ?

D'autre part, le modèle MGD fait appel à des variables discrètes. Hors nous avons vu que, par exemple, le temps d'écoulement dépend aussi bien de données discrètes que de données continues. L'approche généralement employée pour gérer les données continues consiste alors à les quantifier ce qui introduit un bruit de quantification d'autant plus important que le nombre de classes est petit. Les questions que l'on doit se poser alors sont :

- En combien de classes doit on effectuer la quantification des variables continues ?
- Qu'elle va être la pertinence du modèle résultant compte tenu de cette quantification ?
- Peut-on mettre en place une approche permettant d'éviter cette quantification ?

Par ailleurs, les MGD étant une extension des MGP, les algorithmes d'apprentissage tant structurel que paramétrique (lois de probabilités conditionnelles) mis au point pour les MGP peuvent être exploités. Cependant, la prise en compte de variables déterministes ou la non quantification des variables continues autorisent-elles l'exploitation de ces algorithmes sans modification ?

Pour finir, ce modèle MGD a pour but de remplacer les réseaux de neurones dans le modèle de simulation réduit décrit au paragraphe III.3.1. La question se pose de savoir comment ce modèle pourra être interconnecté avec le modèle du goulot d'étranglement.

### ***IV.2.3 Des données discrètes***

De nombreux outils sont plus particulièrement dédiés au traitement de données continues. On peut citer, l'analyse statistique, les réseaux de neurones, les SVM. La principale difficulté pour ces outils consiste dans la prise en compte des données discrètes. Un autre point crucial concerne la détermination de la structure (nombre de neurones cachés, détermination des entrées utiles) et bien sur des paramètres par apprentissage supervisé. Ce problème se pose en particulier pour la mise en place de modèles neuronaux.

---

Pour construire un modèle neuronal, il est nécessaire d'en déterminer la structure et cette tâche reste un problème crucial. Ce point qui a été traité au paragraphe III.3.2.2 reste à étudier car les réponses apportées méritent d'être améliorées.

Un deuxième point concerne la prise en compte des variables discrètes. Là encore des solutions ont été proposées au paragraphe III.3.2.1. Cependant, nous ne sommes pas encore parvenus à la définition d'un outil permettant de traiter automatiquement et indifféremment des variables continues mélangées à des variables discrètes. En effet, il est soit nécessaire de binariser certaines variables discrètes, soit de construire plusieurs modèles continus ainsi qu'un automate discret permettant de passer d'un modèle à un autre.

Une autre approche consiste à exploiter un autre type de réseaux de neurones, les réseaux de neurones impulsionnels.

Ces réseaux de neurones, d'inspiration biologique, sont vus comme la troisième génération de réseaux de neurones car ils sont capables d'introduire naturellement une dimension temporelle dans les réseaux de neurones. Leur particularité est de fournir une sortie digitale asynchrone pour laquelle, le temps devient un élément explicite du modèle (Maass, 1997). La détection de synchronisation a ainsi été utilisée pour illustrer les possibilités de calculs réalisables par des neurones impulsionnels dans un but de comparaison avec des neurones artificiels plus conventionnels (Maass et Bishop, 1998). La richesse de ces modèles provient de la coexistence de mécanismes à des échelles de temps très différentes (génération des impulsions très rapide, dynamique de membrane plus lente, plasticité synaptique et adaptation fréquentielle encore plus lente). Du fait de ces grandes différences d'échelles temporelles, il semble possible de faire coexister des variables discrètes avec des variables continues dans un même modèle (Rochel 2004). Ces réseaux sont jusqu'à maintenant principalement utilisés dans deux cadres :

- travaux de modélisation en neurosciences : on s'intéresse en particulier aux mécanismes physiologiques permettant l'apparition d'impulsions, ainsi qu'à l'interprétation des échanges d'impulsions en terme d'échanges fonctionnels d'information dans les systèmes visuels (Thorpe, 1995), auditif (Joris et al. 1998) ou olfactif (Laurent et al. 1996) notamment.

- travaux en informatique sur les réseaux de neurones artificiels, appliqués à la robotique autonome (Floreano et Mattiussi, 2001), ou à la simulation de portes logiques et de circuits (Ionescu et Sburlan 2008).

---

Ces réseaux de neurones ne se sont cependant pas encore diffusés dans l'industrie. Ceci tient à deux points principalement, leurs complexités d'une part et les performances encore limitées de leurs algorithmes d'apprentissage d'autre part. Il semble cependant judicieux d'étudier les performances et capacités de ces réseaux de neurones impulsionsnels comparativement à celles des réseaux de neurones plus classiques. Pour cela, il est nécessaire en particulier d'étudier des algorithmes de pruning et de sélection de variables adaptés à ces réseaux de neurones. Enfin, il est possible d'hybrider ces deux types de réseaux de neurones afin de profiter des avantages de chacun (simplicité et rapidité des PMC, exploitation de variables discrètes et continues des réseaux de neurones impulsionsnels). L'apprentissage et le pruning pourrait s'effectuer alternativement sur le PMC puis sur les neurones impulsionsnel jusqu'à atteindre la convergence selon une approche similaire à l'algorithme d'apprentissage multi-étapes (Thomas, et al., 1998).

### *IV.3 AU NIVEAU GLOBAL*

Le deuxième point à aborder concerne l'organisation globale du modèle des systèmes éco-techniques. En effet, si certaines approches reposent sur une organisation totalement hétérarchique, d'autres exploitent une structure hybride ou hiérarchique. Dans ce cadre, il est nécessaire de déterminer quelle hiérarchie mettre en place. Ainsi, par exemple, dans le cadre des SCP, Pabadis Promise (Wunsch & Bratukhin, 2007) s'appuie sur une architecture à trois niveaux (tactique, opérationnel, control), Herrera (Herrera, 2011) a proposé de s'appuyer sur une architecture basée sur MRP<sup>2</sup>. Ces choix, faits a priori, s'appuient plus sur le bon sens et l'histoire que sur des faits concrets. PROSA (Van Brussel, et al., 1998) privilégie une construction d'agrégats d'holons de manière dynamique en fonction des tâches à réaliser. Cependant, aucun critère standardisé n'existe pour choisir la méthodologie adaptée au cas considéré et encore moins pour déterminer la structure du modèle (généralement un Système Multi Agents SMA) du système considéré. La structure du modèle va alors être construite de manière heuristique en « singeant » la réalité physique ou informationnelle. Ainsi Créput (Créput, 2008) constate que la modélisation peut être conduite en se focalisant sur les aspects fonctionnels, physiques ou abstraits.

Dans ce cadre, il peut être intéressant de formaliser la construction de la structure du SMA selon deux aspects principaux :

- Quels types d'agents est-il nécessaire de créer dans le système ?
- Quels doivent être les communications d'information entre agents (qui communique quoi avec qui ?) ?

Nous proposons de répondre à ces deux questions séquentiellement en faisant émerger des éléments de réponse directement des données disponibles. Pour ce faire, les pistes qui nous paraissent les plus pertinentes sont celle des algorithmes d'apprentissage non supervisé qui permettent de regrouper les données sous formes de classes, les algorithmes se chargeant de déterminer le nombre et la forme des classes, d'une part, et les algorithmes évolutionnistes (colonie de fourmis, essaim d'abeilles...) qui permettent de faire émerger une structure ou un comportement des données, d'autre part.

Une telle approche permettra, par exemple, de valider si la décomposition en agents « produits », « lots », « ordres de productions », « production hebdomadaires », basée sur MRP<sup>2</sup> proposée pour les SCP par Herrera (Herrera, 2011) et présentée Figure 17 est bien pertinente ou si une autre organisation est plus adaptée basée par exemple sur un regroupement en couleurs, clients... (Figure 30).

Dans un second temps, et selon la même approche, la détermination des protocoles de communication entre agents pourra être en partie extraite de jeux de données. Ce point permettra de caractériser le degré d'autonomie des agents.

