



## Open Archive Toulouse Archive Ouverte

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an author's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/25151>

**To cite this version:**

Desforges, Xavier *Méthodes et outils pour la réactivité et la proactivité des systèmes et des organisations.* (2019) [HDR]

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)



## Habilitation à Diriger des Recherches

Délivrée par l'Institut National Polytechnique de Toulouse

---

---

Soutenue le 08 juillet 2019 par

Xavier DESFORGES

### Méthodes et outils pour la réactivité et la proactivité des systèmes et des organisations

---

---

#### JURY :

Président :

**M. Bruno VALLESPER**      Professeur des Universités  
Université de Bordeaux

Rapporteurs :

**Mme. Mireille BAYART**      Professeur des Universités  
Université de Lille

**M. Damien TRENTESAUX**      Professeur des Universités  
UPHF - Valenciennes

**M. Noureddine ZERHOUNI**      Professeur des Universités  
ENSMM - Besançon

Examineurs :

**M. Michel COMBACAU**      Professeur des Universités  
Université Paul Sabatier - Toulouse

**M. Bernard ARCHIMEDE**      Professeur des Universités  
ENI de Tarbes

Ce mémoire a été préparé au Laboratoire Génie de Production – EA 1905  
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes



# Remerciements

---

Je remercie avec beaucoup de sincérité les rapporteurs de ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Madame Mireille Bayart, Professeur des Universités à l'Université de Lille, Monsieur Damien Trentesaux, Professeur des Universités à l'Université Polytechnique Hauts de France, et Monsieur Noureddine Zerhouni, Professeur des Universités à l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques pour la caution qu'ils apportent à ce travail.

Je tiens également à remercier les examinateurs, Monsieur Bruno Vallespir, Professeur des Universités à l'Université de Bordeaux, Monsieur Michel Combacau, Professeur des Universités à l'Université Paul Sabatier et Monsieur Bernard Archimède, Professeur des Universités à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, correspondant de ce travail avec qui je collabore régulièrement et qui m'a accordé sa confiance tant pour les encadrements que pour participer aux montages de projets comme l'a aussi fait Laurent Geneste que je remercie également. Je conserve, pour ces mêmes raisons, une pensée pour Philippe Charbonnaud.

Ce mémoire est le fruit de mes années de travail en tant que doctorant, attaché temporaire d'enseignement et de recherche et Maître de conférences à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes. Je souhaite témoigner ici de toute ma sympathie à ceux avec qui j'ai collaboré durant ces années mais aussi ceux qui m'ont entouré et que j'ai plaisir à côtoyer.

Enfin, je remercie ma famille chaleureusement. Delphine, Valentine et Eloïse, merci de m'avoir aidé et encouragé de votre amour. Cela a été la plus précieuse assistance pendant ces mois dédiés à la rédaction.

*A Ginette et Guy.*

# Sommaire

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Curriculum vitae.....</b>   | <b>3</b>  |
| <i>Etat Civil.....</i>   | 5         |
| <i>Cursus universitaire .....</i>  | 5         |
| <i>Parcours professionnel.....</i>   | 6         |
| <i>Autres informations.....</i>  | 6         |
| <b>Synthèse des activités de recherche et d'enseignement .....</b>   | <b>7</b>  |
| <i>Activités de recherche.....</i>   | 9         |
| Direction / encadrement .....  | 9         |
| Activités collectives et administratives en relation avec la recherche .....   | 10        |
| Participations à projets avec financements .....   | 11        |
| Communications / Publications .....  | 13        |
| Lectures critiques .....   | 16        |
| Autres informations .....  | 16        |
| <i>Activités d'enseignement.....</i>   | 17        |
| Informatique.....  | 17        |
| Génie industriel.....  | 17        |
| Ingénierie des systèmes .....  | 17        |
| Mécatronique .....   | 18        |
| Services d'enseignement détaillés de 2017-2018 et 2018-2019.....   | 18        |
| Activités collectives et administratives liées à l'enseignement et à la vie de l'établissement.....  | 19        |
| <b>Parcours recherche .....</b>  | <b>21</b> |
| <i>Introduction .....</i>  | 23        |
| 1 <i>Surveillance en fabrication mécanique mise en œuvre par capteur intelligent .....</i>   | 27        |
| 1.1    Surveillance de l'usinage.....  | 28        |
| 1.2    Surveillance des machines-outils.....   | 31        |
| 1.3    Estimation des paramètres physiques des machines-outils.....  | 32        |
| 1.4    Application du concept de capteur intelligent .....   | 41        |
| 1.5    Conclusion sur la surveillance en fabrication mécanique mise en œuvre par capteur intelligent ..  | 47        |
| 2 <i>Conduite et surveillance distribuées des machines-outils et de l'usinage par la mise en œuvre de capteurs/actionneurs intelligents.....</i> | 49        |
| 2.1    Intégration d'instruments intelligents dans les MOCN .....  | 50        |
| 2.2    Surveillance de la machine-outil et contrôle adaptatif en effort de coupe.....  | 52        |
| 2.3    Stratégie de surveillance et de conduite distribuées des MOCN et de l'usinage .....   | 54        |
| 2.4    Cadre de conception d'architectures de MOCN mettant en œuvre des capteurs/actionneurs intelligents .....                                  | 59        |
| 2.5    Conclusion sur la conduite et la surveillance distribuées des machines-outils et de l'usinage .....                                       | 65        |
| 3 <i>Modélisation d'un retour d'expérience cognitif.....</i>   | 67        |
| 3.1    Modélisation de l'expérience .....  | 68        |
| 3.2    Exploitation des expériences.....   | 75        |
| 3.3    Conclusion sur le retour d'expérience cognitif.....   | 88        |
| 4 <i>Evaluation de la santé des systèmes techniques.....</i>   | 90        |
| 4.1    Architecture de diagnostic et de pronostic distribuée de systèmes multi-composants .....  | 91        |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 4.2 | Proposition d'inférences prenant en compte les incertitudes des pronostics locaux.....  | 102 |
| 4.3 | Conclusion et Axes de développement .....   | 117 |
| 5   | <i>Planification conjointe de la production et de la maintenance basée sur l'évaluation de la santé des ressources techniques</i> ..... | 119 |
| 5.1 | Modélisation des données à traiter .....  | 120 |
| 5.2 | Heuristique de planification conjointe .....  | 121 |
| 5.3 | Suite des travaux.....  | 125 |
|     | <i>Conclusion</i> .....   | 126 |
|     | <i>Projet de recherche</i> .....  | 127 |
|     | Contributions à l'ingénierie des systèmes .....   | 128 |
|     | Contributions à "l'industrie 4.0" .....   | 130 |
|     | <i>Bibliographie</i> .....  | 132 |

---

## Synthèse des activités de recherche et d'enseignement

---





# Activités de recherche

## Direction / encadrement

### Thèses de Doctorat

[ThBéler]

Cédric Béler. « Modélisation générique d'un retour d'expérience cognitif, Application à la prévention des risques ». Université de Toulouse, Ecole Doctorale Systèmes, spécialité Systèmes Industriels, soutenue le 14 novembre 2008. Directeur de Thèse : Laurent Geneste (PR) (50%), co-encadrant : Xavier Desforges (50%). Financement : projet SUP (Sécurité Urgences Pyrénées) projet INTERREG IIIA France-Espagne.  
Thèse débutée en octobre 2004.  
Devenu Maître de conférences à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes.

[ThDiévert]

Mickaël Diévert. « Architectures de diagnostic et de pronostic distribuées de systèmes techniques complexes de grande dimension ». Université de Toulouse, Ecole Doctorale Systèmes, spécialité Systèmes Industriels, soutenue le 03 décembre 2010. Directeur de Thèse : Philippe Charbonnaud (PR) (50%), co-encadrant : Xavier Desforges (50%). Financement : Airbus France projet Archistic.  
Thèse débutée en octobre 2006.  
Devenu Ingénieur R&T chez Aéroconseil puis chez Alten.

[ThLeMaitre]

Esteban Le Maitre Gonzalez. « Définition d'une fonction de pronostic des systèmes techniques complexes prenant en compte les incertitudes à partir des pronostics de leurs composants ». Université de Toulouse, Ecole Doctorale Systèmes, spécialité Systèmes Industriels, soutenue le 24 janvier 2019. Directeur de Thèse : Bernard Archimède (PR) (50%), co-directeur : Xavier Desforges (50%). Financement : Instituto Tecnológico de Costa Rica et Campus France.  
Thèse débutée en janvier 2015.  
Esteban était enseignant à l'Instituto Tecnológico de Costa Rica et a retrouvé son poste d'enseignant. Il peut désormais participer à des encadrements de travaux de recherche.

[ThBencheikh]

Ghita Bencheikh. « Planification conjointe des activités de production et de maintenance en fonction de l'état de santé des ressources ». Université de Toulouse, Ecole Doctorale Systèmes, spécialité Systèmes Industriels, soutenance prévue fin 2019. Directeur de Thèse : Xavier Desforges (dérogation de l'INP-Toulouse) (50%), co-directeur : Agnès Letouzey (50%). Financement : allocation MESR attribuée par l'Ecole Doctorale Systèmes.  
Thèse débutée en octobre 2016.

### M2(R) / DEA

Cyrille Langlois. « Etude et définition de mécanismes d'apprentissage basés sur l'expérience : application à l'aide au secours en montagne ». Mémoire de DEA Systèmes Automatiques, Informatiques et Décisionnels, Institut National Polytechnique de Toulouse – Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes 2002 (Co-encadrement à 50% avec Laurent Geneste (PR)).  
Cédric Béler. « Eléments de modélisation d'un dispositif de retour d'expérience orienté prévention des risques : application à la sécurité en montagne ». Mémoire de DEA Systèmes Automatiques, Informatiques et Décisionnels, Institut National Polytechnique de Toulouse – Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes 2004 (Co-encadrement à 50% avec Laurent Geneste (PR)).  
Racem Mellouli. « Amélioration de performances de la maintenance des équipements industriels obtenues par la mise en œuvre de nouvelles technologies de l'information et de la communication ».

Mémoire de DEA Systèmes Automatiques, Informatiques et Décisionnels, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2004 (Encadrement à 100%).

Mickaël Diévert. « Concepts, méthodes et outils de pronostic de défaillance appliqués aux systèmes dynamiques en présence de dégradation ». Mémoire de Master 2 Systèmes Automatiques, Informatiques et Décisionnels, Institut National Polytechnique de Toulouse – Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, 2006 (Co-encadrement à 33% avec Philippe Charbonnaud (PR) et Bernard Archimède (MCF)).

Kui Yu. « Distributed Dynamic Health Assessment System for Technical Complex Systems ». Mémoire de Master of Engineering of software engineering, Harbin Institute of Technology / Université Bordeaux I, 2012 (Encadrement à 100%).

Hao Guan. « Performances Evaluation of Interoperability in peer to peer processes ». Mémoire de Master of Engineering of software engineering, Harbin Institute of Technology / Université Bordeaux I, 2015 (Co-encadrement à 50% avec Agnès Letouzey (MCF)).

Massako De Almeida Hirashita. « Contribution à la capitalisation et recherche de « design patterns » à partir d'exigences en Ingénierie Systèmes » Mémoire de fin d'études, diplôme d'ingénieur ENIT, 2016 (Co-encadrement à 50% avec Bernard Archimède (PR))

## Activités collectives et administratives en relation avec la recherche

Animation du thème D3 depuis septembre 2016

Le thème D3 (Décision Dynamique Distribuée) est l'un des thèmes de l'équipe DIDS (Décision et Interopérabilité pour la Dynamique des Systèmes) du Laboratoire Génie de Production (LGP) équipe d'accueil 1905. Dans ce thème, les activités consistent à développer des algorithmes de décision décentralisés voire totalement distribués pour des systèmes localisés, étendus ou répartis mais suivis ou supervisés. Six permanents, partageant compétences et outils, contribuent à ce thème sur les activités :

- performances, (re)planification et interopérabilité,
- diagnostic, pronostic et conduite,
- sémantique, connaissances et ontologie.

L'animation consiste à mener des réunions, présenter les développements sur les différentes activités et établir les bilans pour les instances d'évaluation.

Correspondant de l'équipe DIDS auprès du CD-EDSYS depuis janvier 2017

Le Comité de Direction (CD) de l'Ecole Doctorale SYStèmes (EDSYS) est constitué, en plus du Directeur d'EDSYS, des représentants des équipes des laboratoires dans lesquelles des chercheurs ou des enseignants-chercheurs sont rattachés. Le CD est réuni tous les mois et traite notamment :

- de l'attribution des allocations de recherche aux sujets de thèse allouées à EDSYS,
- de la définition de la procédure d'attribution des allocations de recherche,
- de la définition des modalités du suivi des doctorants,
- de l'attribution d'aides à la mobilité internationale,
- du rattachement des chercheurs et enseignants-chercheurs,
- ...

## Participations à projets avec financements

### Projet SUP (2003-2006)

Partenariat : France : MEDES, CETIR, Météofrance, ENIT-LGP ; Espagne : Salud, ITA, UDL, FRP, SAS

Equipe de projet LGP : Laurent Geneste, Xavier Desforges, Cédric Béler

Le projet SUP (Sécurité Urgences Pyrénées) était un projet Interreg III A France – Espagne. Ce projet comportait un premier volet « intervention » dont le but était de favoriser l'interopérabilité des moyens et méthodes d'assistance aux victimes des organismes chargés des secours sur la chaîne des Pyrénées et un second volet « prévention » sur lequel est intervenu l'ENIT à partir de spécifications du CETIR (Centre Européen des Technologies de l'Information en milieu Rural). Le CETIR en charge du développement d'un système d'information, basé sur un système d'information géographique, pour la prévention des risques a spécifié au LGP par l'intermédiaire de l'ENIT les besoins d'une fonctionnalité de retour d'expérience permettant :

- de saisir des événements (des accidents) géo-localisés et contextualisés partiellement automatiquement comme les conditions météo du moment,
- de permettre à des experts (principalement des secouristes) de saisir une analyse des événements portant sur les facteurs ayant conduit à l'événement,
- de permettre à des usagers professionnels d'avoir un indicateur relatif au risque en fonction de lieux, de trajets, d'activités (travaux forestiers, randonnées...), de conditions météorologiques prévues...

Les travaux de thèse de Cédric Béler ont porté sur les verrous scientifiques de cette fonctionnalité de retour d'expérience.

### Réseau d'excellence I\*PROMS (2004-2009)

Partenariat : Université de Cardiff (Coordinateur), nombreux établissements d'enseignements supérieurs et de recherche européens dont l'ENIT ainsi que des partenaires industriels et des fondations.

Equipe projet du LGP : l'équipe projet rassemblait de nombreux membres de l'équipe PA (Production Automatisée) sous l'administration de Bernard Grabot. Lors du montage du projet, j'ai contribué à l'écriture de paragraphes.

Le projet I\*PROMS (Innovative Production Machines and Systems) était un réseau d'excellence issu du programme européen FP6-NMP, (Nanotechnologies and nanosciences, knowledge-based multifunctional materials and new production processes and devices, ID 500273 - [https://cordis.europa.eu/project/rcn/74343\\_en.html](https://cordis.europa.eu/project/rcn/74343_en.html)) portant sur de nouvelles technologies et de nouveaux équipements de production et leur intégration à l'usine du futur et la création d'une « communauté du savoir » sur les technologies de la production.

Dans le cadre ce projet, nous avons développé des architectures innovantes de surveillance et de contrôle pour les machines-outils basées sur les systèmes multi-agents et les instruments intelligents.

### Projet Archistic (2006-2009)

Partenariat : Airbus France, LAAS, LGP

Equipe de projet LGP : Philippe Charbonnaud, Xavier Desforges, Mickaël Diévert, Bernard Archimède.

Le projet Archistic est issu d'un appel à projet d'Airbus France portant sur la définition d'architectures pour le diagnostic et le pronostic distribués auquel le LAAS (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes) et l'ENIT, par l'intermédiaire du LGP, ont répondu. J'ai contribué à la réponse à l'appel d'offre en étroite collaboration avec Philippe Charbonnaud et Bernard Archimède. Dans ce projet, notre rôle a consisté en la définition d'architectures distribuées pour le diagnostic et le pronostic afin de définir « l'état de santé » du système technique, un avion de ligne, en exploitant au maximum les connaissances issues des phases de conception du système afin de permettre la mise œuvre des préconisations du CBM (Condition Based Maintenance) et du PHM (Prognostics and Health Management) pour les besoins de maintenance mais aussi de fournir une aide à la décision quant à la planification des tâches de production à assigner au système.

Les travaux de thèse de Mickaël Diévar ont porté sur les verrous scientifiques liés à la définition de l'état de santé d'un système technique constitué d'un grand nombre et d'une grande variété de composants.

#### Projet RICAT+ (2009-2011)

Partenariat : Espagne : Instituto Tecnológico de Aragon ; France : ENIT

Equipe de projet LGP : Jean-Yves Fourquet, Frédéric Rotella, Francisco Carrillo, Xavier Desforges, Jean Denape, Jean-Yves Paris

Le projet RICAT+ est un projet POCTEFA (Programme Opérationnel de Coopération Territoriale Espagne-France-Andorre) qui visait à renforcer l'intégration transfrontalière en valorisant les complémentarités sur le plan des activités économiques, de l'innovation et du capital humain notamment en consolidant le réseau de recherche coopérative transpyrénéen : appliqué à la mécatronique et à la tribologie. J'ai été sollicité pour la rédaction des éléments concernant la mécatronique. Il s'agissait principalement de diffusion voire de transfert de résultats de recherche tant en mécatronique qu'en tribologie vers des petites et moyennes entreprises du secteur mécanique.

Dans ce cadre, j'ai réalisé des présentations sur les fonctionnalités et les intérêts de l'emploi de l'instrumentation intelligente et sur une méthode de mise en œuvre d'une telle instrumentation dans des architectures de commande et surveillance distribuée permettant, notamment, la mise en œuvre de nouvelles fonctionnalités (surveillance du processus, surveillance de la machine, accommodation de la commande à ces états) avec une illustration portant sur les architectures de contrôle des machines-outils à commande numérique.

#### Projet TECCAS (2012-2014)

Partenariat : Espagne : Instituto Tecnológico de Aragon, Asociacion de Industrias de Alimentación de Aragón ; France : Chambre de Commerce et d'Industrie des Hautes-Pyrénées, ENIT-LGP

Equipe de projet LGP : Bernard Archimède, Agnès Letouzey, Mohammad Ali Memom, Xavier Desforges

Le projet TECCAS est un projet POCTEFA dont le but était de favoriser la collaboration entre les acteurs de la chaîne alimentaire dans l'espace transfrontalier par l'amélioration de l'efficacité de l'ensemble des opérations logistiques. Pour cela, le projet comportait deux parties. Ma contribution au montage du projet a porté sur la définition de *work packages* en collaboration avec Bernard Archimède et Agnès Letouzey. Une première partie visait à assurer la traçabilité des marchandises avec, pour certaines, des contraintes de péremption et de respect de la chaîne du froid. Une seconde partie consistait à établir une gestion collaborative entre acteurs de la chaîne d'approvisionnement permettant d'en améliorer les performances, notamment en réduisant à la fois risque de rupture de stock et le stock global. Pour cela, une plateforme informatique permettant d'intégrer les différents services nécessaires a fait l'objet de développements. Une architecture distribuée fonctionnant selon le modèle SCEP (Superviseur, Clients,

Environnement, Producteurs) a été définie lors des travaux de thèse de Mohammad Ali Memom après la définition d'une architecture physique basée sur de la prestation de type 3PL (Third Part Logistics) organisant les tournées de ramassage, les tournées de livraison et gérant les stocks entre fournisseurs et clients.

## Communications / Publications

Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture répertoriées par l'HCERES ou dans les bases de données internationales

- [A1] **X. Desforges**, A. Habbadi, L. Geneste, F. Soler. Distributed Machining Control and Monitoring Using Smart Sensors/Actuators. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 15, 2004, ISSN 0956-5515, pp. 39-53, doi:10.1023/B:JIMS.0000010074.22952.de
- [A2] **X. Desforges**, B. Archimède. Multi-agent Framework based on Smart Sensors/Actuators for Machine Tools Control and Monitoring. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 19, 2006, ISSN 0952-1976, pp. 641-655, doi:10.1016/j.engappai.2006.03.006
- [A3] **X. Desforges**, A. Habbadi, B. Archimède. Design methodology for smart actuator services for machine tool and machining control and monitoring. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 27, 2011, ISSN 0736-5845, pp. 963-976, doi:10.1016/j.rcim.2011.03.004
- [A4] **X. Desforges**, M. Diévert, B. Archimède. A prognostic function for complex systems to support production and maintenance co-operative planning based on an extension of object oriented Bayesian networks. *Computers in Industry*, vol. 86, 2017, ISSN 0166-3615, pp. 34-51, doi:10.1016/j.compind.2017.01.002
- [A5] E. Le Maître González, **X. Desforges**, B. Archimède. Assessment method of the multicomponent systems future ability to achieve productive tasks from local prognoses. *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 180, 2018, ISSN 0951-8320, pp. 403-415, doi: 10.1016/j.ress.2018.08.005
- [A6] B.B. Traore, B. Kamsu Foguem, F. Tangaran, **X. Desforges**. Service-Oriented Computing for intelligent train maintenance. *Enterprise Information Systems*, vol. 13, 2019, ISSN 1751-7575, pp. 63-86, doi:10.1080/17517575.2018.1501818

Communications avec actes dans un congrès international

- [C1] **X. Desforges**, A. Habbadi, D. Noyès. « Machine-tool and Machining Monitoring Using Smart Sensors ». 3<sup>ème</sup> congrès franco-japonais et 1<sup>er</sup> congrès Europe-Asie MECATRONICS'96, Besançon, France, 01-03 octobre 1996, pp. 697-703.
- [C2] **X. Desforges**, A. Habbadi. « A Neural Network for Parameter Estimation of a DC Motor for Feed-Drives ». *Lecture Notes in Computer Science* n°1327, actes de ICANN'97, 7th International Conference on Artificial Neural Networks, Lausanne, Suisse, 08-10 octobre 1997, Ed. Springer, ISSN 0302-9743 pp. 867-872.
- [C3] **X. Desforges**, A. Habbadi. « Intelligent Monitoring of a Feed-Drive ». CESA'98 IMACS Multiconference, Computational Engineering in Systems Applications, Nabeul-Hammamet, Tunisie, 01-04 avril 1998, pp. 557-562.
- [C4] A. Habbadi, **X. Desforges**, D. Noyès. « Data Validation for a Feed-Drive Monitoring: a Case Study ». SDEMPED'99 The IEEE international Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Gijón, Espagne, 01-03 septembre 1999, pp. 131-136.
- [C5] G. Dessenin, **X. Desforges**. « Imprécision des trajectoires en usinage très grande vitesse ». IDMMME'2000 3rd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Montréal, Canada, 16-19 mai 2000.
- [C6] A. Habbadi, **X. Desforges**, G. Dessenin. « Integrated machine tool monitoring via physical parameters estimation using smart sensor concept ». IDMMME'2000 3rd International Conference

on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Montréal, Canada, 16-19 mai 2000.

- [C7] **X. Desforges**, L. Geneste, A. Habbadi, F. Soler. « Distributed Smart Sensors and Actuators for Machining Control and Monitoring ». SICICA'2000 4th IFAC Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications, Buenos Aires, Argentine, 13-15 septembre 2000.
- [C8] **X. Desforges**, A. Habbadi, G. Dessen. « Contribution to Multiagent Machine tool Control: Intelligent Sensors for Feeddrive Monitoring ». 1st IFAC Conference on Mechatronic Systems, Darmstadt, Allemagne, 18-20 septembre 2000.
- [C9] C. Béler, **X. Desforges**. « Experience feedback, from cases to knowledge ». 4th IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics MCPL'2007 , Sibiu, Roumanie, 27-30 septembre 2007, vol. 2, pp. 43-48.
- [C10] M. Diévert, Ph. Charbonnaud, **X. Desforges**. « Applicative architecture for embedded distributed technical diagnosis ». ACD'2009 7th Workshop on Advanced Control and Diagnosis, Zielona Gora, Pologne, 19-20 novembre 2009.
- [C11] M. Diévert, Ph. Charbonnaud, **X. Desforges**. « An embedded distributed tool for transportation systems health assessment ». ERTS<sup>2</sup> Embedded Real Time Software and Systems, 5th International Congress & Exhibition, Toulouse, France, 19-21 mai 2010.
- [C12] M. Diévert, Ph. Charbonnaud, **X. Desforges**. « Distributed embedded health assessment of networked instruments ». LSS 2010 12th IFAC Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications, Villeneuve d'Ascq, France, 12-14 juillet 2010.
- [C13] **X. Desforges**, M. Diévert, Ph. Charbonnaud, B. Archimède. « A distributed Architecture to implement a Prognostic Function for Complex Systems ». PHME 2012 European Conference of Prognostics and Health Management Society 2012, Dresden, Allemagne, 3-5 juillet 2012.
- [C14] E. Lemaitre Gonzalez, **X. Desforges**, B. Archimède. « Towards a generic prognostic function of technical multi-component systems taking into account the uncertainties of the predictions of their components ». CoDIT 2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, Barcelone, Espagne, 5-7 avril 2017.
- [C15] G. Bencheikh, A. Letouzey, **X. Desforges**. « Process for joint scheduling based on health assessment of technical resources ». Safeprocess 2018, 10th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Technical Processes, Varsovie, Pologne, 29-31 août 2018.
- [C16] G. Bencheikh, A. Letouzey, **X. Desforges**. « Scheduling of production and maintenance activities using multi-agents system ». ETFA 2018, IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Turin, Italie, 4-7 september 2018.

#### Communications avec actes dans un congrès national

- [c1] **X. Desforges**, A. Habbadi, D. Noyès. « Specification of Smart Sensors for Machine-tool and Machining Monitoring ». 4<sup>ème</sup> congrès 2AO-96, Automatique Assistée par Ordinateur, Noisy-le-Grand, France, 28 et 29 novembre 1996, pp. 75-82.
- [c2] G. Dessen, **X. Desforges**. « Relationship between speed and accuracy in high speed machining ». II International Seminar on Improving Machine Tool Performance, La Baule, France, 03-05 juillet 2000.
- [c3] **X. Desforges**, A. Habbadi, G. Dessen. « Trajectory Shortcoming Prediction from Physical Parameter Estimation ». II International Seminar on Improving Machine Tool Performance, La Baule, France, 03-05 juillet 2000.
- [c4] **X. Desforges**, L. Geneste, A. Habbadi. « Towards Multiagent Architectures for improving Machining Control and Monitoring ». II International Seminar on Improving Machine Tool Performance, La Baule, France, 03-05 juillet 2000.

- [c5] C. Béler, P. Clermont, **X. Desforges**, L. Geneste. « Générateur d'applications de Retour d'Expérience : une mise en œuvre du raisonnement à partir de cas dans les systèmes socio-techniques ». 14<sup>ème</sup> Atelier de Raisonnement à Partir de Cas, Besançon, France, 30-31 mars 2006.
- [c6] C. Béler, **X. Desforges**, L. Geneste. « Architecture de retour d'expérience - Application à la prévention des risques en montagne ». MOSIM'06 6<sup>ème</sup> Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes, Rabat, Maroc, 3-5 avril 2006.

#### Ouvrages scientifiques ou chapitres de ces ouvrages

- [O1] Ph. Clermont, C. Béler, H. Rakoto, **X. Desforges**, L. Geneste. « Capitalisation et exploitation du retour d'expérience : un raisonnement à partir de cas étendu aux systèmes sociotechniques ». Dans « Raisonnement à partir de cas 1 : conception et configuration de produits », J. Renaud, B. Chebel Morello, B. Fuchs, J. Lieber, (Traité IC2, série Informatique et systèmes d'information) Ed. Hermès Lavoisier, 2007, ISBN 2-7462-1549-7, pp. 249-277.

#### Thèse de doctorat

- [ThDesforges] X. Desforges : « Méthodologie de surveillance en fabrication mécanique : application de capteur intelligent pour la surveillance d'axe de machine-outil ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, France 1999.

#### Mémoire de DEA

- X. Desforges : « Spécification d'un capteur intelligent pour la surveillance d'usinage ». Mémoire de DEA, Université Bordeaux I, France 1994.

#### Autres communications

- X. Desforges**, B. Archimède, G. Bencheikh, E. Le Maître Gonzalez, A. Letouzey : « Elaboration indicateurs d'aide à la décision à partir de l'état de santé des composants des systèmes techniques pour la planification conjointe de la production et de la maintenance ». Communication orale, GT H2M, GdR MACS journées STP du 31 mai et 01 juin 2018, Lille, France.
- X. Desforges**, E. Le Maître Gonzalez, B. Archimède : « Modélisation de systèmes techniques pour l'évaluation de leur aptitude à effectuer les tâches de production pour l'aide à la planification de la production et de la maintenance ». Communication orale, GT MOME, GdR MACS journées STP du 31 mai et 01 juin 2018, Lille, France.



## Lectures critiques

### *Revues*

- Engineering Applications of Artificial Intelligence, Ed. Elsevier, ISSN 0952-1976
- High Speed Machining: Modern Manufacturing Technologies, Ed. De Gruyter Open, ISSN 2299-3975
- Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Ed. Sage Publishing, ISSN 0954-4062
- Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, Ed. Sage Publishing, ISSN 0959-6518
- Reliability Engineering & System Safety, Ed. Elsevier, ISSN 0951-8320
- Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Ed. Elsevier, ISSN 0736-5845
- International Journal of Production Research, Ed. Taylor & Francis, ISSN 0020-7543
- Engineering Computations, Ed. Emerald Publishing, ISSN 0264-4401

Je suis sollicité deux à trois fois par an pour des lectures critiques pour des revues.

### *Conférences*

- MIM 2016, 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, Troyes, France, 28-30 juin 2016 (1 article).
- CoDIT'17 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, Barcelone, Espagne, 5-7 avril 2017 (1 article).

## Autres informations

Bénéficiaire de la PEDR (Prime d'Encadrement Doctorale et de Recherche) de 2008 à 2011.

## Activités d'enseignement

Les enseignements et encadrements pédagogiques que j'ai effectués ont été définis à partir des compétences acquises lors de ma formation initiale, puis au cours de ma carrière suite aux travaux de recherche auxquels j'ai collaborés. Mes activités d'enseignement sont relatives aux domaines de l'informatique, du génie industriel, de l'ingénierie des systèmes et de la mécatronique. L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT) forme des ingénieurs en cinq ans après le Baccalauréat. Des voies d'admission existent pour des étudiants titulaires d'un DUT ou d'un BTS ou issus de CPGE. Depuis 1999, le cursus de formation à l'ENIT a évolué pour être adapté, notamment, à l'évolution des programmes du Baccalauréat, au processus de Bologne ainsi qu'aux recommandations de la Commission des Titres d'Ingénieurs ou du Haut Conseil de l'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur. Une formation par apprentissage a également été créée. Ces évolutions ont conduit à des créations, des suppressions, des changements de format et des déplacements d'enseignements de semestres à d'autres. Dans ce contexte, les enseignements auxquels j'ai contribué depuis mon recrutement en qualité de Maître de Conférences ont également été adaptés à ces changements. Ces évolutions ont notamment conduit au fait que je n'effectue plus d'enseignement dans le domaine du génie industriel depuis septembre 2009. La liste qualitative des enseignements auxquels j'ai contribué et/ou auxquels je contribue aujourd'hui est la suivante :

### Informatique

Algorithmique et Programmation en langages Ada, Turbo Pascal, C et, aujourd'hui, Python (L1 et L2).  
Algorithmique, types de données, opérateurs, instructions élémentaires, modularité, fichiers, types de données abstraits  
Programmation orientée-objet en langage C++, Java puis Python (L3 puis M2).  
Concepts de l'orienté-objet  
Bases de données relationnelles, (L2).  
Algèbre relationnel, langage SQL  
Bureautique (L1)  
Traitements de texte, outils de présentation, tableurs

### Génie industriel

Organisation des entreprises et équilibrage de ligne (M2 puis M1)  
Modélisation et analyse du système décisionnel des entreprises (méthode GRAI),  
Gestion de Production (L3)  
Du plan industriel et commercial au calcul des besoins nets, méthodes MRP et MRP2 et ordonnancement,  
Implantation d'atelier (L3)  
Analyse des flux et des contraintes, détermination d'îlots, méthodes théoriques d'implantation, évaluation d'implantation.

### Ingénierie des systèmes

Spécifications, analyse fonctionnelle et orientée-objet (M2 puis L3)  
Principe de la spécification de systèmes, cahier de charges fonctionnelles et méthode SADT, approche orientée-objet et langage UML,  
Développement des produits et innovation – introduction de produits nouveaux dans les systèmes de production (M2 puis M1)

Typologie des systèmes industriels, cycle de développement de produit, analyse de la valeur, prise en compte de la qualité, concurrent engineering,  
 Ingénierie des systèmes – SysML (M2 puis M1)  
 Introduction au MBSE (*Model Based Systems Engineering*), langage SysML.

## Mécatronique

Capteurs et actionneurs en productique (M2).

Technologies de capteurs et actionneur utilisées en productique et instrumentation pour le suivi automatique de la production,

Instrumentation intelligente (M2 puis M1)

Fonctionnalités et architectures de l'instrumentation intelligente.

Contrôleurs neuronaux et flous – contrôleurs neuronaux (M2)

Réseaux de neurones artificiels, techniques d'apprentissages, contrôleurs à modèle prédictif mettant en œuvre des réseaux de neurones artificiels,

Systèmes embarqués, réseaux de capteurs et actionneurs (M1).

Analyse et spécification de systèmes embarqués, réseaux de terrain et instrumentation intelligente,

Réseaux et transmission de l'information numérique, instrumentation intelligente (M1).

Introduction aux media de transmission de l'information, avantages et principes de la transmission d'information numérique, introduction aux réseaux, modèle OSI, protocoles d'accès au medium, avantage des architectures distribuées, fonctionnalités et architectures de l'instrumentation intelligente.

Supervision, surveillance, diagnostic et pronostic (M2).

Rappels sur la détection, rappels sur des méthodes de diagnostic (présentation des systèmes experts et des réseaux de neurones artificiels), intérêts et fonctionnalités à mettre en œuvre pour le pronostic (introduction à des méthodes prédictives), architectures fonctionnelles pour la supervision

## Services d'enseignement détaillés de 2017-2018 et 2018-2019

|   | 2017-2018<br>Heures en équivalent TD | 2018-2019<br>Heures en équivalent TD |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Algorithmique et programmation L1   | Informatique : 138 h                 | Informatique : 154 h                 |
| TD (L1)   | 1 groupe x 14 h = 14 h               | 1 groupe x 14 h = 14 h               |
| TP (L1)   | 2 groupes x 6 h = 18 h               | 2 groupes x 6 h = 12 h               |
| TD (L2)   | 2 groupes x 28 h = 56 h              | 2 groupes x 28 h = 56 h              |
| TP (L2)   | 4 groupes x 6 h = 24 h               | 4 groupes x 6 h = 24 h               |
| Programmation orientée-objet  |                                      |                                      |
| TP (M2)   | 2 groupes x 16 h = 32 h              | 3 groupes x 16 h = 48 h              |
| Développement des produits et innovation  | Ingénierie des systèmes : 33 h       | Ingénierie des systèmes : 21 h       |
| Cours (M1 par apprentissage)  | 1 groupe x 12 h = 12 h               |                                      |
| Ingénierie des systèmes   |                                      |                                      |
| Cours (M1 option CSI)   | 2 groupes x 4,5 h = 9 h              | 2 groupes x 4,5 h = 9 h              |
| TP (M1 option CSI)  | 2 groupes x 6 h = 12 h               | 2 groupes x 6 h = 12 h               |
| Réseaux et transmission de l'information numérique,<br>instrumentation intelligente | Mécatronique : 66 h                  | Mécatronique : 66 h                  |
| Cours (M1 option CSI)   | 2 groupes x 10,5 = 21 h              | 2 groupes x 10,5 = 21 h              |
| Supervision, surveillance, diagnostic et pronostic                                  |                                      |                                      |
| Cours (M2 option CSI)   | 2 groupes x 22,5h = 45 h             | 2 groupes x 22,5h = 45 h             |
| Total annuel  | 237 h équivalent TD                  | 241 h équivalent TD                  |

Ces services d'enseignement sont complétés par des suivis de stages et encadrements de projets tuteurés représentant dix à vingt heures équivalent TD par an.

Le cursus de l'ENIT est semestrialisé. Ainsi, des étudiants en difficulté peuvent se voir offrir la possibilité de redoubler un semestre. Les groupes de cours sont d'une taille variable pouvant aller d'une dizaine d'étudiants (pour les options) à une centaine (pour le tronc commun), les groupes de TD sont généralement constitués de 20 à 24 étudiants et les groupes de TP de 10 à 12 étudiants.

## Activités collectives et administratives liées à l'enseignement et à la vie de l'établissement

Membre suppléant élu de la commission de spécialistes de l'ENIT de 2004 à 2008.

Membre suppléant nommé de la commission de spécialistes 61e-63e sections CNU de l'Institut National Polytechnique de Toulouse de 2004 à 2008.

Membre de comités de sélection à l'ENIT en 2009 et 2013.

Membre titulaire au Conseil Pédagogique de l'ENIT de 2005 à 2009 puis suppléant depuis 2009.

Responsable pédagogique de la deuxième année ENIT (L2 – semestre 3 et 4) de 2005 à 2008 :

- élaboration des emplois du temps,
- interlocuteur auprès des équipes pédagogiques et des étudiants pour les questions pédagogiques ou d'aménagement d'emploi du temps,
- animation des conseils d'école.

Animateur de l'équipe pédagogique d'informatique et informatique industrielle de 2012 à 2016 :

- répartition des charges d'enseignements,
- animation des réunions sur les contenus des enseignements, les formats des séances et les évaluations,
- interlocuteur auprès des responsables pédagogiques de semestre,
- préparation et gestion des budgets de l'équipe.

Membre de la commission programme de l'ENIT 2012 à 2016. Cette commission propose :

- les compétences et les niveaux cibles,
- l'organisation des cursus (formation initiale, apprentissage...),
- les volumes horaires alloués aux disciplines,
- les conditions de passage au semestre supérieur et d'obtention du diplôme,
- les modifications du règlement des études,
- les voies de recrutement.

Co-chargé de mission pour la définition de l'option Conception des Systèmes Intégrés en 2015 et co-animateur de l'option depuis avec mon collègue Paul-Etienne Vidal. A ce jour, cette option représente 300 heures de présentiels réparties sur les trois semestres d'enseignement de M1 et M2 avec des enseignements répartis en 5 pôles :

- actionneurs et énergie embarquée,
- systèmes autonomes et robotisés,
- mesure, traitement du signal et des données,
- informatique et systèmes intégrés,
- ingénierie d'intégration des systèmes.

Les activités relatives à cette mission consistent principalement à :

- définir des compétences spécifiques,
- définir et répartir les enseignements de l'option en concertation avec les enseignants des équipes pédagogiques concernées,
- présenter l'option,
- établir les bilans.

---

## Parcours recherche

---



## Introduction

L'objet de cette partie ce dossier est de retracer mon parcours recherche et d'y présenter les résultats des travaux auxquels j'ai participé ainsi que mon projet de recherche en fin de cette partie. Ses travaux sont articulés en une démarche ascendante dans laquelle les contributions portent sur la réactivité et la proactivité des systèmes et des organisations. La réactivité peut être vue comme l'aptitude à répondre aux changements avec comme but, pour le système ou l'organisation, de s'y adapter aux mieux. La proactivité peut être vue comme une capacité du système ou de l'organisation à prévoir les changements et de préparer au mieux les adaptations nécessaires. Que ce soit pour la réactivité ou pour la proactivité, il est nécessaire de surveiller le système, l'organisation ou leur environnement pour en détecter les changements puis, pour la réactivité, de mettre en œuvre les mécanismes permettant de s'y adapter et, pour la proactivité, de définir les futures évolutions et de mettre en place les actions pour répondre à ces évolutions.

Suivant cette démarche, mon parcours a débuté en 1995 au sein de l'équipe PA (**P**roduction **A**utomatisée) du **L**aboratoire **G**énie de **P**roduction (LGP). Les activités de l'équipe PA portaient alors sur l'organisation et la gestion de production, la gestion de maintenance, la supervision, la conduite et la surveillance des procédés de fabrication pour lesquelles les entreprises manufacturières constituaient le domaine d'application. La compétitivité de ces entreprises peut être maintenue ou améliorée par la recherche d'une plus grande disponibilité des ressources de production, de la maximisation de l'engagement de ces ressources ou encore par l'amélioration de la réactivité vis-à-vis des perturbations internes au système de production mais aussi externes comme les évolutions du marché tout en garantissant la satisfaction du client. Cette satisfaction, en plus du respect des coûts, est obtenue par la conformité des produits par rapport aux besoins, aux délais et aux services associés.

Dans ce contexte, mes compétences acquises, tant dans les domaines de la mécanique que la de production automatisée, m'ont permis de débiter mes activités de recherche par mes travaux de thèse qui ont porté sur le respect et l'amélioration de la qualité et l'accroissement de la disponibilité des ressources techniques de production par l'amélioration de la maîtrise des processus de fabrication. Ces processus font l'objet d'une surveillance accrue dont l'objectif est d'en améliorer à la fois la disponibilité et le contrôle. Les **M**achines-**O**utils à **C**ommande **N**umérique (MOCN) occupent une place prépondérante dans les ateliers de fabrication mécanique. Supportant les procédés de transformation des pièces, elles font donc l'objet de surveillance afin de garantir la qualité des pièces. Cette surveillance, grâce aux progrès de l'électronique, peut être réalisée au niveau des équipements de la machine assurant la conduite du procédé. Afin que les actions entreprises soient les plus appropriées à la situation, il est primordial que la surveillance fournisse des informations reflétant le plus possible la situation réelle. Pour cela, une méthode pour la surveillance en fabrication mécanique a été définie dans mes travaux de thèse. Elle est appliquée aux axes des MOCN qui conduisent les déplacements des outils par rapport aux pièces. Elle est mise en œuvre selon le concept de capteur intelligent dont les fonctionnalités consistent à fournir les données de surveillance mais aussi à les fiabiliser par le déploiement de fonctions de validation et d'autodiagnostic de l'instrument. Ces données peuvent être exploitées aussi bien pour la conduite des opérations de transformation des pièces afin d'en garantir la qualité que pour des interventions de maintenance préventive conditionnelle afin d'accroître la disponibilité des MOCN. Les fonctionnalités de communication bidirectionnelle des capteurs intelligents à l'aide de bus ou réseaux facilitent leur déploiement dans les systèmes automatisés de production. Les travaux qui suivirent mon recrutement en qualité d'attaché temporaire d'enseignement et de recherche puis de Maître de conférences dans le même établissement ont porté sur des perspectives de mes travaux de thèse. Il s'est



d'abord agit d'évaluer comment les données de surveillance recueillies par la méthode proposée (les paramètres physiques des axes de MOCN) influent sur la qualité des pièces usinées. Pour cela, nous avons procédé à des simulations et avons mis en évidence les erreurs de trajectoire d'outil impactant directement les dimensions obtenues des pièces. La correction dite miroir des consignes a été testée pour corriger ces variations. Cependant elle peut générer des problèmes de vibration. D'autres pistes peuvent être explorées exploitant les mises à jour régulières des paramètres estimés.

Dans le but d'améliorer la réactivité des ressources techniques de production, mes travaux ont ensuite porté sur l'exploitation des données de surveillance et celle des capacités de traitement de l'information au plus près des procédés et de communication bidirectionnelle des instruments intelligents. Les valeurs estimées des paramètres physiques sont utilisées pour surveiller le procédé d'usinage par l'intermédiaire d'une estimation des efforts de coupe et d'une évaluation de l'usure des outils. Les capteurs sont dotés de capacité de décision et peuvent gérer les degrés de liberté aménagés concernant leur niveau de décision. Les décisions font l'objet d'une forme de coopération entre les capteurs intelligents qui peuvent agir sur les consignes à appliquer aux actionneurs conduisant à une accommodation. L'architecture de conduite et de surveillance correspond à un système multi-agent où les décisions prises le sont en fonction des estimations des paramètres physiques des axes, des efforts de coupe, de l'usure de l'outil pour le maintien d'opération d'usinage dans des conditions acceptables en jouant sur les vitesses de coupe et d'avance. Pour cela, une plateforme de simulation a été développée. Les simulations ont montré que l'ajout du niveau décisionnel au niveau des axes des MOCN et la gestion des degrés de liberté relatifs à ce même niveau permettent d'accroître la productivité. L'architecture de conduite et de surveillance distribuée proposée pour les MOCN étant différente des architectures centralisées couramment déployées, nous avons défini un cadre de conception pour pouvoir la mettre en œuvre pour un grand nombre de MOCN.