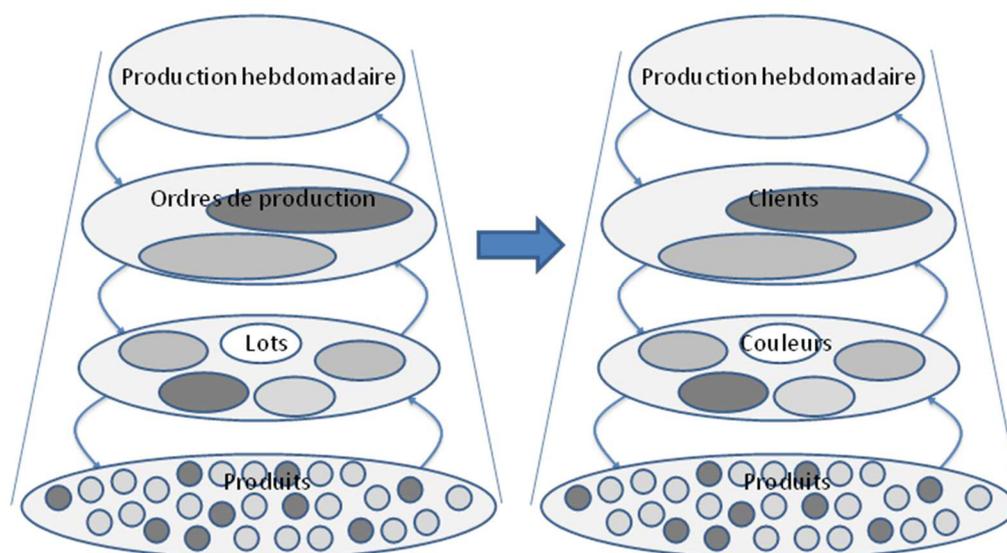


Figure 30. Détermination de l'organisation globale

#### ***IV.3.1 Caractérisation de la structure***

Comme nous l'avons expliqué au paragraphe III.2.2, de nombreuses méthodologies ont été proposées pour la modélisation d'approches distribuées en particulier dans le concept

SCP. Cependant, aucun critère standardisé n'existe pour choisir la méthodologie adaptée au cas considéré et encore moins pour déterminer la structure du SMA considéré. Là encore, la structure du SMA est généralement construite de manière heuristique en « singeant » la réalité physique ou informationnelle.

L'approche que nous proposons est d'extraire la structure du SMA directement des données en exploitant les techniques du clustering (partitionnement de données) qui ont pour but de classer de manière non supervisée les « patterns » en différents groupes. L'objectif est ici de regrouper les agents de base en un certain nombre de classes, ces dernières étant associées alors à des agents de classe de niveau supérieur pouvant être des lots si la structuration émergente est de type MRP<sup>2</sup> par exemple ou tout autre regroupement (couleurs, matières...) en fonction des conditions de production. L'objectif est également de pouvoir faire émerger une autre organisation plus adaptée en fonction des évolutions de l'environnement.

Il est important de comprendre la différence entre clustering (classification non supervisée) et l'analyse discriminante (classification supervisée). En classification supervisée, nous disposons d'un ensemble de patterns classés et le problème consiste à classer un nouveau pattern dans une des classes précédemment définies. Classiquement, l'ensemble de patterns classés est utilisé pour apprendre la description des classes afin de pouvoir y classer les nouveaux patterns. En clustering, le problème consiste à partir de patterns non classés de construire un certain nombre de classes (inconnues a priori) auxquelles seront associées ces patterns (Jain, et al., 1999). Les principales étapes du clustering sont (Jain & Dubes, 1988):

- Représentation des patterns (pouvant inclure l'extraction et/ou la sélection de variables) : détermination du choix du nombre de classes, du nombre de patterns disponibles, du nombre, du type et de la variation des variables.
- Définition d'une mesure de proximité des patterns appropriée au domaine des données : généralement effectuée par une fonction de distance entre deux patterns pouvant être, par exemple, une simple distance euclidienne.
- Clustering : l'appartenance d'un pattern à une classe peut être binaire ou flou.
- Abstraction des données : extraction d'une représentation simple et compacte du jeu de données.
- Evaluation du résultat.

---

Jain et Dubes (Jain & Dubes, 1988) ont proposé une taxonomie des méthodes de clustering qu'ils ont subdivisées en méthodes hiérarchiques et partitionnelles. Parmi les nombreuses techniques de clustering, deux retiennent plus particulièrement notre attention : le clustering par réseaux de neurones artificiels, et les approches d'optimisation globale pour le clustering d'origine bio-inspirée telles que les algorithmes génétiques, les colonies de fourmis ou les essaims particuliers (Wan, et al., 2012).

Les réseaux de neurones ont rapidement été exploités que ce soit pour des tâches de classification ou de clustering. Dans le cadre du clustering, deux caractéristiques des réseaux de neurones sont particulièrement importante (Jain, et al., 1999) :

- les réseaux de neurones traitent des données numériques ce qui implique des données quantitatives,
- les réseaux de neurones peuvent apprendre leurs paramètres on-line ce qui leurs confère des capacités d'adaptation.

Parmi ces approches, on peut citer les réseaux de neurones compétitifs (Jain & Mao, 1996), les cartes auto-organisatrices de Kohonen (Kohonen, 1989) ou encore le modèle "Adaptive Resonance Theory" (Carpenter & Grossberg, 1990). De nombreuses variantes de ces algorithmes ont depuis été proposées (Du, 2010).

La deuxième famille d'outils qui nous intéresse concerne les approches bio-inspirées. Ces approches plus récentes ont été appliquées avec succès dans divers domaines comme la reconnaissance d'images (Sanchez & Hernandez, 2012), le diagnostic (Zhao & Yan, 2013)...

Leurs principales caractéristiques sont d'effectuer une recherche globale de l'optimum et de pouvoir prendre en compte une évolution on-line.

Ces outils sont utilisés avec succès aussi bien avec des objectifs de classification (AlGeddawy & ElMaraghy, 2011) ou de clustering (Anzanello & Fogliatto, 2011) pour regrouper des produits en familles en vue de la reconfiguration des systèmes de production. Abdi et Labib (Abdi & Labib, 2004) ont noté que le regroupement des produits en groupes et familles sont un point clef pour mettre en œuvre un processus de fabrication flexible et reconfigurable. Ces objectifs de flexibilité et de reconfigurabilité des modèles sont incontournables pour modéliser des systèmes éco-techniques et correspondent aux besoins actuels des entreprises qui doivent être capable d'évoluer et de s'adapter aux changements. Les deux approches (réseaux de neurones et bio-inspirée) du fait de leurs capacités d'apprentissage on-line à partir des données, sont donc des outils bien adaptés pour

répondre à cette problématique. Les principaux points clefs à prendre en compte sont les points durs classiques du clustering :

- quelle mesure de distance doit être utilisée en fonction du domaine considéré,
- combien de classes ou regroupements doivent être faits.

De nombreuses mesures de distances ont été proposées, la plus répandue étant la distance Euclidienne (Jain, et al., 1999). La détermination automatique du nombre de classes est le problème le plus important pour le clustering. Généralement, les algorithmes de clustering sont utilisés avec plusieurs valeurs de nombres de classes et divers critères (critère d'Akiake, bayes information criterion...) sont ensuite utilisés pour déterminer le nombre de classes optimal en fonction des perturbations aléatoires (Jain, 2010).

#### ***IV.3.2 Mixité des concepts***

Le dernier point à aborder concerne le comportement de la communauté d'agents. Nous avons vu au paragraphe IV.2 que l'on pouvait incorporer de la connaissance et des informations dans les agents de base en exploitant les données. La difficulté va être de faire le même travail pour les niveaux suivants dont les agents ont été construits à l'aide des techniques de clustering précédemment décrites. A chaque niveau se pose la question de savoir quelles sont les données à exploiter pour construire quelle connaissance ou informations à incorporer dans les agents du niveau considéré.

Pour construire cette connaissance, nous disposons de l'ensemble des données produits qui constituent la part principale de la masse de données, mais également de données machines telles que les temps de changements de série inhérents aux ordres de fabrications, des informations de maintenance, des informations relative à la qualité de pièces..., ou encore des données en provenance de l'ERP.

Si l'on s'intéresse maintenant au niveau suivant, on constate que les entrées de ce niveau sont susceptibles d'être des données (agrégées ou non) en provenance directe de l'atelier, mais aussi les informations et connaissances élaborées au niveau de base. On peut prendre l'exemple d'un compteur de pièces qui, comparé à un seuil, va définir la taille d'un lot, dans un premier temps, plusieurs lots correspondant à un ordre de fabrication. L'objectif est donc de structurer les données en fonction du niveau considéré. La difficulté cette fois-ci va être double :

- 
- déterminer quelles données, mais aussi quelles informations et quelles connaissances du niveau de base sont nécessaires pour l'élaboration des connaissances à intégrer aux agents du niveau immédiatement supérieur,
  - définir un outil permettant d'agréger des entités de natures différentes (données, informations, connaissances) pour construire la connaissance désirée.

La connaissance désirée par les agents des niveaux supérieurs pourra alors être construite de manière récursive en exploitant la stratégie précédemment décrite.