Parallèlement aux travaux sur la conduite et la surveillance distribuée des MOCN et de l'usinage, j'ai co-encadré avec Laurent Geneste la thèse de Cédric Béler également en relation avec la réactivité mais au niveau des organisations sociotechniques par la modélisation d'un retour d'expérience cognitif. Le processus de retour d'expérience permet, à partir d'expériences capitalisées, de vérifier si une situation ou contexte courant est similaire à des situations ou contextes passés capitalisés afin de déterminer si la situation ou le contexte courant a un caractère positif, auquel cas il peut être profitable à l'organisation de poursuivre sur cette voie, ou bien, si la situation ou le contexte courant ont un caractère négatif, auquel cas il peut être préférable de renoncer à cette voie. Ce processus peut ainsi permettre à l'organisation de présélectionner ou d'écarter plus rapidement des voies pour répondre à un problème décrit par un contexte ou une situation. Le processus de retour d'expérience contribue à réduire le nombre de pistes à explorer dans la recherche de solutions à un problème et donc à gagner du temps dans cette recherche et, par conséquent, il permet à l'organisation de gagner en réactivité. Le processus de retour d'expérience est composé de deux sous-processus principaux : la capitalisation des expériences et leur exploitation. Afin de les capitaliser et les rendre accessibles par l'intermédiaire d'une base d'expériences, les expériences doivent être modélisées. La modélisation proposée construit une expérience à partir de deux catégories d'informations : les éléments de description du contexte et les éléments d'analyse renseignés par les experts. Dans cette modélisation, il a été tenu compte du fait que les saisies des contextes comme les expertises sont effectuées par des humains et donc que ces informations peuvent présenter de l'incertitude, de l'imprécision ou de l'incomplétude. C'est pourquoi, il a été proposé une modélisation basée sur un formalisme où le paradigme objet est associé aux structures de croyance telles qu'elles sont définies par la théorie de Dempster Shafer et le modèle des croyances transférables. L'exploitation proposée de la base d'expériences est inspirée du mécanisme de

recherche par similarité mis en œuvre dans le domaine du raisonnement à partir de cas. Pour cela, les méthodes et techniques de calcul de similarité employées pour des formalismes objets ou attributs-valeurs ont été définis. Pour les éléments de représentation de l'expérience relatifs à l'expression de l'incertitude, l'imprécision ou l'incomplétude, des mesures de similarité ensemblistes ont été proposées. Ces mesures de similarité ont été mises en œuvre dans un algorithme récursif constituant l'élément principal du moteur de recherche dans la base d'expériences. Une forme de connaissance est également explicitée à partir des expériences contenues dans la base. Il s'agit d'un indicateur de risque afin de répondre à un besoin du projet relatif aux risques dans le massif des Pyrénées dans le cadre duquel ces travaux ont été réalisés.

Comme pour l'expérience, la modélisation a été une étape fondamentale des travaux sur l'évaluation de la santé des systèmes techniques auxquels j'ai contribué. Cette évaluation a un double objectif. Le premier objectif consiste à évaluer la santé actuelle d'un système technique, pour établir rapidement les besoins de maintenance et donc de réduire le besoin d'inspection pour déterminer la nature des interventions grâce à des diagnostics et/ou des évaluations des dégradations. Ceci permet de réduire les durées d'immobilisation pour maintenance des systèmes techniques et d'accroître la réactivité des organisations qui les exploitent. Le second objectif consiste en une forme de pronostic fournissant des indicateurs quant à l'aptitude d'un système technique à accomplir de futures tâches de production. Ces indicateurs évaluent les chances que des défaillances se produisent lors de l'exécution de futures tâches de production et identifient les maintenances nécessaires afin qu'elles ne surviennent pas. Ils peuvent ainsi contribuer à rendre proactive l'organisation de la production et de la maintenance vis-à-vis de ces défaillances. Ces travaux ont été menés en plusieurs étapes. Ayant contribué à développer des architectures de surveillance et de conduite distribuées, la première étape a consisté en la définition d'architectures distribuées pour le diagnostic et le pronostic de systèmes techniques. Cette étape a fait l'objet de la thèse de Mickaël Diévert que j'ai co-encadré avec Philippe Charbonnaud dont le projet Archistic a constitué le cadre de travail. Une modélisation des systèmes techniques et une formalisation des fonctions de diagnostic et de pronostic ont été proposées permettant de définir des architectures multi-agents implémentant ces fonctions. La deuxième étape a porté sur la définition d'une fonction générique visant à déterminer l'aptitude de systèmes techniques à accomplir de futures tâches de production à partir des pronostics de leurs composants. Pour cela, la modélisation des systèmes techniques proposée dans la thèse de Mickaël Diévert a été reprise et est exploitée à l'aide de réseaux bayésiens orientés objet fournissant des indicateurs d'aide à la décision pour la production et la maintenance à partir de pronostics de composants probabilistes. Cependant, les informations fournies par les pronostics de composants peuvent comporter d'autres formes d'imperfections. La détermination d'une fonction générique permettant de traiter les différentes formes d'imperfections des informations fournies par les pronostics de composants et permettant de fournir les indicateurs d'aide à la décision quant à l'aptitude d'un système technique à accomplir de futures tâches de production mais aussi des maintenances nécessaires pour qu'il puisse les mener à bien a fait l'objet de la thèse d'Esteban Le Maitre Gonzalez que j'ai co-dirigé avec Bernard Archimède.

C'est avec comme objectif de mettre en œuvre cette proactivité de l'organisation de la production et de la maintenance vis-à-vis de survenues défaillances lors de l'exécution de futures tâches qu'Agnès Letouzey et moi avons demandé et obtenu un financement de l'Ecole Doctorale Systèmes pour la thèse de Ghita Bencheikh dont les travaux consistent en la définition de méthodes pour la planification conjointe des activités de production et de maintenance en fonction de l'état de santé des ressources techniques de production. Pour cela, une modélisation des tâches de production et des ressources techniques a été définie. L'approche de planification retenue est basée sur la méthode multi-agent SCEP

(Superviseur, Clients, Environnement, Producteurs) dans laquelle les agents « Producteurs » sont capables d'évaluer leur aptitude à accomplir les tâches de production et sont capables d'effectuer des demandes de maintenance en fonction de cette aptitude. Des agents « Mainteneurs » ajoutés à ceux initialement présents dans la méthode SCEP établissent des propositions de maintenance. Les travaux encore en cours portent principalement sur l'assurance de la convergence de la méthode et sur différentes méthodes internes aux agents permettant de traiter un nombre important de situations (cas où la maintenance est externalisée ou pas, cas où l'organisation sociotechnique recherche la minimisation des immobilisations des ressources pour maintenance, cas où les ressources, notamment des moyens de transports, doivent se rendre sur un site de maintenance...).

Ce mémoire se termine par une synthèse des contributions issues des travaux réalisés et ceux en cours et la présentation des axes de mon projet de recherche.

# 1 Surveillance en fabrication mécanique mise en œuvre par capteur intelligent

Les entreprises manufacturières sont, depuis quelques décennies, confrontées à une concurrence mondialisée sur des marchés où la demande est changeante. Dans ce contexte, les entreprises doivent rechercher de façon permanente à répondre au bon moment, au juste besoin, au meilleur prix et au niveau qualité désiré pour rester compétitives. L'amélioration de la réactivité des entreprises est donc une quête permanente. Si la flexibilité permet de ménager des degrés de liberté dans la gestion des activités manufacturières, la réactivité est obtenue par l'exploitation de ces degrés de liberté de manière appropriée vis-à-vis de la situation.

Dans le secteur de la fabrication mécanique, la flexibilité a été obtenue par l'automatisation des ressources de production voire même des ressources de la logistique de production. Les machines-outils sont donc devenues des **Machines-Outils à Commande Numérique (MOCN)** présentant l'avantage d'être programmables et pouvant être regroupées, selon la taille du regroupement, en cellules ou ateliers flexibles constituant ainsi un « *Flexible Manufacturing System* » (FMS) (Barbier et Jaulent, 1992). Dans ces systèmes, plusieurs de types de MOCN, des moyens de contrôle, des portes-pièces, des systèmes de transport et de stockage de pièces et/ou d'outils peuvent être mis en œuvre. Un système de pilotage dirige et supervise les systèmes de contrôle-commande des différentes ressources du FMS. Cette architecture forme les 3 niveaux hiérarchiques les plus bas du concept CIM (*Computer Integrated Manufacturing*). Les deux autres niveaux de l'intégration numérique conceptualisée par CIM, sont ceux des métiers (conception, méthodes, gestion de production, gestion de maintenance, gestion des achats...) et de la gestion de l'entreprise. Ces derniers niveaux peuvent faire l'objet d'une intégration par la mise en œuvre de progiciel de gestion intégrée ou ERP (*Enterprise Resource Planning*). Le concept CIM est souvent représenté sur un fond constitué d'une pyramide symbolisant la hiérarchisation du système décisionnel de l'entreprise comme cela est représenté sur la Figure 1 issue de (Bouazdi, 1990).

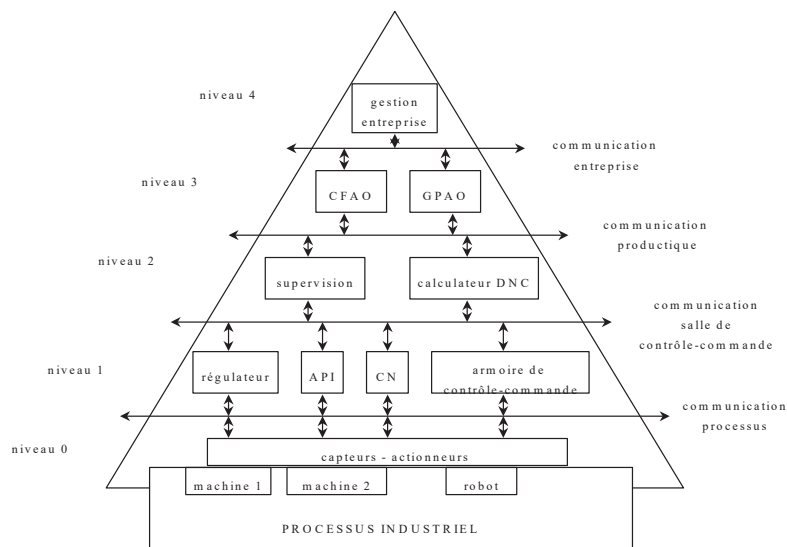


Figure 1. Représentation pyramidale du concept CIM.

En fabrication mécanique, les MOCN sont des ressources essentielles. En effet, elles mettent en œuvre les procédés de transformation conduisant à la mise en forme des pièces ajoutant ainsi de la valeur. Ces procédés consistent soit à de l'enlèvement de matière correspondant à de l'usinage, soit à de l'ajout de matière plus communément appelé impression 3D. Les procédés d'impression 3D sont nombreux

(Frazier, 2014) et leur maîtrise fait encore l'objet de nombreux développements afin de garantir les propriétés mécaniques de pièces ainsi obtenues (Lewandowski et Seifi, 2016). Cependant, les machines d'impression 3D partagent des architectures physiques et de commande communes avec les MOCN afin de déplacer les éléments selon des trajectoires prédéfinies pour réaliser des pièces aux formes souhaitées. L'obtention des pièces métalliques par usinage est encore très nettement majoritaire par rapport à l'impression 3D. Comme il n'était que très peu question d'impression 3D au moment de ma thèse, nous nous sommes donc intéressés à l'usinage et aux MOCN.

L'amélioration de la réactivité au niveau des processus et de leur contrôle permet de garantir l'obtention de pièces conformes à leurs spécifications géométriques, dimensionnelles et surfaciques. Elle requiert des informations relatives au déroulement des opérations pour réagir de manière appropriée. La surveillance apporte ces informations. Cette première partie de mon parcours recherche relative à mes travaux de thèse est consacrée à la surveillance en fabrication mécanique [ThDesorges]<sup>1</sup>. L'obtention de pièces conformes n'est cependant pas le seul objectif de la surveillance en fabrication mécanique qui concerne aussi l'intégrité des ressources et donc des machines-outils avec comme objectif l'amélioration de leur disponibilité. La surveillance permet alors de détecter des détériorations soudaines des ressources (bris, collisions...) ou de suivre les dégradations progressives qui les affectent. La surveillance fournit à un FMS des informations qui lui permettent de réagir face à une détérioration soudaine en stoppant, par exemple, l'opération en cours sur la machine où l'incident est apparu en modifiant le mode de fonctionnement pour continuer à produire malgré l'incident et lui permettent aussi d'alerter le service de maintenance pour entreprendre des réparations. Le suivi des dégradations lentes peut, entre autres informations, permettre au service de maintenance de planifier des interventions et de les entreprendre avant qu'elles n'entraînent des détériorations. En fabrication mécanique, la surveillance doit donc porter sur le procédé et la machine qui le supporte. Lors de mes travaux de thèse nous sommes attachés à définir des méthodes de surveillance permettant de limiter le nombre de moniteurs tout en facilitant leur intégration et réduisant les arrêts liés à leurs défaillances par l'application du concept de capteur intelligent.

## 1.1 Surveillance de l'usinage

La surveillance de l'usinage traite principalement de la surveillance des outils de coupe qui sont le siège de l'enlèvement de matière et directement en contact avec les pièces. Les causes de non qualité dues aux outils de coupe sont (Fériani, 1993) :

- la déformation par flexion (manque de rigidité de l'outil),
- la température aux surfaces de contact pièce/outil,
- l'évolution de l'usure des arêtes de coupe par abrasion, diffusion, fatigue...
- la qualité des arêtes de coupe (neuves, raffûtées, usées...),
- les vibrations des outils liées à leur fixation et à leur rigidité ou à des conditions de coupe trop sévères,
- les efforts de coupe,
- les bris d'outils.

Les problèmes de déformation des outils et de leur vibration peuvent être résolus, en partie, par des améliorations dans la conception des outils et des porte-outils. Dans les usinages de pièces à parois

---

<sup>1</sup> Les références issues du parcours recherche sont citées entre « [ ] » et répertoriées dans la partie « Synthèse des activités de recherche et d'enseignement » de ce dossier.

minces, les chocs liés aux engagements des dents de l'outil coupant génèrent des vibrations de la paroi compromettant l'obtention de la pièce aux dimensions spécifiées. Pour limiter ou supprimer ces vibrations les conditions de coupe peuvent être modifiées (Séguy *et al.*, 2011). Les conditions de coupe influent également sur la température aux surfaces de contact pièce-outil et les efforts de coupe. La qualité du fluide d'arrosage, s'il y a lieu, et son débit influent également sur la qualité de la surface de pièce obtenue.

### 1.1.1 Maîtrise des conditions de coupe

Certaines causes de non qualité sont dues aux choix des conditions de coupe. Ces conditions sont :

- la vitesse de coupe (vitesse de glissement outil/pièce) :  $V_c$ ,
- la vitesse d'avance (vitesse à laquelle se déplace l'outil par rapport à la pièce) :  $V_f$ ,
- la profondeur de passe (épaisseur de matière enlevée au passage de l'outil) :  $a$  (sur la Figure illustrant une opération de tournage  $a = \frac{D-d}{2}$  où  $D$  est le diamètre de la pièce avant usinage,  $d$  le diamètre de la pièce après usinage),
- l'arrosage par un fluide dont le but est d'améliorer le processus d'enlèvement de matière dans le respect de la qualité des pièces.

Une illustration des paramètres de coupe est faite dans le cas du tournage sur la Figure 2.

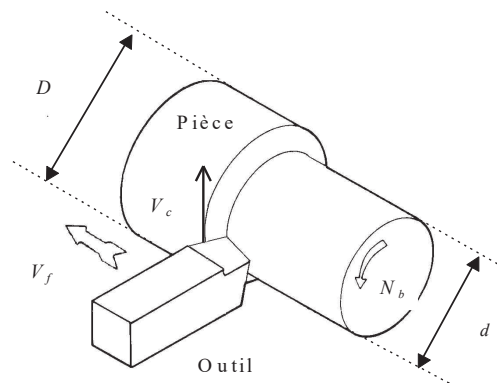


Figure 2. Paramètres de coupe en tournage

Cependant, ces paramètres sont déterminés sans que l'évolution de l'état de l'outil soit considérée. En effet, lors de l'opération d'usinage, l'outil est soumis à diverses sollicitations comme les efforts mécaniques (flexion, compression, chocs) pouvant engendrer des ruptures par fatigue, le frottement générant l'usure par différents mécanismes (adhésion, abrasion, diffusion...) et d'autres phénomènes dont l'oxydation et les réactions chimiques éventuelles avec la matière de la pièce usinée.

Certaines méthodes de maîtrise des conditions de coupe s'appuient sur la constance de l'effort de coupe. Ce maintien s'obtient par adaptation de la vitesse de coupe ou de l'avance ou les deux (Altintas et Munasinghe, 1996 ; Hsu et Fann, 1996). Toutefois, ces méthodes ne permettent pas de prendre en compte l'état de l'outil et sont le plus souvent destinées à des passes d'ébauche n'influant que peu sur la qualité finale des pièces. D'autres méthodes ont pour objectif l'atténuation des vibrations générées par

l'usinage dont l'amplitude croît avec l'usure de l'outil (Pan *et al.*, 1996). Ceci permet ainsi d'améliorer l'état de surface des pièces usinées.

Il devient évident que les conditions de coupe soient adaptées, dans certaines limites, à l'état de l'outil afin de maintenir la qualité des pièces usinées. Différentes stratégies d'adaptation ont été développées, notamment celles proposées par Martin (1980), Zadshakoyan (1998) ou Séguy *et al.* (2011). Ces stratégies nécessitent l'utilisation de moyens d'observation de l'état de l'outil revenant à surveiller l'outil.

### 1.1.2 Surveillance des outils de coupe

La surveillance des outils permet d'adapter les conditions de coupe à l'état de l'outil tout en respectant les spécifications des pièces. Elle rend possible le déclenchement d'actions « réflexe » comme arrêter l'avance lorsque l'outil se brise, correspondant à une rupture de l'arête coupante. Enfin, elle permet d'avertir un opérateur lorsque l'outil a atteint une usure limite afin qu'il le remplace ou le raffûte.

Le bris d'outil provoque un endommagement irréversible de la surface de la pièce usinée qui est alors rebutée. Le bris d'outil fait partie des événements les plus coûteux survenant dans les fabrications de petites séries dans les FMS avec les collisions (chocs entre éléments de machines-outils ou outils et pièces ou porte-pièces) (Ratava *et al.*, 2017). Cependant, les bris d'outils sont précédés de signaux précurseurs permettant la mise en œuvre d'une surveillance qui revient à évaluer l'usure des arêtes des outils. Il existe plusieurs formes d'usure comme ceci est montré sur la Figure 3.

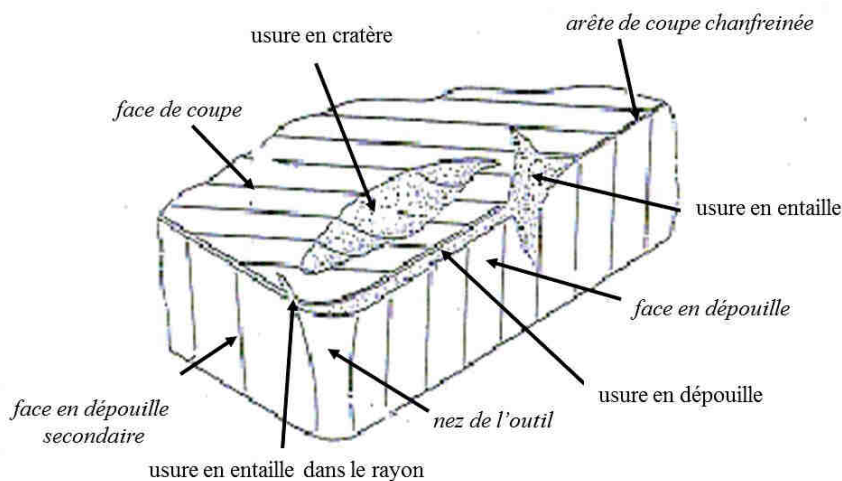


Figure 3. Types d'usures classiques d'une plaquette d'usinage

De nombreuses méthodes directes ou indirectes, hors ligne ou en ligne permettent d'évaluer l'usure des arêtes coupantes (Dan et Mathew, 1990). Les méthodes en ligne permettent la mise en œuvre de stratégies d'adaptation mais sont indirectes car il est difficile d'observer ce qui se passe dans le contact pièce-outil dans lequel se trouve l'arête lors de l'opération d'enlèvement de matière. Ces méthodes indirectes requièrent des modèles établissant les relations entre l'état de l'arête coupante et la ou les mesures exploitées. Parmi ces méthodes indirectes, celles mettant en œuvre des mesures des efforts de coupe sont privilégiées (Ratava *et al.*, 2017 ; Li *et al.*, 2017 ; Kong *et al.*, 2017). La mesure des efforts est alors accessible par des capteurs piézoélectriques ou par des jauges extensométriques qui peuvent être reliées aux efforts par les géométries et les lois de comportement des matériaux des éléments sur lesquelles ces jauges sont disposées. Pour évaluer l'usure de l'outil, il est nécessaire de disposer de modèles mettant en relations les valeurs des efforts comme dans (Ravindra *et al.*, 1993) ou d'autres informations, notamment vibratoires, issues des signaux mesurés (Ratava *et al.*, 2017). Toutefois, ces

méthodes nécessitent une instrumentation supplémentaire dédiée à la surveillance de l'usure des outils introduisant ainsi son risque de défaillance dans le FMS.

Une autre voie consiste alors à exploiter des mesures déjà mises en œuvre pour le contrôle des motorisations des MOCN qui, pour assurer le déplacement des outils selon les trajectoires et vitesses programmées, ont une partie du couple fourni utilisé pour s'opposer aux efforts de coupe résistants aux avances. Cette partie du couple est directement traduite par plus de puissance électrique absorbée par le moteur. Plusieurs études ont été menées permettant d'évaluer la sensibilité des grandeurs électriques associées aux motorisations aux efforts de coupe bien que les dynamiques rapides des efforts soient très atténuées notamment par les effets d'inerties des moteurs et systèmes de transmission mécanique du mouvement (Altintas, 1992 ; Stein *et al.*, 1986 ; Stein et Shin, 1986). Cette observation des efforts de coupe au moyen des grandeurs électriques des moteurs nécessite la connaissance des paramètres électromécaniques du moteur et systèmes de transmission comme le moment d'inertie (la charge entraînée peut changer) ou les frottements dus aux usures des systèmes de transmission entraînant donc un besoin de surveillance la machine.

## 1.2 Surveillance des machines-outils

La surveillance des MOCN peut répondre à deux besoins. Le premier consiste à garantir la qualité des pièces usinées. Le second doit permettre la mise en œuvre de la maintenance conditionnelle, connue sous le sigle CBM (*Condition Based Maintenance*), qui vise la réduction des tâches de maintenance non nécessaires par une considération préalable de l'état des ressources techniques conduisant à la réduction des coûts de maintenance (Jardine *et al.*, 2006 ; Scarf, 2007).

Comme les altérations des outils, les MOCN sont génératrices de dispersions sur la géométrie, l'état de surface et les dimensions des pièces usinées (Férian, 1993). Ces dispersions peuvent être dues à la précision des asservissements, la géométrie des glissières, les jeux dans les chaînes cinématiques et les déformations des différents éléments dues aux efforts de coupe et aux dilatations thermiques.

Pour mettre en place le CBM afin de réduire le nombre d'opérations de maintenance et donc d'accroître la disponibilité des ressources, il est nécessaire d'observer des signaux précurseurs de défaillance sur les équipements. Les préconisations associées au *Prognostics and Health Management* (PHM) consistent, à partir de l'exploitation de ces signaux précurseurs, à établir des prévisions de leur évolution dans le temps, afin d'estimer la durée d'exploitation restante avant la survenue de la défaillance (Vachtsevanos *et al.*, 2006).

Des techniques ont été développées permettant de surveiller des éléments de MOCN, comme les roulements (Morel, 1992 ; Medjaher *et al.*, 2012), les réducteurs à engrenages (Zwingelstein, 1995 ; Podsedkowski, 1997 ; Zhao *et al.*, 2013) ou encore les moteurs électriques (Coirault *et al.*, 1993 ; Strangas *et al.*, 2013). Cependant, la mise en œuvre de ces surveillances nécessite un moniteur pour chacune. Cet ajout de systèmes de surveillance conduit à une augmentation du nombre d'immobilisations dues aux défaillances propres des moniteurs résumée par l'idée reçue : « plus il y a de capteurs et moins la machine marche » (Flambard, 1989).

La démarche qui a guidé mes travaux de thèse à consister à développer des moyens pour mettre en œuvre des techniques de surveillance permettant d'observer l'état de plusieurs organes ou sous-ensembles des MOCN. Après une étude des techniques répondant à cet objectif, celles basées sur l'estimation des paramètres physiques ont paru pertinentes pour les possibilités qu'elles offraient d'établir un diagnostic (Isermann, 1991 ; Isermann, 1993). Le suivi de recommandations listées par Flambard (1989) :



- ne pas traiter l'information en tout ou rien (franchissement ou non de seuils), mais ajouter un niveau d'intelligence plus élevé en mémorisant les grandeurs caractéristiques des défauts au cours du temps et en suivre ainsi l'évolution, ce qui demande un traitement préalable et local des signaux ;
- implémenter cette surveillance dans une unité indépendante de la machine mais pouvant cependant communiquer avec celle-ci et avec l'ensemble des fonctions intéressées par les informations délivrées par cette surveillance sur demande. Ce choix est préférable à l'implémentation sur la commande numérique qui pilote la machine pour laquelle il faudrait réaliser et intégrer des interfaces à un logiciel particulier dans un système non-adapté ;
- dater et mémoriser les informations essentielles élaborées sur place à partir de traitements effectués sur les mesures pour les tenir à disposition d'autres systèmes à l'aide d'un moyen de communication ;

était un second objectif qui justifiait, avec les contraintes de fiabilité des moniteurs, de faire appel au concept de capteur intelligent (Robert *et al.*, 1993).

### 1.3 Estimation des paramètres physiques des machines-outils

Les MOCN sont constituées de plusieurs actionneurs et chaînes de transmission mécanique assurant le mouvement de l'outil et les déplacements relatifs de la pièce par rapport à l'outil. Généralement, une broche assure la rotation de l'outil pour les opérations de fraisage ou de perçage ou la rotation de la pièce pour les opérations de tournage. Les axes assurent les déplacements relatifs de la pièce par rapport à l'outil selon une trajectoire programmée. Ces déplacements sont linéaires ou rotatifs.

L'architecture générale d'un axe linéaire est représentée sur la Figure 4. Une broche ne comprend pas les éléments situés à droite du moteur électrique. Toutefois, elle peut comporter un réducteur et être asservie en position. En effet, cela peut être utile dans le cas d'opérations particulières comme la réalisation de pas de vis avec un profil et un pas spécifique nécessitant plusieurs passes d'usinage.

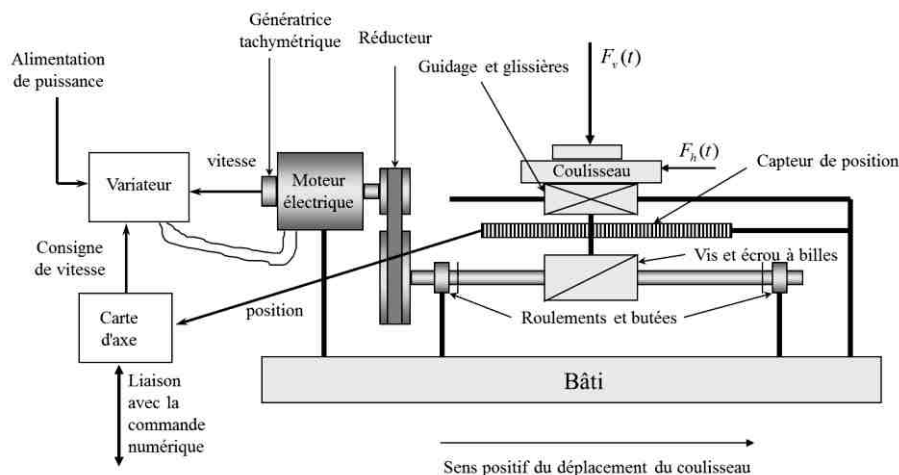


Figure 4. Architecture générale d'un axe de MOCN

Dans cette architecture, la carte d'axe reçoit les consignes de position de la commande numérique de la MOCN qu'elle calcule à partir des programmes pièces et de paramètres relatifs à la dynamique de la machine. La carte d'axe reçoit également les mesures de position et assure la régulation en position et transmet les consignes de vitesse au variateur de vitesse. Ce variateur joue le rôle de contrôleur de vitesse et assure la conversion de puissance électrique selon la technologie du moteur électrique (moteur à courant continu, moteur synchrone, moteur asynchrone). Le moteur convertit l'énergie électrique en

énergie mécanique. Le réducteur, lorsqu'il y en a un, augmente le couple produit par le moteur et réduit la vitesse dans le rapport inverse. Le système vis-écrou transforme la rotation en translation. Enfin la glissière assure le guidage rectiligne de l'ensemble.

Afin d'identifier les paramètres physiques, il est nécessaire d'établir une structure de modèle d'axes ou de broche de MOCN dans laquelle ces paramètres apparaissent.

### 1.3.1 Modélisation d'un axe de machine-outil

Des modèles d'axe de machine-outil ont été établis pour diverses applications (Mulder *et al.*, 1982 ; Stein *et al.*, 1986 ; Stein et Shin, 1986). L'objectif était alors d'établir un modèle utilisé pour la surveillance de l'ensemble des principaux éléments d'un axe de MOCN. Nous avons donc établi des modèles de connaissance du comportement de ces éléments basés sur les lois physiques afin de déterminer un modèle d'axe de MOCN.

La littérature étant assez riche sur ce point, nous avons exploité des modèles existants pour les moteurs, les réducteurs, les systèmes vis-écrou, les glissières et même pour l'ensemble variateur-convertisseur.

Toutefois, nous n'avons pas inclus l'ensemble variateur-convertisseur dans le champ de surveillance. En effet, peu de travaux étaient ou avaient été menés sur ce sujet au milieu des années 1990. Les techniques déployées alors et même plus récemment sont très spécifiques à la surveillance de ces équipements et ne permettent pas une surveillance du moteur et de la charge (Peuget *et al.*, 1997 ; Ivanov *et al.*, 2013). Les convertisseurs nécessitent encore un moniteur dédié. La modélisation du variateur reste néanmoins nécessaire puisqu'il est intégré dans la régulation et en assure même une partie.

La variabilité des conceptions des MOCN ne permet pas l'obtention d'une structure de modèle unique pour la surveillance des axes ou des broches. En effet, les ensembles moteurs et variateurs peuvent être à courant continu ou à courant alternatif (synchrone ou asynchrone), il peut y avoir ou pas de réducteur en sortie moteur, les glissières peuvent être à contact plan, hydrostatiques ou à recirculation de rouleaux. Certaines machines ont des axes réalisés à l'aide de moteur linéaire assurant directement le déplacement.

Comme il s'agissait, dans le cadre de ma thèse, de définir une méthode et non pas de traiter l'ensemble des combinaisons technologiques, nous nous sommes intéressés à une structure de modèle correspondant à une architecture assez répandue pour la réalisation d'axe et selon laquelle plusieurs MOCN de l'atelier de l'ENIT étaient conçues. Cette architecture comprend un moteur à courant continu et son variateur, un réducteur, un système vis-écrou à billes et glissières à recirculation de rouleaux. Ce modèle est constitué des deux relations suivantes :

$$(1) \quad u(t) - K \cdot \omega(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t)$$

$$(2) \quad K \cdot i(t) - c_{rt}(t) = J_t \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + Y_t \cdot \omega(t) + C_{fst} \cdot \text{sign}(\omega(t))$$

$$\text{avec } \text{sign}(x) = \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 0, & x = 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$$

et où les variables sont :

- $u$  : la tension d'alimentation aux bornes du moteur,
- $i$  : l'intensité du courant aux bornes du moteur,
- $\omega$  : la vitesse angulaire de l'arbre moteur,
- $c_{rt}$  : le couple ramené sur l'arbre moteur exercé par les efforts extérieurs (les efforts de coupe).

et où les paramètres sont :

- $R$  : la résistance électrique du moteur,
- $L$  : l'inductance du moteur,
- $K$  : la constante de couple ou constante contre électromotrice du moteur,
- $J_t$  : le moment d'inertie total considéré au niveau de l'arbre moteur,
- $\gamma_t$  : le coefficient de frottement visqueux total considéré au niveau de l'arbre moteur (ce coefficient est relatif aux fluides de lubrification supposés newtoniens),
- $C_{fst}$  : le couple dû aux frottements secs (frottements coulombiens) considéré au niveau de l'arbre moteur.

Le variateur assure les régulations en vitesse et courant et la conversion de la puissance électrique. Pour ces variateurs dédiés à des motorisations à courant continu pour MOCN, les régulations sont de type proportionnel-intégral. La boucle de régulation de courant est incluse dans la boucle de régulation de courant. Comme la différence d'ordre de grandeur entre les fréquences de commutation de la partie convertisseur de l'ordre de 1 kHz et la constante de temps électrique  $\frac{L}{R}$  de l'ordre de 0,015 s du moteur de 5 kW qui avait alors été utilisé pour les expérimentations était suffisante, le convertisseur a été assimilé à un gain. La carte d'axe assure une régulation de type proportionnel. La régulation de ce type d'axe de MOCN peut alors être représentée par le schéma bloc de la Figure 5.

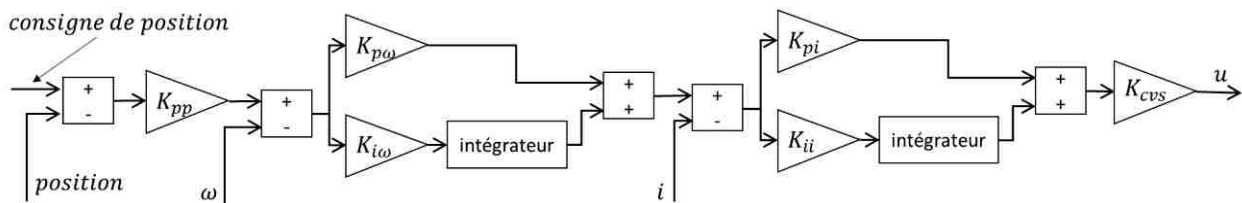


Figure 5 . Schéma bloc d'une régulation d'axe de MOCN équipé d'un moteur à courant continu

Les paramètres physiques du modèle constitué des relations (1) et (2) peuvent être estimés (ou identifiés) à l'aide de trois mesures : la mesure du courant et la mesure de vitesse déjà effectuée pour les besoins de régulation et la mesure de tension qui nécessite l'ajout d'un capteur. Pour permettre l'association entre les évolutions des paramètres physiques et les fautes de l'axe, il faut procéder à leur estimation. Ces associations sont répertoriées dans (Isermann, 1991 ; Isermann, 1993) et reprises dans le Tableau 1 dont certaines ont pu être vérifiées lors d'essais sur une MOCN, d'autres ne l'ont pas été car il aurait fallu occasionner des dommages à la machine dont la remise en état aurait été coûteuse. Plusieurs méthodes étaient éligibles à cette estimation.

| Défauts   | Paramètres physiques sensibles |
|---|--------------------------------|
| Usures des paliers, des guidages et des glissières                  | $Y_t$ et $C_{fst}$             |
| Manque de lubrification, dégradation et contamination du lubrifiant | $Y_t$ et $C_{fst}$             |
| Rupture d'une pièce mécanique                                       | $J_r, Y_t$ et $C_{fst}$        |
| Usure des balais  | $R$ et $C_{fst}$               |
| Echauffement du moteur  | $R, L$ et $K$                  |
| Démagnétisation   | $K$ et $L$                     |

Tableau 1. Association entre paramètres physiques d'un axe de MOCN et l'origine des fautes

### 1.3.2 Etudes de méthodes d'estimation des paramètres physiques

Un problème posé par l'estimation des paramètres du modèle constitué des relations (1) et (2) est l'absence d'accès par la mesure aux dérivées du courant et de vitesse. Un autre problème est la grandeur  $sign(\omega(t))$  qui doit être assimilée à une variable non mesurée. Ce dernier problème sera résolu par la multiplication effectuée numériquement des variables et leurs dérivées par  $sign(\omega(t))$  permettant ainsi de considérer que l'axe se déplace toujours dans la même direction. Nous avons également profité du fait qu'entre les opérations d'usinage, il y a des déplacements de l'outil par rapport à la pièce pendant lesquels les efforts de coupe sont nuls ( $c_{rt}(t) = 0$ ). Ceci est rendu possible par le fait que les phénomènes altérant le processus d'usinage ont une dynamique rapide, exprimée souvent en minutes, par rapport à ceux affectant la machine dont la dynamique est exprimée plutôt en heures. A titre de comparaison, une usure d'outil peut survenir en quelques dizaines de minutes alors que la constante de temps thermique d'une machine est de l'ordre de une à deux heures. Nous avons profité de ces déplacements sans usinage, faciles à détecter car programmés dans les commandes numériques par le code d'avance rapide, pour surveiller les axes. Avec ces considérations, la structure du modèle devient alors celle constituée des relations :

$$(3) \quad u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) + K \cdot \omega(t)$$

$$(4) \quad i(t) = \frac{J_t}{K} \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{Y_t}{K} \cdot \omega(t) + \frac{C_{fst}}{K} \cdot un(t)$$

Où  $un(t) = sign^2(\omega(t))$ .

$K$  doit être connu afin que les paramètres physiques de (4) puissent être estimés. Pour cela les paramètres de (3) doivent être estimés avant ceux de (4).

Cependant, le calcul numérique de la dérivée d'un signal directement issu de la mesure est très fortement bruité introduisant le risque d'un biais lors de l'estimation des paramètres et afin de limiter le nombre de capteurs, il n'était pas souhaitable de recourir à des capteurs supplémentaires pour mesurer ces dérivées de courant et de vitesse. Nous avons testé plusieurs méthodes.

#### 1.3.2.1 Moments partiels temporels partiels réinitialisés

La méthode des **Moments Temporels Partiels Réinitialisés** (MTPR), développée par Trigeassou (1987), permet de remplacer un modèle décrit par des équations différentielles par un modèle linéaire par rapport

aux paramètres et ne nécessitant pas la mesure de dérivées. Une propriété intéressante de cette méthode est d'être peu sensible au bruit (Coirault, 1992).

Pour un système d'ordre  $N$  avec  $u$  son entrée et  $y$  sa sortie et défini par sa fonction de transfert :

$$(5) \quad H(s) = \frac{b_0 + b_1 s + \dots + b_M s^M}{a_0 + a_1 s + \dots + a_{N-1} s^{N-1} + s^N}$$

Le modèle aux MTPR est alors :

$$(6) \quad y(t) - \gamma_t(y) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \cdot \alpha_{n,t}(y) + \sum_{m=0}^M b_m \cdot \beta_{m,t}(u)$$

avec pour un système du premier ordre comme c'est le cas pour les relations (3) et (4) :

$$\begin{aligned} \alpha_{0,t}(y) &= -\frac{\hat{A}_{1,t}(y)}{\hat{t}} \\ \beta_{0,t}(u) &= \frac{\hat{A}_{1,t}(u)}{\hat{t}} \\ \beta_{1,t}(u) &= u(t) - \frac{\hat{A}_{1,t}(u)}{\hat{t}} \\ \gamma_t(y) &= -\frac{\hat{A}_{0,t}(y)}{\hat{t}} \end{aligned}$$

où les MTPR sont calculés par l'équation  $\hat{A}_{n,t}(f) = \int_0^{\hat{t}} \tau^n \cdot f(t - \hat{t} + \tau) \cdot d\tau$  pour la période de réinitialisation  $\hat{t}$  et avec  $f = y, u$ . Ce calcul des MTPR implique que la forme des signaux  $f$  soit telle que les MTPR aient une valeur finie lorsque  $\hat{t} \rightarrow \infty$ . En pratique, on ne peut pas attendre un temps infini, il convient donc de choisir une période de réinitialisation suffisamment grande et identique pour chacun des MTPR à calculer pour que  $\forall(f, n), \hat{t} [\hat{A}_{n,t}(f)]_{\hat{t}} \approx [\hat{A}_{n,t}(f)]_{\hat{t} \rightarrow \infty}$ . Comme les MTPR sont calculés de façon numérique sur une unité de traitement, les signaux sont échantillonnés avec une période  $h$  (avec alors  $t = k \cdot h$  où  $k$  est un entier pouvant correspondre au numéro d'échantillon). Une méthode d'intégration préconisée et celle de Simpson (Coirault, 1992). On en déduit alors les valeurs :

$$\begin{aligned} \alpha_{n,t}(f) &= \alpha_{n,k}(f) = \sum_{i=0}^{\hat{k}} m_{ni} \cdot f(k - \hat{k} + i) \\ \beta_{n,t}(f) &= \beta_{n,k}(f) = \sum_{i=0}^{\hat{k}} m_{ni} \cdot f(k - \hat{k} + i) \\ \gamma_t(f) &= \gamma_k(f) = \sum_{i=0}^{\hat{k}} m_{ni} \cdot f(k - \hat{k} + i) \end{aligned}$$

avec :

$$m_{np} = Q \cdot f_{\tau n}(p)$$

où  $Q = \frac{h}{3}$  si  $p=0$  ou  $p = \hat{k}$ ,  $Q = \frac{4h}{3}$  si  $p$  est impair,  $Q = \frac{2h}{3}$  si  $p$  est pair et où  $f_{\tau n}$  est la fonction polynomiale de  $\tau$ .

Comme le fonctionnement d'un axe implique des régimes continus notamment des déplacements à vitesses constantes un filtrage passe haut identique pour chaque variable figurant dans une relation du modèle est appliqué pour que les MTPR aient une valeur finie quand  $\hat{t} \rightarrow \infty$ . La constante de temps électrique comparativement étant très petite par rapport à la constante de temps mécanique, il est possible de considérer que  $u$  et  $i$  varient très rapidement alors  $\omega$  reste quasiment nul. Une fréquence

d'échantillonnage élevée sera donc utilisée lors du tout début des phases de démarrage. L'indice  $fph$  indiquant qu'il s'agit des variables filtrées, la relation (3) devient alors :

$$(7) \quad i_{fph} - \gamma_k(i_{fph}) = \frac{1}{L} \cdot \beta_{0,k}(u_{fph}) + \frac{R}{L} \cdot \alpha_{0,k}(i_{fph})$$

à partir de laquelle  $L$  et  $R$  peuvent être estimés.  $K$  est ensuite estimé en accroissant la fréquence d'échantillonnage pour que les effets de l'inductance  $L$  puissent être négligés et de sorte que  $\omega$  ne puisse plus être considéré comme nul et la structure suivante est utilisée :

$$(8) \quad u(t) = R \cdot i(t) + K \cdot \omega(t)$$

Les autres paramètres sont ensuite estimés pour les mêmes conditions en utilisant avec un second filtrage passe haut disposant d'une fréquence de coupure plus basse que pour l'estimation des paramètres de la structure (7) en utilisant la structure suivante :

$$(9) \quad \omega_{fph} - \gamma_k(\omega_{fph}) = \frac{K}{J_t} \cdot \beta_{0,k}(i_{fph}) + \frac{Y_t}{J_t} \cdot \alpha_{0,k}(\omega_{fph}) + \frac{C_{fst}}{J_t} \cdot \beta_{0,k}(un_{fph})$$

Les structures de modèle mettant en œuvre le MTPR sont relativement coûteuses en termes de calcul, filtrage et détection des moments opportuns aux différentes phases nécessaires à l'identification des paramètres

### 1.3.2.2 Utilisations d'opérateurs de dérivation

Une autre approche, exposée dans (Soderstrom *et al.*, 1997), consiste à utiliser des Opérateurs d'Approximation de la Dérivée (OAD) bien que cela soit peu recommandé en raison des bruits sur les signaux. Ces opérateurs nécessitent moins de calcul que pour la mise en œuvre des MTPR. Quatre OAD noté  $D$  ont été testés :

- « Euler Backward » :  $Df(t) = \frac{f(t) - f(t-h)}{h}$  ;
- différence centrale :  $Df(t) = \frac{f(t+h) - f(t-h)}{2 \cdot h}$  ;
- « Zero forcing 1 » :  $Df(t) = \frac{0,2047 \cdot f(t+h) + 0,886 \cdot f(t) - 1,386 \cdot f(t-h) + 0,2953 \cdot f(t-2 \cdot h)}{h}$  ;
- « Zero forcing 2 » :  $Df(t) = \frac{-0,2953 \cdot f(t+2 \cdot h) + 1,386 \cdot f(t+h) - 0,886 \cdot f(t) - 0,2047 \cdot f(t-h)}{h}$  ;

où  $f$  est le signal et  $h$  la période d'échantillonnage.