Pour prendre un exemple toujours au niveau lot, on devra prendre en compte des données en provenance de l'ERP (dates de début au plus tôt, date de début au plus tard...), de données en provenance des produits (date de fin...) et ces informations traitées au niveau lot permettront de déterminer un taux de pièces par unité de temps qui constituera une entrée au niveau supérieur (ordre de fabrication) pour déterminer un taux de satisfaction client, par exemple.

Nous nous trouvons donc à nouveau face à un problème d'apprentissage à partir de données de nature différentes. Pour répondre à cette difficulté, les techniques décrites au paragraphe IV.2 peuvent à nouveau être exploitées. Une difficulté supplémentaire peut cependant apparaître si l'on souhaite rendre certaines informations plus importantes que d'autres dans l'élaboration de la connaissance. Dans ce cas, il sera nécessaire de mettre en œuvre une technique de pondération des différentes données.

### ***IV.3.3 Proposition d'un méta-modèle générique***

Dans les paragraphes précédents nous avons vu qu'il était possible de faire émerger une organisation globale d'un système de pilotage à partir des données. Ceci nous conduit à proposer un modèle de traitement unique basé sur les approches d'apprentissage et des techniques bio-inspirées. Ce modèle de traitement conduit au méta-modèle récursif applicable à tous les niveaux de traitement et décrit par la Figure 31.

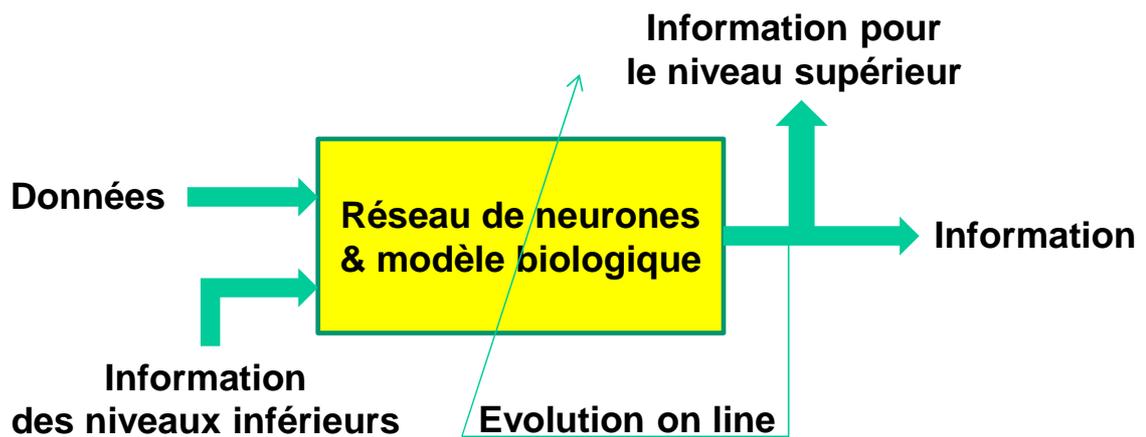


Figure 31. Méta-modèle d'extraction de connaissance

Ce méta modèle prend en entrée les données en provenance du terrain mais également les informations et connaissances raffinées au niveau inférieur pour construire la connaissance à incorporer dans les agents du niveau considéré ainsi que les informations à destination du niveau supérieur. Ceci conduit à une structure récursive unique basée sur un méta-modèle unique dont les paramètres et la structure doivent être capables d'évoluer en ligne en exploitant les données collectées au cours de la production. Une telle approche permet de prendre en compte l'évolution de l'environnement dans lequel se trouve le système de pilotage considéré pour soit permettre de détecter une dérive et la corriger, soit au contraire adapter le système de pilotage à cette évolution.

#### IV.4 LES SYSTEMES CONTROLES PAR LE PRODUIT

Les outils et approches proposés dans les deux précédant paragraphes pourront être exploités dans le cadre plus restreint des systèmes contrôlés par le produit.

En effet, comme nous l'avons vu au paragraphe III.2, et ce, quel que soit l'architecture de modèle employée, un point crucial concerne la communication de connaissances et d'informations entre entités de base que ce soit des agents, holons, fractals, ou cellules. Ainsi, par exemple, dans PROSA, nous trouvons une communauté d'holons ordres, produits, ressources ou staffs qui doivent s'informer mutuellement et négocier entre eux afin d'atteindre un objectif global. Dans FrMS, ce sont des BFU qui vont chercher à atteindre des objectifs individuels et qui vont pour cela, avoir besoin de communiquer et

négocier avec d'autres BFU. Dans VSM, les agents du quadrant I doivent embarquer de la connaissance afin d'être à même de communiquer et d'informer les autres agents.

Les questions que l'on doit se poser sont :

- Quelles connaissances doivent être embarquées par chacune des entités ?
- Comment élaborer et maintenir cette connaissance ?

La réponse à la première question se fait principalement par interview d'experts et par extraction et modélisation des règles métiers pouvant être opérées en exploitant, par exemple, la méthode NIAM (Habrias, 1998).

L'élaboration et le maintien de cette connaissance peut se faire par retour d'expérience et extraction de connaissances à partir des données. La question que l'on doit se poser alors est :

- Comment effectuer ce retour d'expérience ?

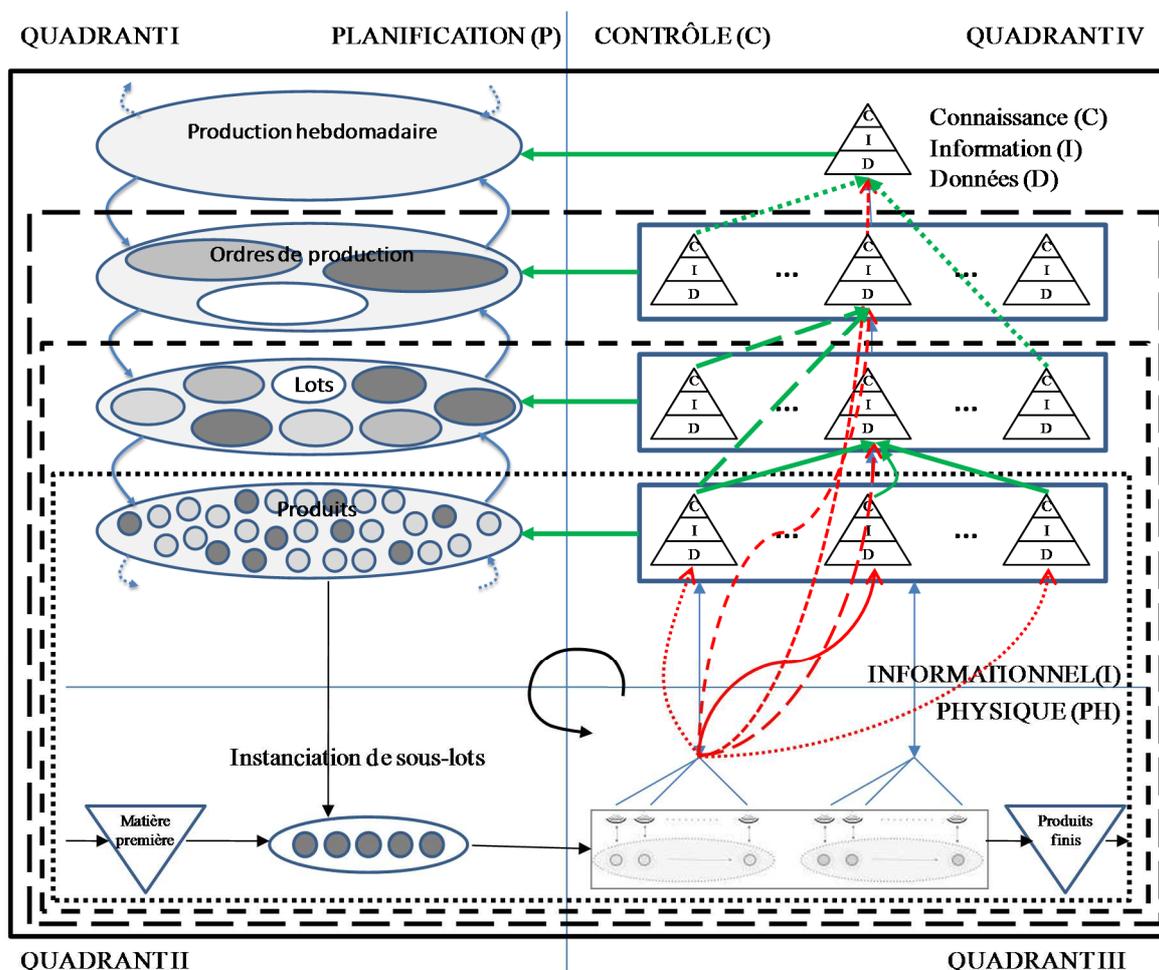


Figure 32. Flux de données dans un système hybride de planification et pilotage de la production

Si l'on s'intéresse à la Figure 32, on peut noter les flèches vertes (épaisses) connectant les éléments du quadrant IV aux éléments du quadrant I. Ces connexions représentent la

---

connaissance que l'on va intégrer dans les agents. De facto, une première tâche va consister à définir quels sont les besoins en connaissance des agents des différents niveaux. Intuitivement, on comprend bien qu'un agent produit n'aura pas les mêmes besoins qu'un agent ordre de production. Encore faut-il définir précisément ces besoins pour pouvoir y répondre.