Comme le calcul numérique de la dérivée d'un signal directement issu de la mesure est bruité, un filtrage passe bas compatible avec la constante de temps électrique est appliqué au mesures pour réduire le risque d'un biais lors de l'estimation des paramètres. Les relations suivantes sont utilisées successivement pour estimer les paramètres physiques où l'indice  $fpb$  indique que les signaux ont subi le filtrage passe bas :

$$(10) \quad u_{fpb}(t) = L \cdot Di_{fpb}(t) + R \cdot i_{fpb}(t) + K \cdot \omega_{fpb}(t)$$

$$(11) \quad i_{fpb}(t) = \frac{J_t}{K} \cdot D\omega_{fpb}(t) + \frac{Y_t}{K} \cdot \omega_{fpb}(t) + \frac{C_{fst}}{K} \cdot un_{fpb}(t)$$

### 1.3.2.3 Utilisation d'un filtrage passe bas du premier ordre

L'utilisation consiste en la mise en œuvre d'un filtrage passe-bas du premier ordre qui s'exprime pour un signal  $f$  sous la forme  $f_{fpb} = \frac{1}{1+T \cdot s} \cdot f$  où  $s$  est l'opérateur de Laplace,  $T$  la constante du filtre et l'indice  $fbp$  désigne le signal filtré. On obtient ainsi  $\frac{df_{fpb}(t)}{dt} = \frac{f(t) - f_{fpb}(t)}{T}$  et la structure du modèle est alors constituée des deux relations :

$$(12) \quad u_{f_{pb}}(t) = L \cdot \frac{i(t) - i_{f_{pb}}(t)}{T} + R \cdot i_{f_{pb}}(t) + K \cdot \omega_{f_{pb}}(t)$$

$$(13) \quad i_{f_{pb}}(t) = \frac{I_t}{K} \cdot \frac{\omega(t) - \omega_{f_{pb}}(t)}{T} + \frac{Y_t}{K} \cdot \omega_{f_{pb}}(t) + \frac{C_{fst}}{K} \cdot u_{f_{pb}}(t)$$

dont les paramètres physiques seront estimés successivement.

#### 1.3.2.4 Estimation

Une fois les structures de modèles obtenus, il faut procéder à l'estimation des paramètres. Cette étape consiste à faire correspondre un point  $M$  de l'espace des paramètres au point dont les coordonnées sont les paramètres réels du système ou du processus et donc ici de l'axe de machine-outil. Les coordonnées du point  $M$  sont obtenues par la minimisation d'un critère correspondant à une « distance » entre le système ou le processus et le modèle. Parmi la variété des critères de « distance » et des techniques de minimisation, deux seulement ont été étudiés : la méthode des moindres carrés et la méthode des variables instrumentales dont les éléments sont présentés dans (Richalet, 1991).

La méthode des moindres carrés s'applique pour une structure de modèle où les paramètres interviennent de façon linéaire sous la forme  $\vec{y}(k) = \vec{x}(k) \cdot \vec{\theta}$  où  $\vec{y}(k)$  est la sortie expliquée du modèle,  $\vec{x}(k)$  le vecteur des variables explicatives,  $\vec{\theta}$  le vecteur des paramètres à estimer (en posant  $t = k \cdot h$ ). L'estimateur des moindres carrés ordinaires est :

$$(14) \quad \hat{\theta} = [\sum_{k=1}^n \vec{x}(k) \cdot \vec{x}(k)^T]^{-1} \cdot \sum_{k=1}^n \vec{y}(k) \cdot \vec{x}(k)$$

où  $\hat{\theta}$  est le vecteur des paramètres estimés. Comme cette formulation nécessite une inversion de matrice sa forme récursive lui est souvent préférée pour des raisons de complexité algorithmique :

$$(15) \quad \begin{cases} \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1) \cdot \{\vec{y}(k) - \hat{\theta}(k-1)^T \cdot \vec{x}(k)\} \cdot \vec{x}(k)}{\lambda + \vec{x}(k)^T \cdot P(k-1) \cdot \vec{x}(k)} \\ P(k) = P(k-1) - \frac{P(k-1) \cdot \vec{x}(k) \cdot \vec{x}(k)^T \cdot P(k-1)}{\lambda + \vec{x}(k)^T \cdot P(k-1) \cdot \vec{x}(k)} \end{cases}$$

où  $0 < \lambda \leq 1$  est un facteur d'oubli exponentiel qui vaut 1 si toutes les mesures, mêmes anciennes, ont le même poids. Pour l'initialisation,  $P(0) = c \cdot I$  où  $c$  est une constante de grande valeur et  $I$  est la matrice identité et  $\hat{\theta}(0)$  est soit le vecteur nul, soit constitué des valeurs nominales des paramètres.

L'autre méthode testée est celle des variables instrumentales qui relève des techniques de corrélation basée sur des considérations statistiques. Elle consiste à remplacer la solution des moindres carrés par :

$$(16) \quad \hat{\theta} = [\sum_{k=1}^n \vec{v}(k) \cdot \vec{x}(k)^T]^{-1} \cdot \sum_{k=1}^n \vec{y}(k) \cdot \vec{v}(k)$$

Où  $\vec{v}$  est le vecteur des variables instrumentales tel que  $\sum_{k=1}^n \vec{v}(k) \cdot \vec{x}(k)^T$  soit inversible et que  $\vec{v}$  soit le plus corrélé possible à  $\vec{x}$ . En général, soit  $\vec{v}$  est généré par un modèle auxiliaire simulé à partir de l'entrée, soit  $\vec{v}$  est obtenu par un décalage de  $l$  pas d'échantillonnage des sorties passées. Ceci implique qu'une sortie de la structure est exprimée en fonction d'elle-même. Dans les structures de modèles testées, seules celles aux MTPR répondent à cette condition. Pour la même raison que pour les moindres carrés, la forme récursive est préférée avec les mêmes notations et conditions d'initialisations.

$$(17) \quad \begin{cases} \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1) \cdot \{\vec{y}(k) - \hat{\theta}(k-1)^T \cdot \vec{x}(k)\} \cdot \vec{v}(k)}{\lambda + \vec{x}(k)^T \cdot P(k-1) \cdot \vec{v}(k)} \\ P(k) = P(k-1) - \frac{P(k-1) \cdot \vec{v}(k) \cdot \vec{x}(k)^T \cdot P(k-1)}{\lambda + \vec{x}(k)^T \cdot P(k-1) \cdot \vec{v}(k)} \end{cases}$$

Un exemple d'application est donné pour (7) où pour l'estimateur des moindres carrés les vecteurs sont :

$\vec{y}(k) = (i_{fph} - \gamma_k(i_{fph}))$ ;  $\vec{x}(k) = (\beta_{0,k}(u_{fph}) \quad \alpha_{0,k}(i_{fph}))$  et  $\vec{\theta} = \begin{pmatrix} 1 \\ L \\ R \\ L \end{pmatrix}$  et où pour l'estimateur des variables instrumentales  $\vec{v}(k) = (\beta_{0,k}(u_{fph}) \quad \alpha_{0,k-l}(i_{fph}))$ .

### 1.3.2.5 Estimation des paramètres par réseaux de neurones artificiels

Les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) sont mis en œuvre dans une grande variété d'applications pour leur aptitude à traiter des problèmes de classification ou de reconnaissance de formes (Norgaard *et al.*, 1996 ; Flynn *et al.*, 1997). Cette propriété est apparue intéressante pour faire correspondre aux formes des signaux  $u$ ,  $i$  et  $\omega$  les valeurs des paramètres physiques pour une même sollicitation correspondant à un démarrage en avance rapide dont le profil de consigne est constant. Le signal  $u$  évolue également puisqu'il est généré par le convertisseur de puissance à partir des données de régulation.

Les RNA sont constitués de neurones formels. Chaque neurone formel effectue une somme pondérée de ses entrées puis calcule sa sortie en fonction de cette somme comme représenté sur la Figure 6. Cette fonction, appelé fonction d'activation est généralement préétablie. Les entrées sur un neurone peuvent être les données provenant d'éléments extérieurs au RNA ou bien les sorties d'autres neurones. La sortie d'un neurone peut être distribuée sur d'autres neurones ou constituer une sortie du modèle réalisé par le RNA. La structure d'un modèle de RNA est définie par les fonctions d'activation de ses neurones formels et les connexions entre les entrées et ses neurones formels et les connexions entre ses neurones formels. Les pondérations sur les entrées de chaque neurone du RNA constituent les paramètres du modèle. Une architecture de RNA à couches est présentée sur la Figure 7. Pour ce type de réseau, les neurones formels de la couche d'entrées ont pour fonction d'activation la fonction identité ou bien opèrent un prétraitement sur l'entrée.

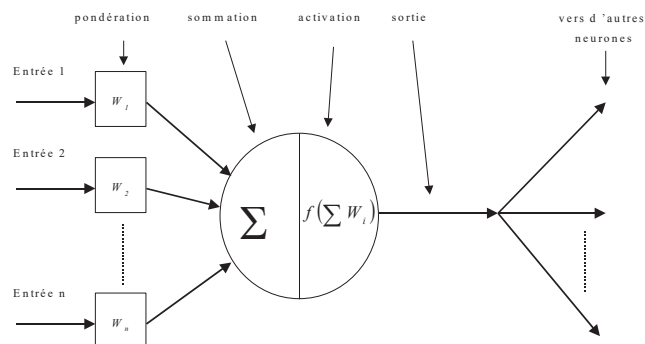


Figure 6. Schéma d'un neurone formel

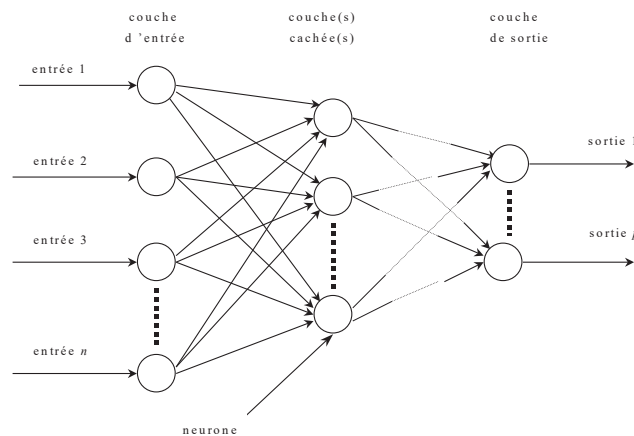


Figure 7. Schéma d'un réseau de neurones artificiels à couches



Les valeurs de ses paramètres sont ajustées par des algorithmes d'apprentissage.

Pour reconnaître des formes, il faut apprendre à les distinguer. Pour cela, nous avons constitué des jeux d'exemples pour lesquelles les valeurs des paramètres physiques sont fixées dans des plages de variations données. Ces exemples ont été obtenus par des simulations d'un axe et de sa régulation pour une consigne de démarrage invariante. Pour chaque exemple, nous avons enregistré les valeurs des paramètres ainsi que les valeurs des signaux  $u$ ,  $i$  et  $\omega$  à des instants préétablis et toujours les mêmes après la consigne de démarrage. Ces jeux d'exemples associant les entrées : les valeurs des signaux  $u$ ,  $i$  et  $\omega$  à des instants préétablis aux sorties : les valeurs des paramètres physiques, nous ont permis de mettre en œuvre un apprentissage supervisé. Ces apprentissages consistent en la modification des poids sur l'ensemble du RNA en fonction de l'erreur de sortie. Une étude de l'état de l'art dans le domaine nous a conduits à choisir une structure de RNA à couches avec un apprentissage basé sur un algorithme de rétro-propagation du gradient qui est stoppé lorsque les erreurs commises par le RNA passent en dessous d'un seuil fixé au préalable. L'étape suivante a consisté en la vérification des performances de l'estimateur ainsi obtenu. Pour cela, des jeux d'exemples qui n'ont pas servis lors de la phase d'apprentissage ont été utilisés. En effet, lorsque l'apprentissage a permis au RNA de converger sous le seuil d'erreur, cela peut être dû à un trop grand nombre de neurones et donc de pondérations pouvant conduire à une « surcaractérisation » ; c'est-à-dire que le RNA a fait du « par cœur » sur les jeux d'exemples ayant servis à son apprentissage mais est un mauvais interpolateur. Il faut alors recommencer un apprentissage avec un RNA comportant moins de neurones dans la ou les couches cachées. Si le RNA ne converge pas vers le seuil d'erreur, c'est qu'il n'a pas assez de neurones et donc de pondérations ou bien que l'algorithme d'apprentissage ne parvient pas à sortir d'un minimum local. Dans le deux cas, il faut relancer un apprentissage, respectivement, avec des neurones supplémentaires ou des valeurs initiales de pondérations différentes. Ces pondérations initiales sont souvent affectées de valeurs aléatoires.

### 1.3.3 Bilan sur les des méthodes d'estimation des paramètres physiques testées

Les méthodes présentées dans le paragraphe 1.3.2 ont été testées, dans un premier temps, à l'aide du modèle d'axe de MOCN asservi présenté dans le paragraphe 1.3.1 et simulé à l'aide de Matlab-Simulink™ avec ou sans bruits blancs sur les mesures des signaux  $u$ ,  $i$  et  $\omega$ . Les résultats obtenus ont été présentés principalement dans [ThDesforges, C2, C3]. Le bilan de ces tests nous a alors conduits à écarter :

- la méthode d'estimation par RNA à cause principalement des difficultés rencontrées pour l'apprentissage des RNA avec des signaux bruités (même après des filtres passe-bas),
- la méthode établissant des structures de modèles aux MTPR car elle nécessite deux filtres passe-haut, le calcul des intégrales pour les moments temporels partiels, l'estimation des paramètres à partir de trois structures pour une estimation encore imprécise de  $C_{fst}$  due au filtrage passe-haut et qui, pour être améliorée, nécessite une quatrième structure

$$C_{fst} = \frac{\sum_{k=n_1}^{k=n_2} (K.i(k) - Y_t.\omega(k))}{n_2 - n_1 + 1}$$
 où l'horizon d'observation est  $[n_1 \cdot h_m \quad n_2 \cdot h_m]$  avec  $h_m$  le pas d'échantillonnage retenu pour l'estimation de la structure (9).

Les méthodes qui ont donc été privilégiées pour cette configuration d'axe de MOCN sont :

- celle mettant en œuvre des opérateurs de dérivations, avec une préférence pour les « Zero Forcing » car ils se sont avérés plus précis avec des moyennes d'erreurs relatives plus faibles

mais même si les écarts types sont plus importants. Ceci est en partie expliqué par un calcul faisant appel à quatre valeurs au lieu de deux,

- celle utilisant un filtrage passe-bas du premier ordre.

Pour ces deux méthodes, les signaux sont traités par des filtres passe-bas préalablement à l'application des estimateurs des moindres carrés pour chacune des structures (10) et (11) ou (12) et (13). Cependant, la période d'échantillonnage ( $10^{-6}$  s) et la constante de temps du filtre ( $10^{-5}$  s) utilisées pour (10) et (12) sont nettement inférieures celles utilisées pour (11) et (13) (respectivement  $10^{-2}$  s et 0,2 s). Ces méthodes d'estimation des paramètres physiques ont été aussi mises en œuvre sur des systèmes physiques et présentées dans [ThDesforges, C4, C5, A2].

L'estimation des paramètres physiques d'un axe de machine-outil constitue l'information principale fournie par la surveillance. Nous y avons alors joint le concept de capteur intelligent introduisant des fonctionnalités supplémentaires permettant notamment de faciliter l'intégration dans les FMS et de fiabiliser l'information élaborée.

#### 1.4 Application du concept de capteur intelligent

Le qualificatif intelligent a été associé aux capteurs au début des années 1980. Il s'agissait alors principalement d'instruments dotés d'un processeur introduisant une capacité *in situ* de traitement numérique d'information pour l'implantation de fonctions non réalisables à des coûts, des masses ou des consommations d'énergie raisonnables analogiquement ; mais aussi dotés d'une interface de communication numérique bidirectionnelle. Le CIAME (Comité Interprofessionnel pour l'Automatisation de la MEsure) en donne la définition suivante : « On dénomme "capteurs intelligents" les capteurs intégrant, en plus de leurs fonctions standards de transduction et de conditionnement, une unité de traitement numérique, qu'elle soit sous la forme d'un microprocesseur ou autre, et une interface rendant possible la communication avec un bus bidirectionnel numérique » (CIAME, 1987). Cette définition correspond à l'architecture matérielle présentée sur la Figure 8 et tirée de (Robert *et al.*, 1993).

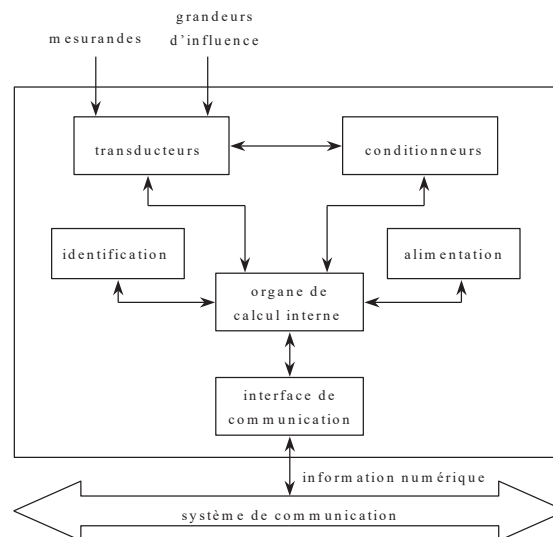


Figure 8. Architecture matérielle d'un capteur intelligent

Aujourd'hui, il s'agirait d'un capteur connecté doté de fonctionnalités particulières. Ces fonctionnalités peuvent être réparties en 4 groupes :

- celles liées à la mesure,
- celles liées à la validation,

- celles liées à la communication,
- celles liées à la configuration,

comme cela est représenté sur la Figure 9 tirée de (Robert *et al.*, 1993).

Les fonctionnalités liées à la mesure sont évidemment primordiales pour un capteur et ont été présentées dans le paragraphe 1.3 où, dans le cas de la surveillance d'axe de MOCN traité, elles consistent en l'estimation des paramètres physiques d'un axe de MOCN. L'autre groupe de fonctionnalités majeures d'un capteur intelligent est celui associé à la validation. Ces fonctionnalités de validation ont été introduites pour éviter la diminution de la fiabilité due à l'introduction des nombreux capteurs dans des systèmes devenant plus complexes pour répondre à des exigences de flexibilité et de réactivité croissantes.

Cette validation a été réalisée en deux étapes : une première étape de validation des mesures à partir desquelles les paramètres physiques sont estimés et une seconde étape de validation des paramètres estimés.

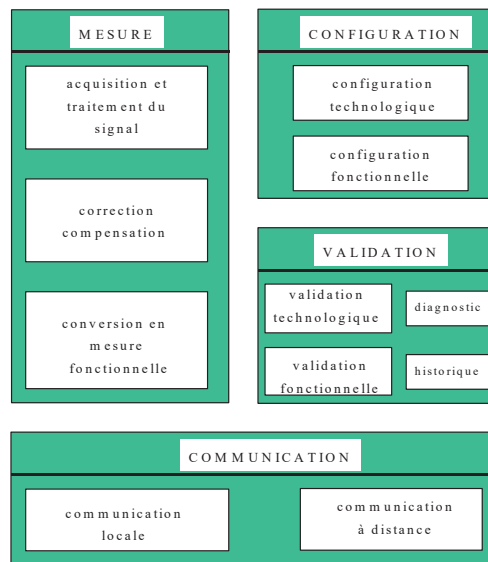


Figure 9. Fonctions internes d'un capteur intelligent

#### 1.4.1 Validation des mesures

La validation de mesure est une fonction prépondérante des capteurs intelligents. Cette fonction peut être définie comme l'opération consistant à engendrer une information représentant une grandeur physique qui sera considérée crédible et fiable par les utilisateurs (opérateurs, superviseurs, systèmes de diagnostic, systèmes de régulation...) (Zwingelstein, 1995). Après une étude des méthodes existantes, la mise en œuvre de redondance matérielle et analytique est apparue pertinente pour l'application ou les mesures sont utilisées pour l'estimation de paramètres physiques d'un axe de MOCN. La redondance matérielle consiste à utiliser plusieurs capteurs dont la fonction est de mesurer la même grandeur physique. La redondance analytique consiste à utiliser les relations (modèles) qui existent entre les mesures de grandeurs physiques dépendantes qu'elles soient ou non de même nature. Les modèles sont généralement choisis pour leur simplicité dans le cadre d'applications temps-réel. Ces modèles peuvent être aussi choisis en fonction de la précision des estimations de la grandeur physique qu'ils fournissent. L'ordre de la redondance correspond au nombre de mesures et/ou d'estimations de la grandeur physique. Il s'agit ensuite de vérifier la cohérence entre les sources (mesures et/ou estimations) en comparant deux à deux les sources. Lorsque l'écart est supérieur à un seuil une incohérence est détectée. Une troisième

source est au moins nécessaire pour isoler la source défaillante. Afin d'éviter des défaillances de mode commun pour les redondances matérielles, les concepteurs choisissent généralement des capteurs de technologies différentes ou provenant de fournisseurs différents. Ceci a permis, dans notre cas d'étude, de réaliser la fonction d'autodiagnostic du « capteur intelligent » où trois mesures sont nécessaires à l'estimation des paramètres physiques figurant dans la structure formée des relations (1) et (2).

La proposition qui a été faite quant à la construction des redondances est pour la redondance matérielle :

- d'ajouter un capteur de courant sachant qu'un premier capteur de courant est présent et est utilisé dans la boucle de régulation de courant (voir Figure 5) pour lequel nous désignons ses mesures par  $i_1(t)$  et par  $i_2(t)$  celle du capteur rajouté,
- comme aucun capteur de tension n'est présent sur les axes des MOCN, de mettre en place deux capteurs différents, afin d'éviter les défaillances de mode commun : un placé aux bornes du convertisseur de puissance qui fournit les mesures  $u_1(t)$  et l'autre capteur qui mesure la consigne de tension qui, multipliée par le gain du convertisseur, fournit les mesures  $u_2(t)$  ceci parce que le convertisseur de puissance peut être assimilé à un gain,
- d'utiliser la mesure de la vitesse angulaire  $\omega_1(t)$  de l'arbre moteur délivrée par la tension d'une génératrice tachymétrique et servant à la régulation en vitesse (voir Figure 5) et d'utiliser, en la dérivant par rapport au temps, la mesure  $x(t)$  délivrée par le capteur incrémental de position par la relation  $\omega_2(t) = \frac{1}{r} \frac{dx(t)}{dt}$  où  $r$  est le rapport de réduction entre l'arbre moteur et la table.

Cependant, ceci ne constitue que deux sources pour chaque mesure et ne permet pas d'isoler la source défaillante. Nous avons donc aussi défini une redondance analytique mettant en œuvre un modèle simple basée sur la relation (1) car il s'agit de la relation pour laquelle les paramètres physiques sont estimés avec la meilleure précision par l'une ou l'autre des deux méthodes retenues. Cependant, les paramètres du système sont considérés comme variables mais leur dynamique est lente. Les valeurs des paramètres du modèle servant à l'estimation des grandeurs physiques peuvent donc être réactualisées après chaque nouvelle estimation des paramètres physiques de l'axe. Deux estimations sont obtenues pour chacune des trois variables (courant d'induit, tension et vitesse) notées avec un accent circonflexe. La redondance obtenue est représentée sur la Figure 10 pour le courant d'induit. Ce schéma est le même pour les deux autres grandeurs et sont obtenus par permutation des lettres correspondants aux variables.

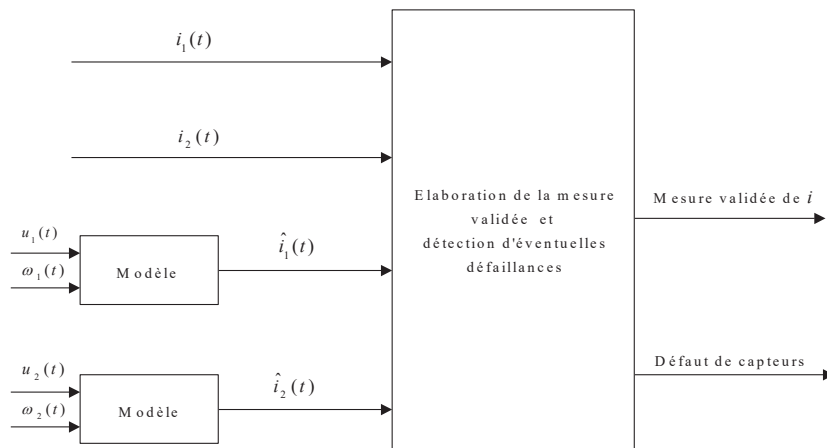


Figure 10. Schéma de redondance pour une mesure validée de courant

Les résidus sont ensuite construits pour toutes les combinaisons entre les sources (mesures et estimations) afin d'isoler une éventuelle source défaillante. Pour cela, la moyenne  $\bar{r}$  et l'écart type de  $\sigma_r$  chaque résidu  $r$  sont calculés pour un nombre d'échantillons  $n > 30$ . Pour cela, on compare  $\bar{r}$  à une

population parente supposée normale au sens statistique du terme à une valeur de référence  $m$  (Ragot *et al.*, 1990). Dans le cas qui nous intéresse ici, les échantillons des résidus doivent avoir une moyenne nulle,  $m = 0$ . Alors, on calcule la variable  $q = \frac{\bar{r}-m}{\sigma_r/\sqrt{n}}$  qui suit une loi de Student à  $n - 1$  degrés de liberté. L'hypothèse d'identité entre  $\bar{r}$  et  $m$  est éprouvée par un test bilatéral au seuil de confiance  $\alpha$  à prédéterminer  $-q_{1-\alpha/2} < q < q_{1-\alpha/2}$  où  $q_{1-\alpha/2}$  peut être défini à partir d'une table. Pour l'écart type comme  $n > 30$  sont estimation par  $\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (r(k)-\bar{r})^2}{n}}$  peut être confondue avec sa valeur vraie. Pour déceler une perturbation anormale sur une source, on compare  $\sigma_r$  à celui d'une population parente dont la valeur prédéterminée ou souhaitée est  $\sigma$ . En supposant cette population de référence normale, la variable  $v = \frac{(n-1)\sigma_r^2}{\sigma^2}$  suit une loi du  $\chi^2$  à  $n-1$  degrés de liberté. L'hypothèse d'identité de  $\sigma_r$  à  $\sigma$  est éprouvée par un test bilatéral au seuil de confiance  $\alpha$  :  $0 < v < \chi_{1-\alpha}^2$  où  $\chi_{1-\alpha}^2$  est défini à partir d'une table.

Si, pour un de ces deux tests, les seuils sont franchis, une « incohérence » entre les deux sources est déclarée. L'isolation des sources défectueuses est effectuée ensuite par un algorithme présentée dans [ThDesforges]. Cet algorithme permet d'établir un autodiagnostic du « capteur intelligent » ainsi que son état fonctionnel sur sa capacité à fournir des mesures validées.

Une fois que les sources cohérentes sont identifiées, les mesures validées à partir desquelles les paramètres physiques sont estimés doivent être établies. Les choix suivants ont été effectués et justifiés dans [ThDesforges] privilégiant les mesures obtenues directement plutôt que les estimations soumises aux biais dus aux erreurs d'estimation des paramètres physiques :

- si les 2 mesures de  $x$  ( $i$ ,  $u$  ou  $w$ ) sont cohérentes, la mesure validée  $x_v$  est calculée pour chaque échantillon par :  $x_v(k) = \frac{1}{2}(x_1(k) + x_2(k))$ ,
- si une mesure est cohérente avec au moins une estimation, la mesure validée est cette mesure cohérente,
- s'il n'y a aucune mesure cohérente, alors il faut qu'au moins les 2 estimations  $\hat{x}_1$  et  $\hat{x}_2$  soient cohérentes et la mesure validée  $x_v$  est calculée pour chaque échantillon par :

$$x_v(k) = \frac{1}{2}(\hat{x}_1(k) + \hat{x}_2(k)),$$

- sinon, il y a une déclaration de défaut du capteur nécessitant la maintenance de chaînes mesures.

Ainsi, le « capteur intelligent » est capable de fournir des estimations des paramètres physiques même quand deux capteurs fournissant une mesure d'une même grandeur sont défectueux ou bien même si un capteur est défectueux pour chacune des grandeurs. Cependant, l'état dégradé doit être signalé car cela peut altérer la précision des estimations des paramètres physiques. Ces développements sur la validation des mesures ont été présentés dans [C4, C6, C8]

#### 1.4.2 Validation des paramètres estimés

L'approche qui a été retenue consiste, après estimation des paramètres au moyen des mesures validées, à soumettre le modèle estimé du système aux entrées mesurées du système et à construire les écarts entre les sorties mesurées sur le système et les sorties du modèle estimé. En effet, lorsque la structure du modèle, la méthode d'estimation, la représentation des perturbations et le retard pur divisé par la période d'échantillonnage ont été correctement choisis, alors les écarts entre les sorties du système et les sorties du modèle correspondent à un bruit blanc (Landau, 1993). Il convient alors de valider les paramètres associés à la structure du modèle à l'aide d'un test de blancheur exposé dans (Landau, 1993). Ce test

doit être appliqué à chacune des sorties voire, en considérant au moins les relations (1) et (2), à chacune des structures utilisées pour l'estimation de ces paramètres.

Lorsque le test de blancheur n'est pas réussi, cela peut être dû à un changement de comportement provoqué par l'apparition d'un défaut pouvant être associé à un changement de structure de modèle. C'est notamment le cas si un jeu apparaît dans la chaîne de transmission de l'axe.

#### 1.4.3 Estimation du jeu mécanique

Parmi les différentes méthodes proposées dans la littérature pour la détection et/ou l'estimation de jeux mécaniques, celle que nous avons retenue est issue de (Podsedkowski, 1997). Cette méthode est basée sur la mesure de la vitesse des deux arbres. Lors d'une variation de vitesse, lorsqu'un arbre n'est plus entraîné par l'autre, une différence de vitesse existe entre les deux jusqu'à ce que le jeu soit rattrapé. L'intégrale de cette différence entre ces deux instants fournit la valeur du jeu. Pour obtenir une bonne précision sur l'estimation du jeu, l'arbre moteur doit avoir une vitesse alternative. Cette condition de vitesse est obtenue sur les MOCN lors d'un changement de sens de déplacement du coulisseau. Ce changement de sens permet d'estimer le jeu mécanique de l'axe. La méthode pourrait donc être appliquée à un axe de MOCN. En effet, cet axe étant équipé d'une génératrice tachymétrique, il est possible de déterminer la position de l'arbre moteur en intégrant le signal de la génératrice. La position du coulisseau ou de la vis à billes est directement fournie par le capteur de position. Le maximum de la différence entre la position de l'arbre moteur multipliée par le rapport de réduction et la position du coulisseau ou de la vis à billes permet de déterminer la valeur totale des jeux situés entre le moteur et le coulisseau ou la vis à billes. Ceci est exprimé par les relations (18) et (19).

$$(18) \quad \Delta(t) = x(t) - r \cdot \int_{T_0}^t \omega_1(\rho) \cdot d\rho$$

où  $\omega_1$  est la vitesse angulaire de l'arbre moteur,  $x$  est la position délivrée par le capteur incrémental,  $T_0$  est l'instant d'une prise origine machine où  $x(T_0) = 0$ ,  $t$  est l'instant courant et  $r$  le rapport de réduction. Le jeu peut alors être estimé par :

$$(19) \quad jeu = \max|\Delta(t)| \text{ pour } t \in [T_1, T_2]$$

où  $[T_1, T_2]$  serait un intervalle de temps pendant lequel un changement de direction du coulisseau serait programmé. Ceci a été présenté dans [C3].

Le jeu mécanique est un problème en usinage car sa présence impacte directement les dimensions obtenues après usinage. Des systèmes mécaniques permettant d'éliminer les jeux sont généralement disposés sur les machines. La détection d'un jeu entraîne donc une action corrective de la maintenance pour le supprimer. Cependant, le jeu de transmission n'est pas le seul défaut à détecter.

#### 1.4.4 Détection des défauts et diagnostic

D'autres défauts peuvent être associés aux évolutions des valeurs des paramètres physiques (voir Tableau 1) ; mais avant d'effectuer un diagnostic, il faut détecter s'il y a un défaut. Les détecteurs sont mis en œuvre à partir des valeurs estimées de chaque paramètre qui sont confrontées à des seuils dont le franchissement signifie la présence d'un défaut sur lesquels la maintenance doit agir. Des tests séquentiels comme le test de Wald peuvent être mis en œuvre nécessitant l'enregistrement des valeurs estimées passées de ces paramètres.

L'étape suivante est le diagnostic dont le but est d'assister la maintenance dans sa recherche de l'origine du défaut. Parmi, les développements proposés dans la littérature, ceux de Pfeufer et Ayoubi (1997) semblent particulièrement bien adaptés. En effet, la méthode est destinée à des systèmes électromécaniques dont les paramètres physiques sont estimés. Une base de connaissance associant les

origines de défaut et leur signature sur les changements de valeurs des paramètres est définie et sert à l'apprentissage d'un système de classification neuro-flou. Toutefois, ne disposant pas d'un axe de MOCN suffisamment ouvert pour pouvoir introduire des défauts sans risque pour la machine et analyser leur signature sur les paramètres physiques, nous n'avons pas été en mesure d'implémenter cette méthode. Nous avons cependant pu faire des acquisitions à l'aide d'un banc test (voir schéma et image de la Figure 11) et un axe d'une MOCN mais en ayant accès, pour cette dernière, qu'à des mesures de courant et vitesse et donc à l'estimation des paramètres figurant dans la relation (2).

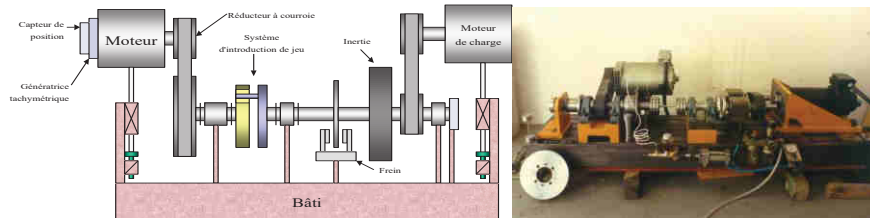


Figure 11. Schéma et image du banc de test

#### 1.4.5 Architecture fonctionnelle du capteur intelligent

La construction des différentes fonctions permettant la mise en œuvre d'une surveillance pour les MOCN a été réalisée selon une démarche ascendante. En effet, la démarche proposée consiste en l'identification des grandeurs significatives pour la mise en œuvre de cette surveillance, puis à la recherche des méthodes les plus appropriées pour les élaborer. Cependant, elle peut être insuffisante en termes de confiance en ces informations. C'est pour cela que des fonctions contribuant à l'accroissement de cette confiance associées au concept de capteur intelligent sont proposées. Nous avons donc développé les fonctions contribuant à la validation de l'information élaborée mais aussi à l'autodiagnostic du capteur intelligent lui-même. L'architecture fonctionnelle que nous avons définie à l'aide du formalisme SA-RT (*Structured Analysis – Real Time*) permet de décrire les séquencements des fonctions (ou activités) dans [ThDesforges]. Une représentation simplifiée de cette architecture est présentée sur la Figure 12.

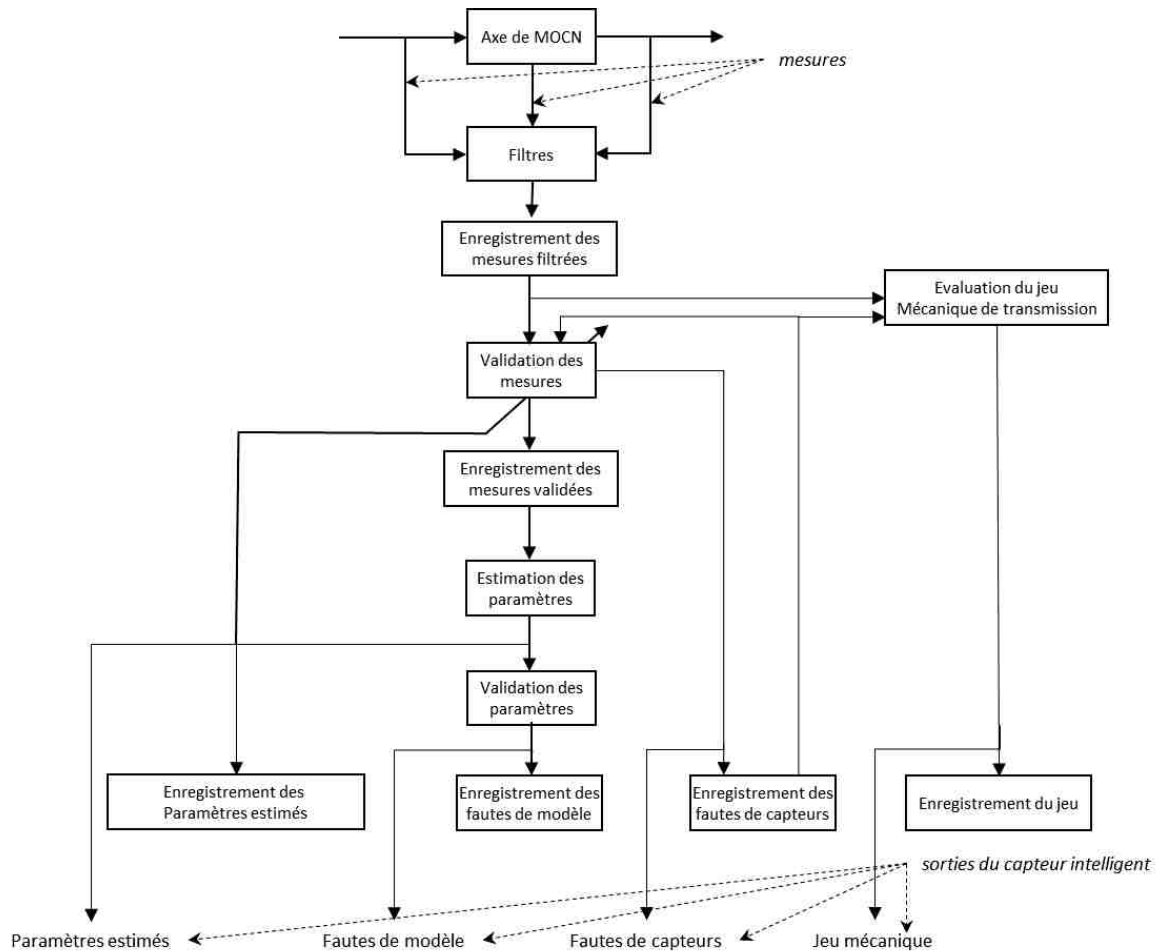


Figure 12. Architecture fonctionnelle simplifiée

## 1.5 Conclusion sur la surveillance en fabrication mécanique mise en œuvre par capteur intelligent

Dans ces travaux, nous avons proposé une méthode pour la mise en œuvre de la surveillance en fabrication mécanique. L'étude de la littérature du domaine nous a conduits à nous intéresser à la surveillance des machines. Cette méthode comporte l'identification des grandeurs significatives ainsi que l'évaluation de méthodes pour les déterminer. Afin d'améliorer la confiance dans ces grandeurs, le concept de capteur intelligent est exploité pour ses fonctionnalités liées à la validation et l'autodiagnostic.

Les valeurs estimées des paramètres physiques d'un axe de MOCN peuvent être utilisées pour une aide à son diagnostic ou l'historique de ces mêmes valeurs exploitées en vue d'en établir un pronostic par, notamment, extrapolation (Prakash *et al.*, 2018). Une utilisation des paramètres physiques explorée dans le cadre de travaux en collaboration avec Gilles Desein, fut la prédiction des erreurs de trajectoire d'outil impactant directement les dimensions obtenues des pièces usinées. Par simulation, nous avons pu montrer que des variations de paramètres entraînaient des changements dans la poursuite des trajectoires d'outil programmées. Une proposition de correction de ces erreurs de trajectoire a été, en première intention, la correction dite « miroir » supposant que la fonction de transfert d'un axe de MOCN puisse être assimilée à la fonction identité. Comme ce n'est pas le cas, cette correction, bien qu'améliorant la précision des trajectoires situées loin des zones de changement de direction des axes, entraîne des oscillations de la trajectoires spatiales pouvant être indésirables au niveau des zones de



changement de direction [C5, c3, c4] pouvant nécessiter d'une autre façon de générer les consignes de position. La commande par platitude, exploitant les actualisations des paramètres estimés, pourrait être une réponse (Rotella et Carrillo, 1999).

Cependant, ce concept offre d'autres possibilités notamment grâce à la communication numérique bidirectionnelle. En effet, cette capacité facilite l'intégration des capteurs intelligents dans les FMS à l'aide de réseaux de terrain. Plusieurs types d'architectures sont possibles (Pfeifer *et al.*, 1995 ; Altintas *et al.*, 1996). La mise en œuvre de capteurs mais aussi d'actionneurs intelligents dans les FMS permet, grâce à leur capacité de calcul numérique interne, l'introduction d'un niveau décisionnel supplémentaire dont l'exploitation peut permettre d'accroître l'autonomie du FMS qui en est doté. Les travaux suivants ont visé à développer et à évaluer les apports des capteurs et actionneurs intelligents dans les FMS.

## 2 Conduite et surveillance distribuées des machines-outils et de l'usinage par la mise en œuvre de capteurs/actionneurs intelligents

Toujours en considérant le contexte dans lequel les entreprises, pour rester compétitives, cherchent à répondre au bon moment, au juste besoin, au meilleur prix et au niveau qualité désiré ; l'amélioration de leur réactivité est un enjeu essentiel. Si la flexibilité permet de ménager des degrés de liberté dans la gestion des activités manufacturières, la réactivité est obtenue par l'exploitation de ces degrés de liberté de manière appropriée vis-à-vis de la situation. Une première étape de mes travaux de recherche, présentée dans la partie 1 de ce parcours, a contribué à la perception de la situation et notamment en l'amélioration de sa fidélité par rapport à la situation réelle. La deuxième partie de mon parcours recherche, faisant suite à mon recrutement en qualité de Maître de conférences à l'ENIT, est consacrée à des travaux contribuant à l'amélioration de la réactivité en exploitant des degrés de liberté aménagés pour les besoins de flexibilité.

L'amélioration de la réactivité au niveau des processus et de leur contrôle permet de garantir l'obtention des produits ou services conformes à leurs spécifications. Elle requiert des informations relatives au déroulement des opérations pour réagir de manière appropriée. Dans le cas des machines-outils, la réactivité consiste principalement à assurer la réalisation des opérations de production tout en assurant la qualité des pièces et à réduire le nombre ou la durée des arrêts lorsqu'un problème est détecté. L'amélioration de la réactivité des machines-outils a donné lieu au développement de fonctions pour la surveillance et le diagnostic des machines (Harris *et al.*, 1990 ; Isermann, 1993), pour la surveillance du processus d'usinage (Dan et Mathew, 1990) et pour l'accommodation ou l'adaptation (Carrillo et Rotella, 1997 ; Liu *et al.*, 2001). Ces fonctions contribuent à l'amélioration de la réactivité de différentes façons. Les fonctions de diagnostic permettent de réduire les temps d'arrêt grâce à l'identification des origines des défauts limitant ainsi les temps de recherche des opérateurs de maintenance. Les fonctions de surveillance du processus d'usinage permettent d'arrêter l'usinage lorsque des problèmes sont détectés permettant ainsi de limiter les dommages pouvant être causés à la pièce usinée ou à la machine. Les fonctions d'accommodation ou d'adaptation peuvent nécessiter les informations produites par les fonctions de surveillance de l'usinage et permettent la poursuite des opérations d'usinage malgré les dégradations du processus en garantissant l'atteinte d'objectifs principaux de la production.

Toutefois, la mise en œuvre de telles fonctions nécessite souvent des capteurs, des unités de traitement, des logiciels et des interfaces spécifiques. Par conséquent, ces mises en œuvre sont coûteuses. Elles sont également coûteuses parce que les systèmes de contrôle-commande des MOCN proposés par les fabricants sont centralisés (voir Figure 13) et ne sont pas assez ouverts malgré les nombreux développements dans ce domaine (Molina *et al.*, 2005). Dans ces conditions, ces trois types de fonctions ne sont rarement mises en œuvre par une même MOCN.