Les besoins des différents agents définis, il reste à déterminer comment construire la connaissance nécessaire. Pour cela, il peut être intéressant de considérer la décomposition récursive du système de la Figure 32. Le premier niveau, que l'on pourra appeler niveau produit, est encadré en pointillé et intègre les deux quadrants physiques (II et III) et la couche produit des deux quadrants informatiques (I et IV). Le deuxième niveau (niveau lot) intègre le premier niveau et lui adjoint la couche lots des deux quadrants informatiques (I et IV). Il est encadré en tiret cours. Le troisième niveau (niveau ordre de fabrication) intègre le niveau lot et la couche ordre de fabrication des deux quadrants informatiques (I et IV) Il est encadré avec des tirets longs. Enfin, le quatrième et dernier niveau (niveau production hebdomadaire) associe au niveau ordre de fabrication la couche production hebdomadaire. Il est encadré en trait plein. Cette décomposition se rapproche des notions de systèmes, sous-systèmes et sur-systèmes de l'ingénierie système (système de systèmes) qui peut être exploitée pour définir les interfaces entre les différents niveaux.

Les flèches rouges de la Figure 32 représentent les flux de données en provenance de l'atelier quand les flèches vertes représentent les flux d'informations ou de connaissance. Dans un souci de clarté de la figure, seuls quelques exemples de flux de données et d'informations et connaissances sont représentés.

Considérons tout d'abord le niveau produit. Ce niveau présente la particularité de ne prendre en entrée que des données en provenance de l'atelier. Le processus de création de la connaissance à intégrer aux agents va donc être un processus relativement classique de transformation des données en information et d'extraction de connaissance de cette information. La principale difficulté va consister à déterminer quelles données sont nécessaires pour élaborer le besoin de connaissance de l'agent produit. On peut remarquer que ces données peuvent être de nature continue ou discrète, déterministe ou stochastique et l'outil d'élaboration de la connaissance devra prendre en compte la nature hybride des données. Pour répondre à ce problème, on pourra appliquer les outils et approches proposés au paragraphe IV.2.

---

Si l'on s'intéresse maintenant au niveau suivant, on constate que les entrées de ce niveau sont susceptibles d'être des données (agrégées ou non) en provenance directe de l'atelier, mais aussi les informations et connaissances élaborées au niveau produit. La difficulté cette fois-ci va être double :

- déterminer quelles données, mais aussi quelles informations et quelles connaissances du niveau produit sont nécessaires pour l'élaboration des connaissances à intégrer aux agents du niveau lot,
- définir un outil permettant d'agréger des entités de natures différentes (données, information, connaissance) pour construire la connaissance désirée.

La connaissance désirée par les agents des niveaux supérieurs pourra alors être construite de manière récursive en exploitant la stratégie précédemment décrite.

Par ailleurs et comme expliqué précédemment, dans l'architecture VSM, Herrera (Herrera, 2011) s'est appuyé sur une structure de type MRP<sup>2</sup> pour organiser les agents du quadrant I. Si une telle organisation peut avoir un sens à un instant donné de la vie de l'entreprise modélisée, d'autres organisations peuvent et doivent pouvoir émerger de manière à rendre l'entreprise agile et adaptable à son environnement. Les approches purement hétérarchiques des architectures PROSA ou FrMS par exemple autorisent plus facilement une telle agilité. Encore faut-il disposer des procédures aptes à détecter et mettre en œuvre un tel besoin d'évolution.

Pour répondre à ces différents problèmes, on pourra appliquer les outils et approches proposés au paragraphe IV.3.

#### *IV.5 PROJET PEDAGOGIQUE : OUVERTURE D'UN DEPARTEMENT*

##### *PACKAGING EMBALLAGE CONDITIONNEMENT*

L'IUT Epinal Hubert Curien mène actuellement une réflexion concernant l'ouverture d'un nouveau département de DUT qui devra fonctionner par alternance. Le DUT Packaging Emballage Conditionnement (PEC) est une formation qui n'est actuellement pas proposée dans la région Lorraine et ce en dépit du grand nombre de sociétés implantées sur son territoire et travaillant dans ce domaine.

Je pilote actuellement cette réflexion avec pour objectif une ouverture de ce département PEC par alternance à l'horizon de la rentrée de septembre 2015.

## V FIGURES ET REFERENCES



## V.1 LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Répartition des enseignements - a - selon le type (CM – TD – TP) - b - selon le domaine	14
Figure 2 Exemples de diagrammes fondamentaux	41
Figure 3 L'architecture du perceptron multicouche	43
Figure 4 Le neurone $i$ de la couche cachée	43
Figure 5 Définition de la région admissible	47
Figure 6 Architecture du réseau de surveillance	48
Figure 7 Discrétisation spatiale d'un segment de route	60
Figure 8 Modèle macroscopique RdPCV d'un segment de route	61
Figure 9 Portion d'autoroute à modéliser	62
Figure 10 Modèle macroscopique RdPCV de la section d'autoroute	62
Figure 11 Modélisation microscopique RdPCV	63
Figure 12 Carrefour à feux isolé	66
Figure 13 Modèle RdPT microscopique du carrefour	67
Figure 14 Modèle RdPH macroscopique du carrefour	68
Figure 15. Les différents niveaux de décision des systèmes MRP <sup>2</sup>	78
Figure 16. Répartition des données et des traitements entre les holons de PROSA (Van Brussel, et al., 1998)	85
Figure 17. Système hybride de planification et pilotage de la production	89
Figure 18. Principe du modèle réduit	94
Figure 19. Élaboration d'un modèle réduit	96
Figure 20. Prise en compte de données discrètes –approche multi modèles	97
Figure 21. Algorithme de pruning séquentiel NNSP	103
Figure 22. Système Kanban - Liens entre les différents étages	117
Figure 23. Modèle RdPT pour un système kanban à 2 étages	117
Figure 24. Modèle RdPCV d'un système Kanban à deux étages	119
Figure 25. Modèle RdPCV réduit d'un système Kanban à deux étages	119
Figure 26. RdPCV convertisseur de commande	121
Figure 27. Organisation du département ISET	126
Figure 28. Représentation d'un système éco-technique	127
Figure 29. Structure du MGD	130
Figure 30. Détermination de l'organisation globale	134
Figure 31. Méta-modèle d'extraction de connaissance	139
Figure 32. Flux de données dans un système hybride de planification et pilotage de la production	140



---

## V.2 BIBLIOGRAPHIE

Abdi, M. R. & Labib, A. W., 2004. Grouping and selecting products: the design key of reconfigurable manufacturing systems (RMSs). *International Journal of Production Research*, pp. 521-546.

Aldanondo, M. & Mercé, C., 1991. Hierarchical data model for scheduling and monitoring in manufacturing systems. In: Doumeingts, G., Brown, J., Tomljanovitch, M. (Eds.), *Computer Applications in Production and Engineering: Integration aspects*. Elsevier Sciences Publishers, Holland, pp. 477-484.

AlGeddawy, T. & ElMaraghy, H., 2011. A model for co-evolution in manufacturing based on biological analogy. *International Journal of Production Research*, pp. 4415-4435.

Amrah, A., Zerhouni, N. & El Moudni, A., 1996. *Constrained state feedback control of a class of discrete event systems modeled by continuous Petri nets*. 4th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision ICARCV'96, Singapore, pp. 979-984.

Anon., s.d.

Anzanello, M. J. & Fogliatto, F. S., 2011. Selecting the best clustering variables for grouping mass-customized products involving workers' learning. *International Journal of Production Economics*, pp. 268-276.

Askin, R. & Standridge, C., 1993. *Modeling and analysis of Petri nets*. New-York: John Wiley & Sons.

Aujac, G., 2001. *Eratosthène de Cyrène, le pionnier de la géographie : sa mesure de la circonférence terrestre*. Paris: Ed. du CTHS.

Babiceanu, R. & Chen, F., 2006. Developpement and applications of holonic manufacturing systems: a survey. *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 111-131.

Barbosa, J. & Leitao, P., 2010. *Modelling and simulating self-organizing agent-based manufacturing systems*. 36th annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society IECON'10, Phoenix, pp. 2702-2709.

Bartlett, P. L., 1996. *For valid generalization, the size of the weights is more important than the size of the network*. Neural Information Processing Systems, Denver, USA, pp. 134-140.

- 
- Beer, S., 1984. The viable system model: Its provenance, development, methodology and pathology. *Journal of the Operational Research Society*, pp. 7-25.
- Bloch, G., Ouladsine, M. & Thomas, P., 1995. On line fault diagnosis of dynamic systems via robust parameter estimation. *Control Engineering Practice*, 3(12), pp. 1709-1717.
- Bloch, G., Theilliol, D. & Thomas, P., 1994. *Robust identification of non-linear SISO systems with neural networks*. 10th IFAC Symposium on System Identification SYSID'94, Copenhagen, Denmark, pp. 483-488.
- Bloch, G., Theilliol, D. & Thomas, P., 1994. *Simultaneous detection, location, and identification of faults for dynamics systems*. IFAC Symposium on Fault detection, supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS'94, Espoo, Finland, pp. 59-63.
- Bloch, G., Thomas, P., Ouladsine, M. & Lairi, M., 1996. *On several outlier-robust training rules of neural networks for identification of non-linear systems*. 8th International Conference on Neural Networks and their Applications NEURAP'95/96, Marseille, France, pp. 13-19.
- Bloch, G., Thomas, P. & Theilliol, D., 1997. Accomodation to outliers in identification of non-linear SISO systems with neural networks. *Neurocomputing*, 14(1), pp. 85-99.
- Bohez, E. L. J., 2004. A new generic timed Petri net model for design and performance analysis of a dual Kanban FMS. *International Journal of Production Research*, pp. 719-740.
- Bondavalli, A., Mura, I. & Trivedi, K., 1999. Dependability modeling and sensitivity analysis of scheduled maintenance system. *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 7-23.
- Bourrel, E. & Henn, V., 2002. *Mixing micro and macro representations of traffic flow: a first theoretical step*. 9th meeting of the Euro Working Group on Transportation, Bari, pp. 610-616.
- Brams, G., 1983. *Réseaux de Petri, vol. I et II*. Paris: Masson.
- Branicky, M., Borkar, V. & Mitter, S., 1994. *A unified framework for hybrid control*. Int. Conf. on Decision and Control, Lake Buena Vista (U.S.A), pp. 4228-4234.
- Brooks, R. J. & Tobias, A. M., 2000. Simplification in the simulation of manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, pp. 1009-1027.
- Buisson, C. & Lebacque, J., 1997. Le modèle de trafic STRADA. *Actes INRETS*, pp. 69-90.

---

Carpenter, G. & Grossberg, S., 1990. ART3: Hierarchical search using chemical transmitters in self-organizing pattern recognition architectures. *Neural Networks*, pp. 129-152.

Cawley, G. C. & Talbot, N. L. C., 2007. Preventing over fitting during model selection via Bayesian regularization of the hyper parameters. *Journal of Machine Learning Research*, pp. 841-861.

Chretienne, P., 1983. *Les réseaux de Petri temporisés*, Université de Paris VI: Thèse.

Cohen, S., 1990. *Ingénierie du trafic routier : Eléments de théorie du trafic et applications*. Paris: Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.

Costanza, J., 1996. *The quantum leap in speed to market*. s.l.:Institut of Technology, Inc..

Cottrell, M. et al., 1995. Neural modelling for time series: a statistical stepwise method for weight elimination. *IEEE Transaction on Neural Networks*, pp. 1355-1264.

Cousquer, E., 1998. *La fabuleuse histoire des nombres*. Paris: Diderot Arts et Sciences.

Créput, J. C., 2008. *Hybridation de métaheuristiques pour la résolution distribuée de problèmes d'optimisation spatialisés*, Université de Bourgogne: Rapport d'HdR.

Cybenko, G., 1989. Approximation by superposition of a sigmoïdal function. *Mathematics of Control Signals and Systems*, pp. 303-314.

Daganzo, C. F., 1995. Requiem for second-order fluid approximations of traffic flow. *Transportation Reseach part B*, pp. 277-286.

David, R. & Alla, H., 1992. *Du grafcet aux réseaux de Petri*. Paris: Hermès.

David, R. & Alla, H., 1997. *Du grafcet aux réseaux de Petri*. Paris, France: Hermès.

Demongodin, I., 1994. *Les réseaux de Petri lots : modélisation des systèmes de production à haute cadence en régime transitoire*, Université de Montpellier II: s.n.

Di Mascolo, M., Frein, Y., Dallery, Y. & David, R., 1991. A unified modelling of Kanban systems using Petri nets. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, pp. 275-307.

Diaz, M., 2001. *Les réseaux de Petri : Modèles fondamentaux*. Paris, France: Hermès.

Donat, R., 2009. *Modélisation de la fiabilité et de la maintenance par modèles graphiques probabilistes*, INSA de Rouen: Thèse.

Doumeingts, G., Vallespir, B., Darricau, D. & Roboam, M., 1987. Design methodology for advanced manufacturing systems. *Computers in Industry*.

---

Dreyfus, G. et al., 2002. *Réseaux de neurones : Méthodologies et applications*. Paris, France: Editions Eyrolles.

Drucker, H., 2002. Effect of pruning and early stopping on performance of a boosting ensemble. *Computational Statistics and data analysis*, pp. 393-406.

Du, K. L., 2010. Clustering: A neural network approach. *Neural Networks*, pp. 89-107.

Egilmez, K. & Sharifnia, A., 1994. *Optimal control of a manufacturing system based on a novel continuous flow model with minimal WIP requirement*. International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIM'94, Albany, USA, pp. 113-118.

El Haouzi, H., 2008. *Approche méthodologique pour l'intégration des systèmes contrôlés par le produit dans un environnement de juste-à-temps: application à l'entreprise Trane*, Nancy Université: Thèse.

Elloumi, N., 1996. *Modélisation et commande du trafic sur un corridor: application de la méthode LP*, Université Paris XI Orsay: thèse.

Engelbrecht, A. P., 2001. A new pruning heuristic based on variance analysis of sensitivity information. *IEEE transactions on Neural Networks*, pp. 1386-1399.

Ferber, J., 1997. *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. Paris: Dunod.

Fisher, K., 1999. Agent-based design of holonic manufacturing systems. *Robotics and Autonomous Systems*, pp. 3-13.

Frantz, F. K., 1995. *a taxonomy of model abstraction techniques*. Winter Simulation Conference WSC'95, Washington, USA.

Funahashi, K., 1989. On the approximate realization of continuous mapping by neural networks. *Neural Networks*, pp. 183-192.

Ghabri, M., 1995. *Sur la modélisation et la commande des systèmes flexibles de production*, Grenoble, France: INPG.

Giua, A., Piccaluga, A. & Seatzu, C., 2002. Firing rate optimization of cyclic event graphs by token allocation. *Automatica*, pp. 91-103.

Goldratt, E. & Cox, J., 1992. *The goal: A process of ongoing improvement, 2nd revised edition*. Great Barrington, USA: North River Press.

Gu, W., Tang, D., Zheng, K. & Wang, L., 2011. A neuroendocrine-inspired bionic manufacturing system. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, pp. 275-293.

Habrias, H., 1998. *Le modèle relationnel binaire. Méthode I.A. (NIAM)*. Paris: Editions Eyrolles.

Hanzalek, Z., 2003. *Continuous Petri nets and polytopes*. IEEE conference on Systems Man and Cybernetics SMC'03, Washington, USA, pp. 1513-1520.

Hassibi, B., Stork, D. G. & Wolff, G. J., 1993. *Optimal brain surgeon and general network pruning*. IEEE International Conference on Neural Networks, San Francisco, USA, pp. 293-299.

Heidemann, D., 1996. *A queueing theory approach to speed flow density relationship*. 13th Symp. Int. Conf. Transp. and Traffic Theory, Lyon, pp. 103-118.

Herman, R. & Potts, R., 1959. *Single lane traffic theory and experiment*. Proc. Symp. on Theory of Traffic Flow, s.n., pp. 147-157.

Herrera, C., 2011. *Proposition d'un cadrage générique de modélisation et de simulation de planifications logistiques dans un contexte de décisions partiellement distribuées*, Nancy Université: Thèse.

Hirasawa, K., Ohbayashi, M., Sakai, S. & Hu, J., 1998. Learning Petri network and its application to nonlinear system control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 781-789.