La proposition consiste à définir des systèmes de contrôle-commande de MOCN intégrant des capteurs et actionneurs intelligents. Une première phase exploratoire a été consacrée à l'étude de l'intégration d'instruments intelligents dans ces systèmes de contrôle-commande pour la mise en œuvre de quelques fonctions qui ne sont pas traditionnellement proposées par les fabricants de MOCN. Les deux phases suivantes, ont été réalisées dans le contexte du réseau d'excellence I\*PROMS (*Innovative Production Machines and Systems*) du programme européen FP6-NMP. La deuxième phase a été dédiée à la définition des fonctionnalités de surveillance de la machine, de l'usinage et d'accommodation ainsi des rôles des éléments assurant la surveillance et la conduite de la machine et de l'usinage. Enfin, une

troisième phase a consisté à proposer un cadre de conception d'architectures fonctionnelles et matérielles pour les MOCN toujours basées sur des capteurs et actionneurs intelligents.

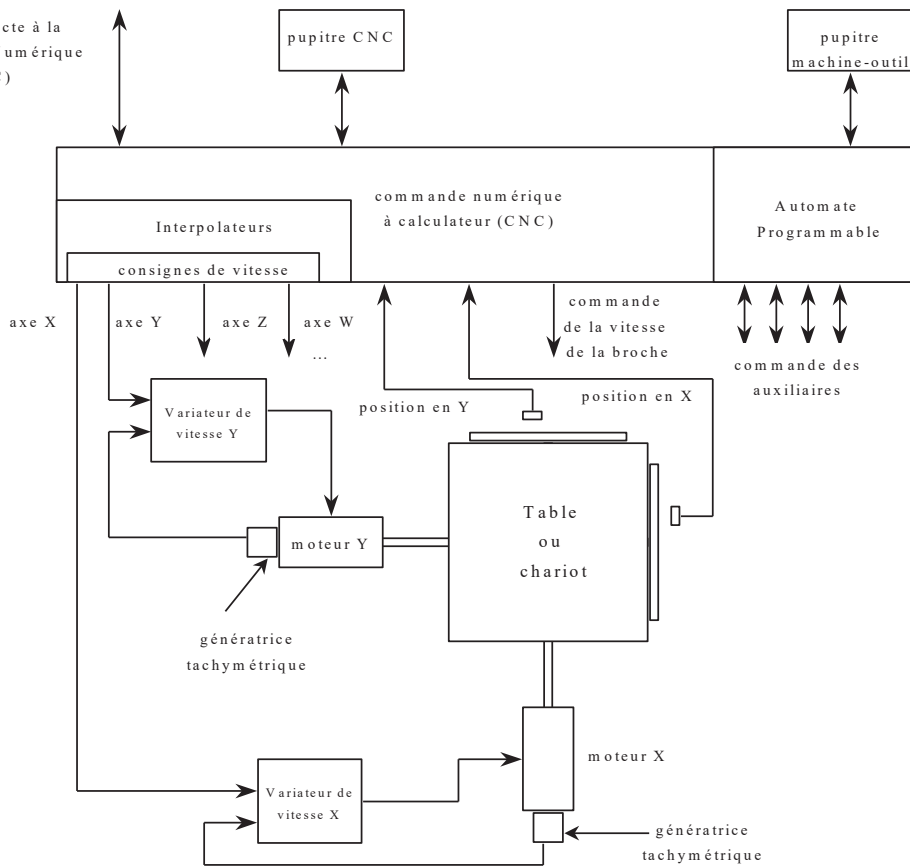


Figure 13. Organisation générale d'une machine à commande numérique

## 2.1 Intégration d'instruments intelligents dans les MOCN

Les architectures des MOCN sont généralement constituées en deux niveaux : le premier consacré au contrôle-commande et le second consacré aux éléments opératoires. Les éléments opératoires, constitués principalement de la broche et des axes, reçoivent les consignes de position ou de vitesse du niveau de contrôle-commande calculées à partir des programmes pièces. Ces ordres sont exécutés par les axes et la broche. Des capteurs de position et de vitesse envoient de l'information vers ce niveau de contrôle-commande. De fait, la partie opérative n'a aucun rôle décisionnel hormis l'asservissement des motorisations. Dans cette structure, la partie de contrôle-commande de la MOCN est le seul centre de décision auquel l'automate programmable est également assujéti. Un inconvénient majeur est que ce système centralisé peut difficilement accueillir de nouvelles fonctionnalités sans l'aide du fabricant de la machine ou du fournisseur du système de contrôle commande. Des études ont été menées visant des architectures ouvertes et modulaires de pour le contrôle-commande des MOCN (Altintas *et al.*, 1996 ; Schofield et Wright, 1998). Bien que permettant d'intégrer de nouvelles fonctionnalités, les propositions correspondent à des formes de centralisation de la décision. Elles s'avèrent donc peu pertinentes pour l'accroissement de la flexibilité et de la réactivité des MOCN.

### 2.1.1 Un nouveau niveau décisionnel

L'idée, issue du projet CAID (Capteurs et Actionneurs Intelligents Distribués) interne au LGP dont Laurent Geneste et Abdallah Habbadi étaient à l'initiative dans le cadre du mémoire d'ingénieur CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers) de François Soler soutenu en 1998, a été d'exploiter les

capacités de traitement interne des capteurs et actionneurs intelligents pour créer un niveau décisionnel intermédiaire situé entre la Commande Numérique à Calculateur (CNC) et les éléments opératoires. Les capteurs « intelligents » sont conçus pour observer les procédés de manière plus fidèle à la réalité que les capteurs et actionneurs « traditionnels » (Robert *et al.*, 1993). Les actionneurs « intelligents » peuvent réagir localement à des changements du procédé à partir d'informations qu'ils ont calculées où provenant d'autres instruments (Staroswiecki et Bayart, 1994). Toutefois, la seule mise en œuvre de capteurs et d'actionneurs « intelligents » peut ne pas être pleinement satisfaisante, notamment lorsque des perturbations impactent le fonctionnement nominal du procédé du fait de leurs comportements fortement prédéterminés.

Une façon d'améliorer cette situation consiste à accroître l'autonomie de décision au niveau le plus proche du procédé (celui des capteurs et actionneurs) pour pouvoir prendre plus rapidement les bonnes décisions lorsque des perturbations surviennent. En effet, dans les systèmes décisionnels, les centres de décision sont organisés hiérarchiquement. En général, plus le centre de décision est bas dans la hiérarchie moins il a d'autonomie décisionnelle. C'est en partie pour cela que les centres de décision du niveau opérationnel sont sensibles aux perturbations. C'est pourquoi une tendance induite par les besoins d'amélioration de la réactivité consiste à augmenter l'autonomie des centres de décision des niveaux les plus bas (Grabot et Geneste, 1998) ; mais aussi d'y introduire des agents correspondant à la définition donnée par Jennings et Wooldridge (1995) selon laquelle un agent est une entité informatique autonome de résolution de problèmes capable, au moins, d'exécuter la plupart de ses tâches de résolution de problèmes, d'interagir avec son environnement, de percevoir son environnement et de réagir dans un délai donné et de prendre des initiatives lorsqu'il y a lieu.

La création du niveau décisionnel supplémentaire est rendue possible par les capacités de traitement d'informations des Capteurs et Actionneurs « Intelligents » (CAI) qui peuvent devenir ainsi des centres de décision et correspondre à la définition d'agent. Ce niveau de décision créé a été appelé CAID et constitue une interface entre la partie commande de la machine et les éléments opératoires (axes et broche). Il en découle une modification dans l'architecture de contrôle-commande des MOCN faisant apparaître ce niveau CAID comme celle proposée sur la Figure 14.

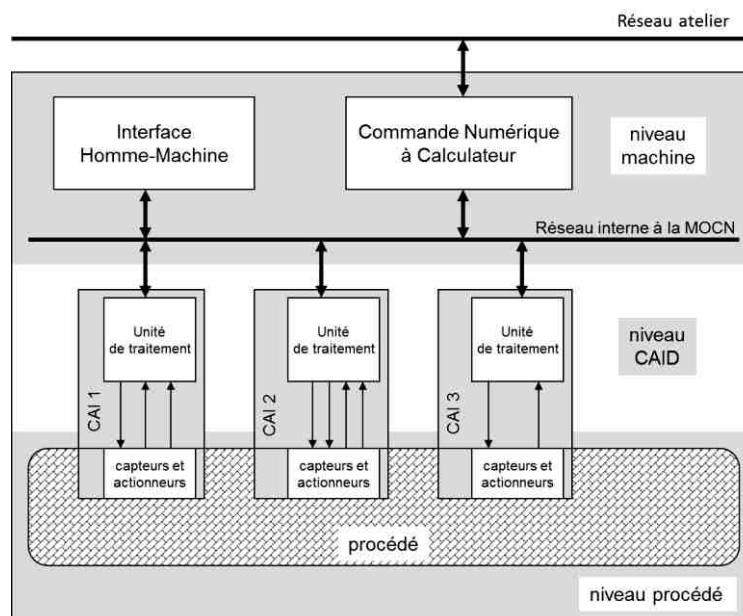


Figure 14. Nouvelle architecture de MOCN

Dans cette architecture chaque CAI est un centre de décision qui fournit une réponse locale aux évènements survenant sur le procédé. Toutefois, un CAI peut avoir besoin, dans certaines situations, d'informations produites ou d'actions menées par un ou plusieurs autres CAI. L'architecture doit donc permettre une communication bidirectionnelle entre les CAI pour permettre les échanges d'informations et leur coopération dans la conduite du procédé mais aussi entre les CAI et la CNC pour les objectifs et les comptes rendus de situations.

### 2.1.2 Distribution de la conduite au niveau CAID

Pour de tels besoins d'échanges d'informations et de coopération, une architecture distribuée est appropriée. Au niveau machine, la CNC coopère avec les CNC des autres machines du FMS et le superviseur du FMS dans le but de gérer au mieux les activités des différentes machines. Dans le cadre de cette coopération les CNC transmettent leurs ordres et cadres de décisions aux centres de décision du niveau CAID : les CAI comme cela est présenté sur la Figure 15.

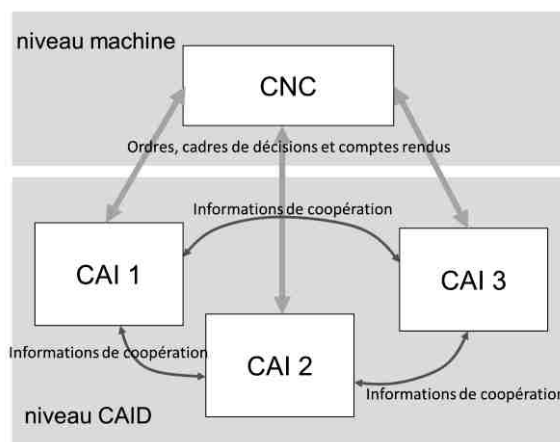


Figure 15. Architecture distribuée de conduite

Dans cette proposition, un CAI est associé à un élément opératoire de la MOCN (broche ou axe). Au niveau CAID, chaque CAI collabore aux décisions en fonction des informations issues du procédé à conduire et des autres CAI. La réactivité du système est donc améliorée puisque seuls les problèmes ne pouvant pas être résolus par la coopération entre CAI sont transmis au niveau décisionnel supérieur.

La notion d'agent appliquée aux CAI implique une certaine autonomie décisionnelle requérant l'aménagement de degrés de liberté dans la conduite du procédé au niveau CAID. Ces degrés de liberté peuvent dépendre des applications ou des fonctionnalités nouvelles à intégrer.

## 2.2 Surveillance de la machine-outil et contrôle adaptatif en effort de coupe

Afin de valider à la fois l'introduction de CAI dans les architectures de MOCN et du niveau décisionnel CAID pour la conduite de processus d'usinage et la surveillance de la machine un démonstrateur a été développé dans un premier temps lors des travaux de mémoire d'ingénieur CNAM de François Soler et exposés dans (Geneste *et al.*, 1999).

La première phase de développement de ce démonstrateur a consisté à développer un contrôle adaptatif en effort de coupe du processus d'usinage nécessitant une collaboration entre agent du niveau CAID. Pour réaliser ce démonstrateur, ne pouvant pas risquer de refaire toute la partie commande d'une MOCN, les processus physiques de fonctionnement des axes et broches ont été simulés par des objets logiciels tout comme le processus d'usinage auquel ils collaborent. Le processus d'usinage qui a été retenu est un processus de tournage, plus précisément de chariotage. Ce processus fait intervenir une broche entraînant la pièce à usiner et deux axes permettant le déplacement de l'outil afin d'obtenir la

forme de révolution désirée. En chariotage, l'outil est déplacé le long de l'axe de rotation de la pièce par l'axe Z de la MOCN (un tour à commande numérique) à une vitesse d'avance  $V_f$  tandis que l'axe X reste fixe et assure l'obtention d'un diamètre constant  $d$  comme cela est déjà présenté sur la Figure 2.

L'architecture de simulation est donc composée de quatre objets logiciels simulant les processus physiques et de quatre agents assurant, pour un, les fonctionnalités de la CNC et, pour les trois autres, les fonctionnalités mise en œuvre par le niveau CAID comme cela est illustré sur la Figure 16. Agents et objets logiciels communiquent à l'aide de l'intergiciel (*middleware*) CORBA (Common Object Request Broker Architecture) permettant de faire communiquer des objets logiciels pouvant être écrits dans des langages différents et exécutés sur des machines différentes permettant ainsi la distribution de « l'intelligente » induite par la mise en œuvre de capteurs et d'actionneurs intelligents et des décisions induite par la mise en œuvre des systèmes multi-agents.

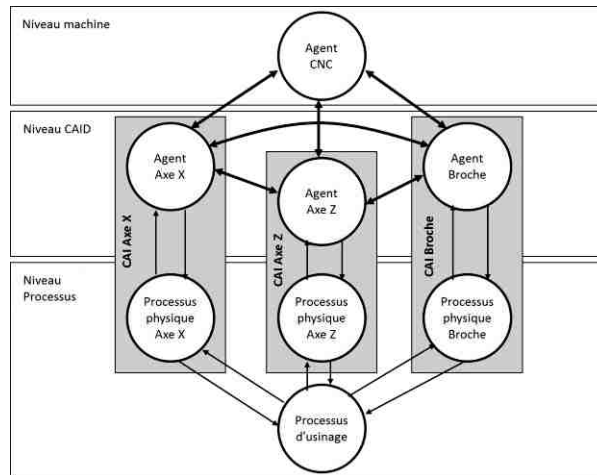


Figure 16. Architecture de simulation de tournage

Pour mettre en œuvre la commande adaptative en effort de coupe, il faut aménager des degrés de liberté au niveau CAID. Cette commande adaptative reprend les principes présentés dans (Carrillo et Rotella, 1997) qui consistent lors des usinages d'ébauche à maintenir les efforts de coupe constants de sorte à ce que la broche de la MOCN travaille à une puissance proche de son maximum. Comme la vitesse de coupe est maintenue constante, cette puissance maximale est assimilée à une valeur légèrement inférieure au courant maximum d'induit. Les CNC des MOCN transmettent, pour certaines, des consignes de vitesse aux actionneurs d'axe et de broche et assurent les régulations en position. A ce stade, le niveau CAID reçoit donc de la CNC des consignes de vitesse. Le processus de coupe génère des forces qui s'exercent sur les actionneurs et dépendent, pour tout autre paramètre constant, de l'usure de l'outil comme pour le modèle de tournage proposé dans (Koren *et al.*, 1991 ; Ravindra *et al.*, 1993) qui est mis en œuvre dans l'objet logiciel simulant le processus de tournage dans lequel un coefficient évolue en fonction du temps pour simuler l'usure. Ce modèle est décrit par les relations suivantes :

$$(20) \quad F_j = K_{wj}(t) \cdot V_c^{pj} \cdot V_f^{qj} \cdot a^{rj} \text{ avec } j = l, r, t$$

où  $F_j$  est la force, longitudinale ( $j = l$ ), radiale ( $j = r$ ) ou tangentielle ( $j = t$ ),  $V_c$  la vitesse de coupe,  $V_f$  l'avance,  $a$  la profondeur de passe avec  $a = (D - d)/2$ ,  $K_{wj}$  le coefficient de pression spécifique qui évolue en fonction de l'usure de l'outil et  $pj$ ,  $qj$  et  $rj$  sont des coefficients déterminés expérimentalement fonction des outils et matières usinées.

Le degré de liberté qui est donné au niveau CAID et la possibilité de modifier la vitesse d'avance  $V_f$  avec comme seule possibilité de la réduire. La stratégie d'adaptation est alors la suivante. L'axe Z

entraîne l'outil à la vitesse  $V_f$  donnée par la CNC tant que tous les actionneurs (broche, axe X et axe Z) ne développent pas une puissance instantanée, définie par le produit tension par courant calculé par les agents axes et broche, supérieure à un seuil préfixé. Lorsqu'un des agents détecte le dépassement du seuil qui le concerne, il communique cette information aux autres agents de niveau CAID pour que,  $V_f$  soit réduite d'un pas. L'agent associé à la broche prend alors la décision de réduire  $V_f$  d'un pas tant qu'un agent signale un dépassement de puissance. Quand la réduction  $V_f$  passe en dessous d'une valeur minimale, il y a arrêt de l'opération par la mise à zéro de  $V_f$ .

Nous avons ensuite mis en œuvre des fonctionnalités plus associées aux actionneurs intelligents.

La première des fonctionnalités est relative à la surveillance de l'actionneur. Il s'agit de l'estimation des paramètres physiques des axes X et Z et de la broche par l'une des deux méthodes privilégiées au paragraphe 1.3.3 et en confrontant les valeurs estimées des paramètres à des seuils. Ces estimations sont réalisées pendant des phases d'avance rapide programmées hors usinage (sans engagement de l'outil dans la matière) et donc sans effort de coupe.

La seconde fonctionnalité est relative à la surveillance du processus conduit par les actionneurs : l'usinage. En effet, les estimations des paramètres physiques des axes et broche permettent lors de l'usinage, grâce aux mesures de courant et de vitesse, d'estimer le couple résistant sur l'arbre moteur  $c_{rt}$ , par la relation (2) où la dérivée est obtenue soit par un opérateur de dérivation, soit par un filtrage passe-bas du premier ordre. Une fois que  $c_{rt}$  est estimé un effort  $F_j$  peut alors être estimé en connaissant le rapport de réduction entre l'arbre moteur et le coulisseau pour les axes ou, pour la broche, le rapport de réduction entre l'arbre moteur et l'axe de broche plus le diamètre à obtenir de la pièce à usiner. Enfin, grâce à un modèle de coupe. Lorsqu'un effort  $F_j$  est estimé, l'usure peut être évaluée à partir de la valeur de  $K_{wj}$  estimée à partir de la relation (20).

La stratégie d'adaptation consiste toujours à modifier  $V_f$  selon la même stratégie mais en ajoutant, parmi les critères d'arrêt de l'opération d'usinage par la mise à zéro de  $V_f$ , le dépassement par les estimations de  $K_{wj}$  de leur valeur maximale admissible.

Ces développements ont fait l'objet des communications [C7, A1]. Ils ont montré l'intérêt d'ajouter un niveau décisionnel entre la CNC et les actionneurs mais n'ont constitué qu'une première phase ayant permis de montrer la faisabilité de l'intégration d'instruments intelligents dans les systèmes de contrôle-commande pour la mise en œuvre de quelques fonctions qui ne sont pas traditionnellement proposées par les fabricants de MOCN. Bien que valables pour une opération simple de chariotage d'ébauche, ils ne sont pas pleinement satisfaisant vis-à-vis de la conduite d'un processus d'usinage pour la réalisation de formes plus « complexes ». La cause principale étant liée à la conduite des actionneurs asservis en vitesse alors que les CNC des MOCN contrôlent les actionneurs en position afin de garantir l'obtention des géométries désirées pour les pièces usinées.

### 2.3 Stratégie de surveillance et de conduite distribuées des MOCN et de l'usinage

L'intérêt du niveau décisionnel supplémentaire CAID ayant été démontré, celui-ci a été conservé avec, évidemment, ces capacités décisionnelles supportées par les capteurs/actionneurs intelligents. Seulement, les rôles des entités décisionnelles du niveau « machine » et du niveau « CAID » de la Figure 14 et de la Figure 15 ont été redéfinis et une nouvelle plateforme a été développée où agents et objets logiciels communiquent également à l'aide de CORBA.

La redéfinition de ces rôles a été guidée par les besoins associés à l'usinage et pour que l'architecture puisse être mise en œuvre pour un très grand nombre de procédés d'usinage. En ce qui concerne les procédés d'usinage, le besoin consiste à usiner des pièces de la qualité souhaitée avec une productivité la plus élevée possible.

La qualité des pièces est souvent définie en termes de géométrie, de dimensions et de rugosité de surface. La pièce usinée est de bonne qualité si ses dimensions, sa géométrie et la rugosité de ses surfaces sont obtenues dans des tolérances spécifiées. Une fois le processus de coupe et l'outil choisis, la qualité de la pièce dépend principalement :

- De la structure mécanique de la machine, du montage d'usinage et de l'outil (élasticité de la structure mécanique et de l'outil, jeux entre les pièces mobiles),
- des comportements dynamiques des asservissements des axes et broche de la MOCN,
- des paramètres de coupe (vitesse de coupe  $V_c$ , vitesse d'avance  $V_f$ , profondeur de passe  $a$ ),
- de la manière dont les trajectoires sont calculées par la CNC à partir du programme pièce décrivant la trajectoire de l'outil.

Assurer une productivité élevée signifie produire autant de pièces que possible au coût le plus bas. Par conséquent, l'avance doit être aussi rapide que possible par rapport à la tolérance spécifiée des paramètres de coupe, qui sont choisis à l'aide d'abaques, et dans les limites de ce que peut faire la machine. L'augmentation de la durée de vie de l'outil permet d'économiser du temps et de l'argent. En effet, les coûts relatifs aux outils sont réduits car les outils peuvent être utilisés pour plus de pièces; il réduit également le nombre de changements d'outils qui sont des opérations non productives.

### 2.3.1 Rôles et objectifs des agents

Deux types d'agents sont distingués : l'agent CNC et les CAI qui sont les agents associés aux axes ou à la broche de la machine. Chaque type d'agents a son propre rôle et ses objectifs.

L'agent CNC a pour rôle principal de superviser les opérations d'usinage et de les assurer aussi longtemps que l'état de la machine ou celui du processus le permettent. Cet agent :

- calcule les consignes par rapport au temps de position (linéaire ou angulaire) pour chacun des axes et les consignes de vitesse de broche à partir du programme pièce ;
- détermine la profondeur de passe en fonction de la position des axes qui peut être déduite de la géométrie de la pièce brute et de la géométrie de la pièce usinée pouvant être fournies par les systèmes de CFAO (Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur) ou programmées ;
- transmet les consignes de position correspondantes aux agents associés aux axes et les consignes de vitesse broche à l'agent associé à la broche ;
- transmet aux CAI la profondeur de passe correspondant aux consignes de position ;
- décide de la manière de poursuivre l'opération d'usinage en fonction des informations reçues des CAI (usure d'outil estimée, état des actionneurs, sortie des limites admissibles de coupe  $V_c$  ou d'avance  $V_f$  qui doivent être définies au préalable) ;
- distribue aux CAI le modèle de coupe.