Ho, Y. C., 1987. Performance evaluation and perturbation analysis of discrete event dynamics systems. *IEEE Transaction on Automatic Control*, pp. 563-572.

Hung, Y. F. & Leachman, R. C., 1999. Reduced simulation models of wafer fabrication facilities. *International Journal of Production Research*, pp. 2685-2701.

Hwang, J. S., Hsieh, S. & Chou, H. C., 1999. A petri net based structure for AS/RS operation modeling. *International Journal of Production Research*, pp. 3323-3346.

IBM, 2006. *The toxic terabyte*. [En ligne] Available at: [http://www-03.ibm.com/systems/resources/systems\\_storage\\_solutions\\_pdf\\_toxic\\_tb.pdf](http://www-03.ibm.com/systems/resources/systems_storage_solutions_pdf_toxic_tb.pdf)

Innis, G. S. & Rexstad, E., 1983. Simulation model simplification techniques. *Simulation*, pp. 7-15.

Jain, A. & Dubes, R., 1988. *Algorithms for clustering data*. Upper Saddle River: Prentice-Hall.

Jain, A., Jain, P. K. & Singh, I. P., 2006. Performance modelling of FMS with flexible process plans - A Petri net approach. *International Journal of Simulation Modelling*, pp. 101-113.

Jain, A. K., 2010. Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letter*, pp. 651-666.

- 
- Jain, A. K. & Mao, J., 1996. Artificial neural networks: A tutorial. *IEEE Computer*, pp. 31-44.
- Jain, A. K., Murty, M. N. & Flynn, P. J., 1999. Data clustering: a review. *Journal ACM Computing Surveys*, pp. 264-323.
- Jensen, K., 1994. *Coloured Petri nets. Basic concepts, analysis method and practical use*. Berlin: Springer Verlag.
- Jiang, R., Wu, Q. & Zhu, Z. J., 2002. A new continuum model for traffic flow and numerical tests. *Transportation Research B*, pp. 405-419.
- Kleijnen, J. P. C. & Sargent, R. G., 2000. A methodology for fitting and validating metamodels in simulation. *European Journal of Operational Research*, pp. 14-29.
- Kleijnen, J. P. C. & Smits, M. T., 2003. Performance metrics in supply chain management. *Journal of Operational Research Society*, pp. 507-714.
- Klein, T. & Thomas, A., 2009. Opportunities to reconsider decision making processes due to Auto-ID. *International Journal of Production Economics*, pp. 99-111.
- Kohonen, T., 1989. *Self-Organization and Associative Memory*. New-York: Springer-Verlag.
- Krafcik, J., 1988. Triumph of the lean production system. *Sloan Management Review*, pp. 41-52.
- Lauret, P., Fock, E. & Mara, T. A., 2006. A node pruning algorithm based on a Fourier amplitude sensitivity test method. *IEEE Transaction on Neural Networks*, pp. 273-293.
- Law, A. M. & Kelton, W. D., 2000. *Simulation modelling and analysis, third edition*. Boston, USA: McGraw-Hill.
- Le Bail, J., Alla, H. & David, R., 1991. *Hybrid Petri nets*. Proceeding of the European Control Conference ECC'91, Grenoble, pp. 1472-1477.
- Le Roux, A. Y., 2002. *Sur la modélisation du trafic routier au niveau des carrefours*. Ecole d'automne Modélisation Mathématique du trafic automobile, Paris.
- Lebacque, J. P., 1996. *The Godunov Scheme and what it mean for first order traffic flow models*. 13th Symposium International Conference Transportation and Traffic Theory, Lyon, pp. 647-677.
- Lefebvre, D., 1999. Feedback control designs of manufacturing systems modelled by continuous Petri nets. *International Journal of Systems Science*, pp. 591-600.

---

Lefebvre, D., 2000. *Contributions à la modélisation des systèmes dynamiques à événements discrets pour la commande et la surveillance*, Université de Technologie de Belfort Montbéliard: Rapport d'HdR.

Lefebvre, D., 2002. *Sensibilité structurelle des réseaux de Petri*. 4th International Conference on Applied Mathematics and Engineering Sciences CIMASI'02, Casablanca.

Lefebvre, D., Leclercq, E., Druaux, F. & Thomas, P., 2003. *Source and sink transitions controllers for continuous Petri nets: a gradient-based approach*. IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems ADHS'03, Saint-Malo, France, pp. 229-234.

Lefebvre, D., Leclercq, E., Druaux, F. & Thomas, P., 2004. *Commande des flux dans les réseaux de Petri continus par propagation du gradient*. Conférence Internationale Francophone d'Automatique CIFA'04, Douz, Tunisie.

Lefebvre, D., Leclercq, E., Druaux, F. & Thomas, P., 2013. Gradient based controllers for continuous Petri nets. *International Journal of System Science*, pp. [http://hal.archives-ouvertes.fr/index.php?action\\_todo=search&view\\_this\\_doc=hal-00569926&version=1&halsid=pbfnm1k93hd13e4ugo5l7uq0v3](http://hal.archives-ouvertes.fr/index.php?action_todo=search&view_this_doc=hal-00569926&version=1&halsid=pbfnm1k93hd13e4ugo5l7uq0v3).

Lefebvre, D. & Thomas, P., 2001. *Fuzzy granular systems for the modelling of road traffic networks*. IEEE Systems Man and Cybernetics SMC'01, Tucson, USA, pp. 1329-1334.

Lefebvre, D. & Thomas, P., 2002. *Identification par phase des fréquences maximales de franchissement dans les réseaux de Petri continus à vitesse variable*. 4th International Conference on Applied Mathematics and Engineering Sciences CIMASI'02, Casablanca, Maroc.

Lefebvre, D. & Thomas, P., 2005. Parameter estimation for timed and continuous Petri nets: application to the identification and monitoring of hybrid systems. *Cybernetics and Systems*, 36(3), pp. 217-250.

Lefebvre, D., Thomas, P., Leclercq, E. & Druaux, F., 2005. *Flow control for continuous Petri net models of HDS: Stability issues*. 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic.

Lefebvre, D. et al., 2000. *A model-based traffic monitoring by means of neural networks*. 39th IEEE Conference on Decision and Control CDC'00, Sydney, Australia, pp. 3541-3546.

Leitao, P., 2004. *An agile and adaptive holonic architecture for manufacturing control*, University of Porto: Thèse.

---

Leitao, P., 2009. Agent-based distributed manufacturing control: a state-of-the-art survey. *Engineering Application of Artificial Intelligence*, pp. 979-991.

Leung, C. S., Wong, K. W., Sum, P. F. & Chan, L. W., 2001. A pruning method for the recursive least square algorithm. *Neural Networks*, pp. 147-174.

Levenberg, K., 1944. A method for the solution of certain nonlinear problem in least squares. *Quart. Appl. Math.*, pp. 164-168.

Lightill, M. J. & Whitham, G. B., 1955. *On kinematic waves, II: a theory of traffic flow on roads*. Proceedings of the Royal Society, s.n., pp. 317-345.

Li, J., Meerkov, S. M. & Zhang, L., 2009. *Production systems engineering: problems, solutions, and applications*. 13th IFAC symposium on Information Control Problem in Manufacturing INCOM'09, Moscou, Russie, pp. 1-14.

Ljung, L., 1987. *System identification: Theory for the user*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.

Ma, L. & Khorasani, K., 2004. New training strategies for constructive neural networks with application to regression problems. *Neural Networks*, pp. 589-609.

Mandelbrot, B., 2010. *Les objets fractals : Forme, hasard et dimension*. Paris: Flammarion.

Marquardt, D., 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Appl. Math.*, pp. 431-441.

Maturana, F., Shen, W. & Norrie, D., 1999. MetaMorph: an adaptive agent-based architecture for intelligent manufacturing. *international Journal of Production Research*, pp. 2159-2173.

McFarlane, D. et al., 2003. Auto ID systems and intelligent manufacturing control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, pp. 365-376.

Mendel, J. G., 1907. Recherche sur des hybrides végétaux. *Bulletin Scientifique de la France et de Belgique*, pp. 371-419.

Messai, N. et al., 2003. *Feed-forward and RTRL neural networks for the macroscopic traffic flow prediction and monitoring: the potential of each other*. 6th IEEE International Conference on Intelligent Transportation System ITSC'03, Shangai, China, pp. 199-204.

Messai, N., Thomas, P., Lefebvre, D. & Créput, J.-C., 2001. *Modélisation macroscopique du trafic sur un carrefour urbain : approches neuronales et estimation paramétrique*. 3ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation MOSIM'01, Troyes, France, pp. 401-407.

---

Messai, N., Thomas, P., Lefebvre, D. & El Moudni, A., 2001. *Structure and weight initialization of feed-forward networks for traffic flow-density relationships*. IEEE International Joint Conference on Neural Network IJCNN'01, Washington, USA, pp. 2056-2064.

Messai, N., Thomas, P., Lefebvre, D. & El Moudni, A., 2002. *A neural network approach for freeway traffic flow prediction*. IEEE International Conference on Control Applications CCA'02, Glasgow, UK, pp. 984-989.

Messai, N., Thomas, P., Lefebvre, D. & El Moudni, A., 2002. Optimal neural networks architectures for the flow-density relationships of traffic models. *Mathematics and Computers in Simulation*, Volume 60, pp. 401-409.

Messai, N., Thomas, P., Lefebvre, D. & El Moudni, A., 2003. *Crossroad monitoring based on macroscopic first order neural network model*. 5ème congrès pluridisciplinaire Qualité et Sécurité de Fonctionnement QUALITA'03, Nancy, France, pp. 548-556.

Messai, N., Thomas, P., Lefebvre, D. & El Moudni, A., 2005. Neural networks for local monitoring of traffic magnetic sensors. *Control Engineering Practice*, 13(1), pp. 67-80.

Messai, N. et al., 2005. *Modeling and monitoring of hybrid dynamic systems with feed-forward neural networks: application to two tanks hydraulic system*. Workshop on Advanced Control and Diagnosis ACD'05, Mulhouse, France.

Messai, N., Thomas, P., Lefebvre, D. & Riera, B., 2006. *Fault detection for HDS by means of neural networks: Application to two tanks hydraulic system*. 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes SAFEPROCESS'06, Beijing, China, pp. 1039-1044.

Meyer, G., Främling, K. & Holmström, J., 2009. Intelligent products : a survey. *Computers in Industry*, pp. 134-148.

Miller, A. J., 1965. *A computer control system for traffic networks*. 2nd Int. Symp. Theory of Road Traffic Flow, Paris, pp. 200-220.

Mohanty, R. P., Kumar, S. & Tiwari, M. K., 2003. Expert enhanced coloured fuzzy Petri net models of traditional, flexible and reconfigurable Kanban system. *Production Planning and Control*, pp. 459-477.

Mohler, R. R., 1973. *Bilinear control process*. New-York, USA: Academic Press.

Monden, Y., 1981. How Toyota shortened supply lot production time, waiting time and conveyance time. *Industrial Engineering*, pp. 22-30.

Monteil, J., Billot, R. & El Faouzi, N., 2013. Véhicules coopératifs pour une gestion dynamique du trafic : approches théoriques et simulation. *Recherche Transports Sécurité*, Volume 29, pp. 47-58.

Moore, K. E. & Gupta, S. M., 1999. Stochastic colored Petri net (SCPN) models of traditional and flexible Kanban systems. *International Journal of Production Research*, pp. 2135-2158.

Morel, G., Panetto, H., Zaremba, M. & Mayer, F., 2003. Manufacturing enterprise control and management system engineering: paradigms and open issues. *Annual Reviews in Control*, pp. 199-209.

Morin, J., 1984. SIMAUT : un programme de simulation du trafic autoroutier. *Recherche Transport Sécurité*, pp. 15-20.

Murata, T., 1989. Petri nets: properties, analysis and applications. *Proceedings IEEE*, pp. 541-580.

Nagel, K., 1998. Simplified cellular automaton model for city traffic. *Physical review E*, pp. 1286-1295.

Nakashima, K. & Gupta, S., 2003. Performance evaluation of a supplier management system with stochastic variability. *International Journal Manufacturing Technology and Management*, pp. 28-37.

Natkin, S., 1980. *Les réseaux de Petri stochastiques et leurs applications à l'évaluation des systèmes informatiques*, Paris: Thèse CNAM.

Noyel, M. et al., 2013. *Implantation of an on-line quality process monitoring*. 5th International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM'13, Rabat, Maroc.

Noyel, M. et al., 2013. *Improving production process performance thanks to neuronal analysis*. 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing System IMS'13, Sao Paulo, Brésil, pp. May, 22-24.

Panayiotou, C. G. & Cassandras, C. G., 1999. Optimisation of Kanban based manufacturing systems. *Automatica*, pp. 1521-1533.

Papagiorgiou, M. et al., 2003. Review of road traffic control strategies. *Proc. of the IEEE*, pp. 2043-2067.

Patriti, V., 1998. *Systèmes de pilotage auto-organisé et gammes distribuées : méthode de conception et application à une machine outil*, Université Henri Poincaré Nancy I: Thèse.

---

Payne, H. J., 1971. *Models of freeway traffic and control, simulation*. Concil Proceedings, s.n., pp. 51-56.

Petri, C., 1966. *Communication with automata*, Princeton, NJ: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=AD0630125>.

Reed, R., 1993. Pruning algorithms - a survey. *IEEE transactions on Neural Networks*, pp. 740-747.

Rivals, I. & Personnaz, L., 2003. Neural network construction and selection in nonlinear modelling. *IEEE transaction on Neural Networks*, pp. 804-819.

Ryu, K. & Jung, M., 2003. Agent-based fractal architecture and modelling for developing distributed manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, pp. 4233-4255.

Sanchez, C. C. & Hernandez, M. H., 2012. *Bio-inspired architecture for clustering into natural and non-natural facial expressions*. s.l.:<http://dx.doi.org/10.5772/48508>.

Setiono, R., 2001. Feedforward neural network construction using cross validation. *Neural Computation*, pp. 2865-2877.

Setiono, R. & Leow, W. K., 2000. *Pruned neural networks for regression*. 6th Pacific RIM International Conference on Artificial Intelligence PRICAI'00, Melbourne, Australie, pp. 500-509.

Shahabudeen, P. & Sivakumar, G. D., 2007. Algorithm for the design of single-stage adaptive Kanban system. *Computers & Industrial Engineering*, pp. 800-820.

Silva, M. & Recalde, L., 2003. *On fluidification of Petri nets: from discrete to hybrid and continuous models*. IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems ADHS'03, Saint-Malo, France, pp. 9-20.

Siouris, G., 1996. *Optimal control and estimation theory*. New-York: John Wiley.

Sugimori, Y., Fusunoki, K., Cho, F. & Uchikawa, S., 1977. Toyota production system materialization of Just-in-Time and respect for human system. *International Journal of Production Research*, pp. 553-564.

Suri, R. & Fu, B. R., 1994. On using continuous flow lines to model discrete production lines. *Discrete Event Dynamic Systems*, pp. 129-169.

Tang, H. S., Xue, S. T., Chen, R. & Sato, T., 2007. H filtering method for neural network training and pruning. *Journal of Computing in Civil Engineering*, pp. 47-58.

Technology, I., s.d. *USB-DUX*. [En ligne] Available at: <http://www.linux-usb-daq.co.uk/>

- 
- Tennant, G., 2001. *SIX SIGMA: SPC and TQM in manufacturing and services*. s.l.:Gower Publishing, Ltd..
- Tharumarajah, A., 1996. Comparison of the bionic, fractal and holonic manufacturing system concepts. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, pp. 217-226.
- Thierry, C., Thomas, A. & Bel, G., 2008. *Simulation for supply chain management*. Londres, UK: John Wiley & sons.
- Thomas, A. & Charpentier, P., 2005. Reducing simulation models for scheduling manufacturing facilities. *European Journal of Operational Research*, Volume 16, pp. 111-125.
- Thomas, A. et al., 2009. Architecture de systèmes contrôlés par le produit pour un environnement de juste à temps. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, pp. 513-535.
- Thomas, P., 2002. Book review: Fault detection and diagnosis in engineering systems by J.J. Gertler. *Control Engineering Practice*, 10(3), pp. 1037-1038.
- Thomas, P., 2002. Book review: System design through MATLAB, control toolbox and simulink by K.K. Singh and G. Agnihotri. *Automatica*, 38(3), pp. 563-564.
- Thomas, P. & Bloch, G., 1996. *From batch to recursive outlier-robust identification of non-linear dynamic systems with neural networks*. IEEE International Conference on Neural Networks ICNN'96, Washington, USA, pp. 178-183.
- Thomas, P. & Bloch, G., 1997. *Initialization of one hidden layer feedforward neural networks for non-linear system identification*. 15th IMACS World Congress on Scientific Computation, Modelling and Applied Mathematics WC'97, Berlin, Germany, pp. 295-300.
- Thomas, P. & Bloch, G., 1998. *Robust Pruning for multilayer perceptrons*. IMACS/IEEE Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications CESA'98, Nabeul-Hammamet, Tunisie, pp. 17-22.
- Thomas, P., Bloch, G. & Humbert, C., 1998. *A multistage on-line learning rule for multilayer neural network*. European Symposium on Artificial Neural Networks ESANN'98, Bruges, Belgium, pp. 279-284.
- Thomas, P., Bloch, G., Sirou, F. & Eustache, V., 1999. Neural modeling of an induction furnace using robust learning criteria. *Journal of Integrated Computer Aided Engineering*, 6(1), pp. 15-25.

---

Thomas, P. & Lefebvre, D., 2002. Fault detection and isolation in non-linear systems by using oversized neural networks. *Mathematics and Computers in Simulation*, Volume 60, pp. 181-192.

Thomas, P. & Lefebvre, D., 2005. *Traffic flow monitoring based on parameters estimation with continuous Petri net models*. 17th IMACS World Congress WC'05, Paris, France.

Thomas, P. & Suhner, M.-C., 2014. A new multilayer perceptron pruning algorithm for classification and regression applications. *Neural Processing Letters*, Volume DOI 10.1007/s11063-014-9366-5.

Thomas, P., Suhner, M.-C., Meutelet, B. & Brachotte, G., 2004. *Quality monitoring of a high pressure die casting process based on bayesian and neural networks*. 11th IFAC Symposium on Automation in Mining Mineral and Metal Processing MMM'04, Nancy, France.

Thomas, P. & Thomas, A., 2008. *Elagage d'un perceptron multicouches : utilisation de l'analyse de la variance de la sensibilité des paramètres*. 5ème Conférence Internationale Francophone d'Automatique CIFA'08, Bucarest, Roumanie.

Thomas, P. & Thomas, A., 2008. *Expérimentation de la réduction d'un modèle de simulation par réseau de neurones : cas d'une scierie*. 7ème Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes MOSIM'08, Paris, France.

Thomas, P. & Thomas, A., 2008. *Sélection de la structure d'un perceptron multicouches pour la réduction d'un modèle de simulation d'une scierie*. 5ème Conférence Internationale Francophone d'Automatique CIFA'08, Bucarest, Roumanie.

Thomas, P. & Thomas, A., 2009. *How deals with discrete data for the reduction of simulation models using neural network*. 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM'09, Moscou, Russie.

Thomas, P. & Thomas, A., 2011. Multilayer perceptron for simulation models reduction: Application to a sawmill workshop. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, pp. 646-657.

Thomas, P., Thomas, A. & Belmokhtar, S., 2010. *Pilotage d'une boucle kanban modélisée par réseau de Petri*. 8ème IFAC Conférence Internationale de Modélisation et Simulation MOSIM'10, Hammamet, Tunisie.

---

Thomas, P., Thomas, A. & Belmokhtar, S., 2011. *Petri net control of a kanban loop*. International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM'11, Metz, France.

Thomas, P., Thomas, A. & Suhner, M.-C., 2011. A neural network for the reduction of a product driven system emulation model. *Production Planning and Control*, pp. 767-781.

Thomas, P., Thomas, A. & Suhner, M. C., 2009. *Reduction of product driven system emulation models based on neural network: impact of discrete data*. International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM'09, Montréal, Canada.

Tolba, C., 2004. *Contribution à l'utilisation des réseaux de Petri pour la modélisation et la régulation du trafic urbain et interurbain*, Belfort: Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

Tolba, C. L. D., Thomas, P. & El Moudni, A., 2003. *Performances evaluation of the traffic control in a single crossroad by Petri nets*. IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation EFTA'03, Lisbon, Portugal, pp. 157-160.

Tolba, C., Lefebvre, D., Thomas, P. & El moudni, A., 2005. Approche multi modèles pour la commande des feux de trafic. *e-STA*, 2(2).

Tolba, C., Lefebvre, D., Thomas, P. & Abdellah, E. M., 2003. *Hybrid petri nets for traffic signal control*. 3rd International Conference on Transport System Telematics TST'03, Katowice, Poland.

Tolba, C., Lefebvre, D., Thomas, P. & El Moudni, A., 2001. *Continuous Petri nets models for the analysis of traffic urban networks*. IEEE Systems Man and Cybernetics SMC'01, Tucson, USA, pp. 1323-1328.

Tolba, C., Lefebvre, D., Thomas, P. & El Moudni, A., 2002. *Continuous Petri nets for the microscopic modeling of traffic flow*. Summer Computer Simulation Conference SCSC'02, San Diego, USA.

Tolba, C., Lefebvre, D., Thomas, P. & El Moudni, A., 2005. Continuous and timed Petri nets for the macroscopic and microscopic traffic flow control. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13(5), pp. 407-436.

Tolba, C., Lefebvre, D., Thomas, P. & El Moudni, A., 2008. Commande des feux de signalisation par réseaux de Petri Hybrides. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 42(5), pp. 579-612.

Tolba, C., Thomas, P., Lefebvre, D. & El Moudni, A., 2005. *Crossroad traffic lights control based on hybrid Petri net model*. 17th IMACS World Congress WC'05, Paris, France.

Trentesaux, D., 2002. *Pilotage hétérarchique des systèmes de production*, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis: rapport d'HdR.

Tseng, T. Y., Ho, T. F. & Li, R. K., 1999. Mixing macro and micro flowtime estimation model: wafer fabrication. *International Journal of production Research* , pp. 2447-2461.

Ueda, K., 1992. *A concept for bionic manufacturing systems based on DNA-type information*. s.l., North-Holland Publishing Co, pp. 853-863.

Ullah, H. & Bohez, E. L. J., 2008. A Petri net model for the design and evaluation of a flexible assembly system. *Assembly Automation*, pp. 325-339.

Van Brussel, H. et al., 1998. Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. *Computers in Industry*, pp. 255-274.

Van Dyke Parunak, H., 1987. Manufacturing experience with the contract net. *Distributed artificial intelligence*, pp. 285-310.

Van Dyke Parunak, H., Baker, A. & Clark, S., 1997. *The AARIA agent architecture: an example of requirements-driven agent-based system design*. AGENTS'97 first international conference on automous agents, New-York, USA.

Vollman, T., Berry, W. & Whybark, D., 1997. *Manufacturing planning and control systems*. New-York: McGraw-Hill.

Vrba, P., Macurek, F. & Marik, V., 2008. Using radio frequency identification in agent-based control systems for industrial applications. *Engineering Application of Artificial Intelligence*, pp. 331-342.

Waldner, J., 1992. *Principles of computer-Integrated manufacturing*. New-York: John Wiley & Sons.

Wang, H., List, G. & Di Cesare, F., 1993. *Modelling and evaluation of traffic signal control using timed Petri nets*. CESA, Le Touquet, pp. 180-185.

Wan, M., Wang, C., Li, L. & Yang, Y., 2012. Chaotic ant swarn approach for data clusering. *Applied Soft Computing*, pp. 2387-2393.

Warnecke, H. & Hüser, M., 1993. *The fractal company*. Berlin: Springer Verlag.

Webster, F., 1958. *Traffic signal setting*, London: Great Britain road research laboratory.

Wooldridge, M. & Jennings, N., 1995. Agent theories architectures, and langages: a survey. *Intelligent Agent*, pp. 1-39.

Wunsch, D. & Bratukhin, A., 2007. *Multilevel order decomposition in distributed production*. 12th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation EFTA'07, Patras, pp. 872-879.

Xu, J. & Ho, D. W. C., 2006. A new training and pruning algorithm based on node dependence and Jacobian rank deficiency. *Neurocomputing*, pp. 544-558.

Yoshikawa, H., 1995. Manufacturing and the 21st century-intelligent manufacturing systems and the renaissance of the manufacturing industry. *Technological Forecasting and Social Change*, pp. 195-213.

Zeigler, B. P., 1976. *Theory of modeling and simulation*. New-York, USA: Wiley.

Zeng, X. & Yeung, D. S., 2006. Hidden neuron pruning of multilayer perceptrons using a quantified sensitivity measure. *Neurocomputing* , pp. 825-837.

Zerhouni, N., Ferney, M. & El Moudni, A., 1995. Transient analysis of Petri nets using continuous Petri nets. *Mathematics and Computers in Simulation*, pp. 635-639.

Zhao, D. & Yan, J., 2013. Ant colony clusterig analysis based intelligent fault diagnosis method and its application to rotating machinery. *Pattern Analysis Application*, pp. 19-29.

Zighed, D. A. & Rakotomalala, R., 2000. *Graphes d'induction et data mining*. Paris: Hermès.

Zwingelstein, G., 1995. *Diagnostic des défaillances - théorie et pratique pour les systèmes industriels*. Paris: Hermès.