Au niveau décisionnel supplémentaire CAID, les CAI gèrent deux degrés de liberté. Le premier degré de liberté consiste en la possibilité de modifier la vitesse d'avance et le second en la possibilité de modifier la vitesse de coupe à l'intérieur de limites vérifiées par l'agent CNC. Les décisions de modification de ces vitesses dépendent de l'état des actionneurs et de leur capacité à assurer les efforts



de coupe. Cette capacité décisionnelle permet donc d'accommoder l'opération d'usinage à l'état du processus (usure de l'outil) et l'état des actionneurs. En effet, en considérant des conditions de coupe stables (vitesse d'avance, vitesse de coupe et profondeur de passe), les efforts de coupe augmentent à mesure que l'arête coupante de l'outil s'use (Koren *et al.*, 1991 ; Ravindar *et al.*, 1993). Les CAI effectuent :

- la surveillance de leur état et, si une faute est détectée, leur diagnostic, le signalement de cette faute à l'agent CNC et l'enregistrement de ces informations pour d'éventuelles consultations ultérieures à des fins de maintenance, par exemple ;
- la vérification que leur puissance électrique maximale ou le courant maximal admissibles ne soient pas dépassés et, selon le résultat, la transmission des demandes de réduction ou d'augmentation de  $V_c$  et/ou de  $V_f$  ;
- les demandes auprès de l'agent CNC de consignes de position (pour les CAI associés aux axes) ou de vitesse (pour le CAI associé à la broche) et des profondeurs de passe ;
- l'estimation de l'usure de l'outil à partir du modèle coupe transmis par l'agent CNC et de l'effort de coupe qu'ils estiment ;
- les accommodations de vitesse d'avance ou de broche en fonction des informations reçues des autres CAI.

### 2.3.2 Stratégie de conduite

Dans la nouvelle stratégie de collaboration proposée entre l'agent CNC et les CAI, l'agent CNC conserve un rôle plus important que dans la première approche. En effet, il est une interface entre les CAI et la CFAO. Si, comme dans les structures actuelles de commande des MOCN, l'agent CNC assure la détermination des consignes de position et de vitesse à partir du programme pièce, il n'a plus en charge les contrôles en vitesse ou positions dévolus aux CAI. Cependant, il nécessite, par rapport aux CNC actuelles, une gestion d'informations supplémentaires que sont la profondeur de passe, les modèles de coupe et les limites pour les vitesses d'avance et coupe ou encore pour l'usure de l'outil.

La nouvelle stratégie de conduite proposée et mise en œuvre par l'agent CNC et les CAI vise à accroître la vitesse d'enlèvement de métal afin d'augmenter la productivité tout en restant dans les limites suivantes :

- sous la puissance électrique maximale ou le courant d'induit maximal des moteurs des axes et broches puisque, généralement, les efforts de coupe augmentent à mesure que l'outil s'use ;
- à l'intérieur des limites pour les paramètres de coupe ( $V_c$  et  $V_f$ ) définies par le fabricant de outil en fonction du matériau à usiner (généralement sous la forme d'un abaque), l'état de surface désiré (la rugosité) influe sur les limites de ces paramètres.

La stratégie vise aussi l'augmentation de l'utilisation de l'outil (en nombre de pièces usinées, par exemple).

En fonction de ces deux objectifs, le système de contrôle modifie la vitesse de coupe et/ou la vitesse d'avance. Dans ce contexte, les événements conduisant à un arrêt du processus d'usinage non programmé sont :

- l'atteinte ou le dépassement par l'outil de l'usure limite,
- une faute détectée sur un actionneur par les CAI,

- l'impossibilité de poursuivre l'opération d'usinage sans sortir des limites des paramètres de coupe ou sans dépasser la puissance maximale ou le courant maximal admissible d'un actionneur.

Ces objectifs ne sont pas vraiment opposés ; il n'y a donc pas besoin d'introduire de stratégie de négociation entre les agents qui sont souvent nécessaires pour aboutir à une « convergence » de décision en un temps limité (Kraus, 1997). Les agents ne font que se consulter avant de prendre une décision sur la modification des paramètres de coupe. Par exemple, si un CAI propose d'augmenter à la fois la vitesse d'avance et la vitesse de coupe et si un autre CAI travaille déjà à sa puissance maximale, les vitesses ne seront pas augmentées et au moins une vitesse peut être diminuée en fonction de la stratégie d'adaptation. L'agent CNC supervise les opérations et vérifie que les limites d'usure de l'outil et des paramètres de coupe sont respectées.

### 2.3.3 Simulations et résultats

Nous avons considéré également une opération de tournage correspondant à un chariotage d'une pièce où le diamètre de la pièce brute est de 402 mm ; le diamètre final est de 400 mm ; la profondeur de coupe est donc de 1 mm ; la longueur du cylindre usiné est de 150 mm. Nous avons supposé que la vitesse d'avance nominale est de 5 mm/s et que la vitesse de coupe nominale est de 10 m/s, ce qui correspond à 49,9 rad/s pour la vitesse de la broche.

Nous avons supposé que la vitesse de coupe et la vitesse d'avance pouvaient varier dans un intervalle de plus ou moins 20% autour de leurs valeurs nominales. Tous les servo-actionneurs (axes et broches) ont les mêmes paramètres. Pour les axes, la puissance maximale est de 6 kW et le courant maximal est de 50 A alors que la puissance maximale est de 12 kW et le courant maximal est de 100 A pour la broche. La puissance et le courant consommés par un servo-actionneur dépendent, pour un couple de charge constant, de ses paramètres physiques.

Le modèle considéré du processus de coupe était celui représenté par la relation (20) avec  $\forall j \in \{t, l, r\}$   $p_j = -0,1$ ,  $q_j = r_j = 1$ , et  $K_{wt} = 4 \cdot 10^7$  et  $K_{wl} = K_{wr} = 2 \cdot 10^7$ . L'usure de l'outil noté  $W$  est fonction de la durée de l'usinage mais aussi de  $V_c$ . En effet, la vitesse de coupe correspond à la vitesse de glissement entre l'outil et la pièce qui, en augmentant, accroît l'arrachement de matière à l'outil et ainsi augmente la vitesse à laquelle l'outil s'use (Ravindra *et al.*, 1993). Cette usure est introduite par l'intermédiaire d'un coefficient multiplicateur  $W$  des valeurs des  $K_{wj}$  et ressemble au profil présenté sur la Figure 17.

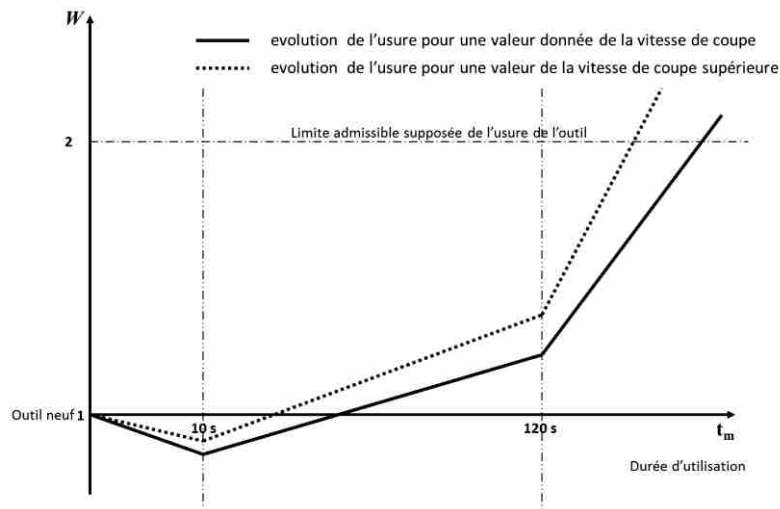


Figure 17. Profil d'usure introduit dans les simulations

La stratégie d'adaptation consiste à réduire  $V_c$  afin d'augmenter la durée de vie de l'outil et à augmenter le  $V_f$  afin d'augmenter la productivité. Cette augmentation et cette réduction sont effectuées simultanément et pas à pas tant qu'aucun dépassement de capacité maximale (dépassement de la puissance maximal ou du courant maximal) n'est détecté par les CAI et jusqu'aux limites vérifiées par l'agent CNC. Lorsqu'un dépassement de capacité maximale est détecté, le CAI associé à la broche augmente  $V_c$  par pas pour maintenir la productivité à son maximum et tant qu'un dépassement de capacité maximale est détecté et que la limite haute de  $V_c$  n'est pas atteinte. Lorsque  $V_c$  est à sa valeur maximale et qu'un événement de capacité maximale est détecté à nouveau, les CAI associés aux axes diminuent  $V_f$  afin de continuer à usiner les pièces. L'arrêt de l'usinage est provoqué parce que  $V_c$  et  $V_f$  ne peuvent plus être modifiées sans franchir les limites vérifiées par l'agent CNC ou parce que le seuil d'usure maximal de l'outil est atteint.

La trajectoire d'outil programmée est présentée sur la Figure 18. Le seul segment impliqué dans le processus d'usinage des métaux est le bloc 5. Nous avons considéré un dégagement d'outil assez important qui peut représenter l'espace nécessaire pour charger la pièce brute et décharger la pièce usinée. Les blocs 1 et 2 décrivent la trajectoire de l'outil après le réglage de l'origine de la pièce. L'outil suit les segments de ces deux blocs une seule fois avant de commencer l'opération de tournage de la première pièce.

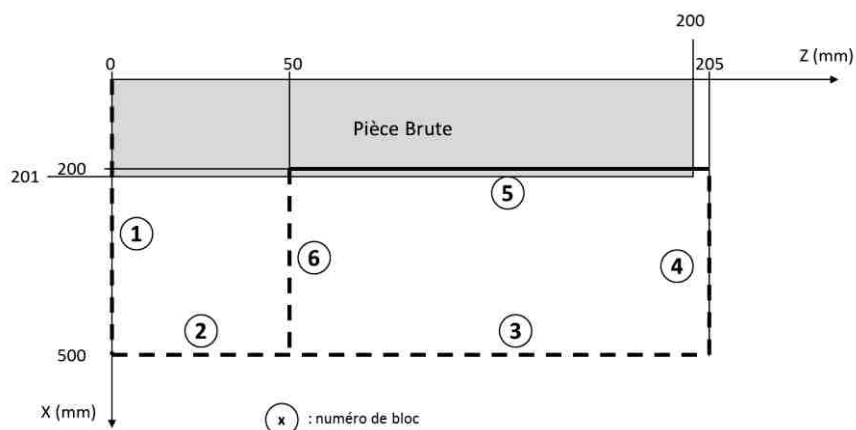


Figure 18. Trajectoire d'outil programmée

Les CAI assurent leur surveillance. Cependant, la validation des mesures n'a pas été mise en œuvre dans les simulations. En effet, les modèles de broche et d'axes simulés correspondent aux relations (1) et (2) et asservis selon le schéma de la Figure 5 sans l'asservissement en position et, donc, juste l'asservissement de vitesse pour la broche et correspondent à ceux utilisés pour l'estimation des paramètres et qu'aucun bruit n'a été introduit sur les mesures. Cependant, les estimations des paramètres physiques ont été réalisées lors de l'exécution de tous les blocs sauf le bloc 5. Un exemple, de cette estimation est représenté sur Figure 19 où l'estimation est initialisée aux valeurs nominales et converge vers les valeurs introduites dans l'objet simulant le fonctionnement de l'axe X en 0,05 s. Pour des raisons de commodité, tous les objets simulant un actionneur ont été initialisés avec les mêmes paramètres physiques.

Deux scénarios de simulation ont été réalisés. Le premier scénario a été réalisé sans mettre en œuvre la stratégie de collaboration entre les agents, les valeurs de  $V_c$  et  $V_f$  sont donc fixes et correspondent aux valeurs médianes mentionnées au début du paragraphe 2.3.3. Dans ces conditions, les simulations ont montré que sept pièces pouvaient être usinées en 217 s. Un dépassement de capacité de la broche a été

détecté lors de l'usinage de la septième pièce après 221,55 s d'usinage et un coefficient d'usure  $W$  estimé à 1,685. En laissant poursuivre le processus, l'usure limite a été atteinte après 258,44 s d'usinage.

Le second scénario a été réalisé en mettant en œuvre la coopération décrite entre les agents dans les limites de variation de  $V_c$  et  $V_f$  de plus ou moins 20% autour de leurs valeurs nominales données au début du paragraphe 2.3.3. Dans ces conditions, les simulations ont montré que huit pièces pouvaient être usinées en 239,76 s. L'opération a été stoppée pour un dépassement  $W$  lors de l'usinage de la neuvième pièce au bout de 257,38 s alors que les CAI réduisaient  $V_f$  pour rester dans la capacité de la broche.

Ces résultats montrent que, grâce à l'introduction du niveau décisionnel supplémentaire et à la stratégie de collaboration choisie entre les agents, la durée moyenne d'usinage d'une pièce pouvait être réduite tout en augmentant le nombre de pièces usinées par l'outil. Les CAI ont également permis d'introduire une surveillance de la machine par une estimation des paramètres physiques et de l'usinage par l'estimation d'un coefficient d'usure de l'outil.

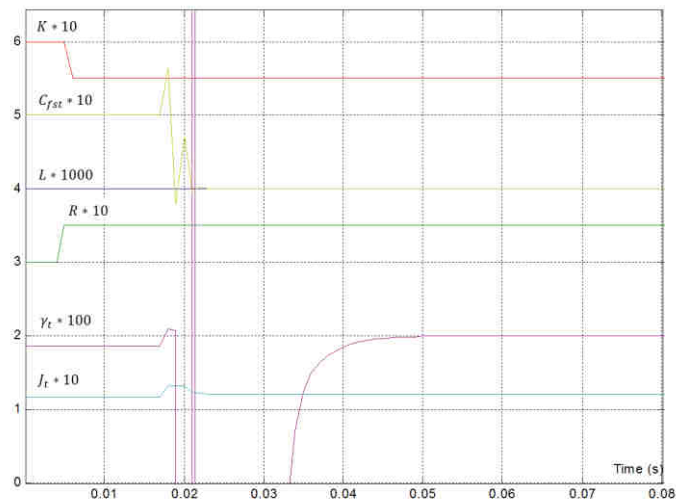


Figure 19. Estimation des paramètres physiques de l'axe X

Ces résultats ont fait l'objet de la communication [A2].

Le cadre d'application présenté concerne un processus de tournage et une MOCN équipée de motorisation à courant continu. L'étape suivante a consisté à identifier les éléments de l'architecture proposée présentant un caractère générique pour constituer un cadre de conception pour une mise en œuvre pour un plus grand nombre de MOCN, supportant d'autres procédés d'usinage et dont les actionneurs peuvent être de technologies différentes.

## 2.4 Cadre de conception d'architectures de MOCN mettant en œuvre des capteurs/actionneurs intelligents

Cette dernière étape concernant les développements menés dans le cadre de la conduite et surveillance distribuées des machines-outils et de l'usinage par la mise en œuvre de capteurs/actionneurs intelligents, a consisté en l'identification des éléments de l'architecture distribuée proposée présentant un caractère générique pouvant être capitalisés. Ceci a des fins d'aide à la conception dans un processus d'ingénierie des systèmes par des réutilisations ou adaptations menant aux développements d'autres types de MOCN disposant de technologie d'actionneurs, comme des moteurs asynchrones, et/ou supportant d'autres

procédés d'usinage comme le perçage ou le fraisage. Ainsi, le temps de développement de nouvelles machines pourrait être réduit.

Les éléments que nous avons identifiés peuvent être répartis en trois catégories : ceux relatifs à l'architecture matérielle de conduite et de surveillance, ceux relatifs aux comportements internes des objets impliqués dans la conduite et la supervision, ceux relatifs aux échanges nécessaires à la coopération entre les objets.

### 2.4.1 Architectures matérielles

Dans le cadre de conception proposée, les fonctions peuvent être assimilées à des services logiciels fournis par les CAI ou par une coopération entre les CAI et l'agent CNC comme cela est montré sur la Figure 15. Ces services logiciels sont mis en œuvre par des plateformes de calcul qui peuvent elles-mêmes mettre en œuvre plusieurs agents. Différentes architectures matérielles peuvent ainsi être choisies pour déployer la proposition d'architecture illustrée sur la Figure 14. Trois architectures matérielles éligibles sont représentées sur la Figure 20. Le choix entre ces architectures dépendra de la capacité de calcul des plateformes par rapport à l'exécution des services, des débits du bus numérique bidirectionnel permettant de supporter les échanges entre les agents et du temps critique.

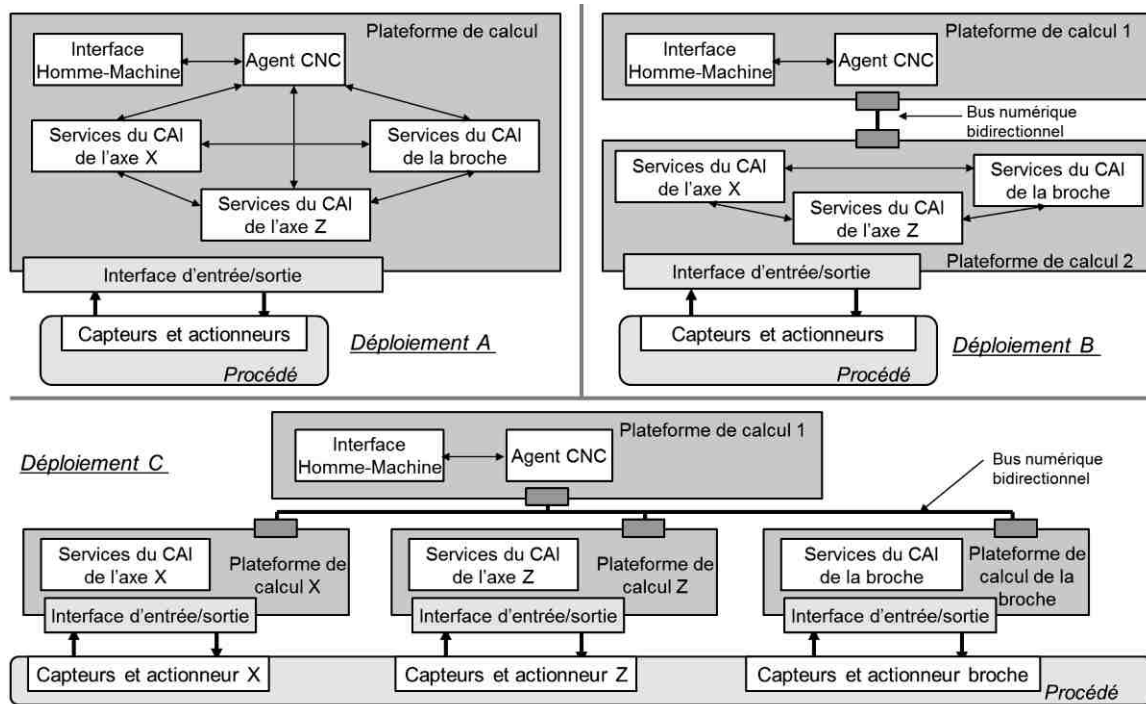


Figure 20. Architectures éligibles pour le déploiement des services des CAI

Il est également possible d'hybrider les déploiements B et C, par exemple, en regroupant les services de CAI de plusieurs axes ou broches sur une même plateforme (certaines MOCN sont constituées de 5 axes voire plus et même de plusieurs broches). La communication entre les agents et leurs services peut être réalisée à l'aide d'un intergiciel permettant de faire abstraction du déploiement des agents sur les plateformes comme CORBA, COM/DCOM, JavaRMI... Il est possible de nos jours d'envisager plus aisément le déploiement C qui fait appel au plus grand nombre de plateformes grâce à la baisse de leurs prix à condition que le bus numérique bidirectionnel puisse assurer les échanges de données dans le respect du temps critique. Dans ce cas, même l'interface homme-machine pourrait être mise en œuvre par une plateforme dédiée.

#### 2.4.2 Comportement des agents

Les comportements des agents sont grandement issus des rôles et objectifs définis dans le paragraphe 2.3.1. Ces comportements consistent en des services et les enchaînements de leur réalisation. La mise en œuvre de chacun de ces services peut être fonction des technologies des actionneurs, de la présence ou non de certains capteurs, du procédé... comme cela a été présenté pour un axe de MOCN particulier dans les paragraphes 1.3 et 1.4.

Nous avons identifié quatre services mise en œuvre par les CAI contribuant à l'amélioration des capacités traditionnelles des axes et broches de machines-outils qui consistent à mesurer et agir. Ces services sont la validation des données, la surveillance et le diagnostic de l'axe ou la broche, la surveillance des procédés de l'usinage et l'adaptation ou l'accommodation.

La validation des données est une fonctionnalité majeure des instruments « intelligents ». Elle permet de fournir des informations crédibles, fiables et représentatives des variables physiques mesurées. Ces valeurs mesurées sont l'entrée des autres services d'un CAI. Par conséquent, les améliorations de la qualité métrologique des mesures ou l'association aux mesures de valeurs spécifiques indiquant les conditions technologiques dans lesquelles ces valeurs ont été obtenues renforcent la confiance accordée à tout élément d'information qui est ensuite calculé à partir des mesures. Les méthodes de validation des mesures sont nombreuses dans la littérature. Un exemple de réalisation de ce service a été présenté pour un axe de MOCN dans le paragraphe 1.4. La mise en œuvre de ce service permet souvent d'isoler les capteurs défectueux. Cette capacité d'isolation contribue à la surveillance de l'axe ou la broche et au service de diagnostic.

Le service de surveillance et de diagnostic de l'axe ou la broche fournit l'évaluation de l'état de santé du variateur. L'état de santé de la machine-outil, qui rassemble l'état de santé de ses axes et broches est utile pour la maintenance conditionnelle et la planification de la production afin de prendre des décisions sur les actions de maintenance et les tâches de production. L'objectif principal de la surveillance consiste à détecter et à isoler les défauts alors que l'objectif principal du diagnostic consiste à identifier l'origine du défaut qui conduit à désigner les composants défectueux. Par conséquent, le service de diagnostic est une sorte de client du service de surveillance. Les techniques permettant de mettre en œuvre ces services sont également nombreuses (Jardine *et al.*, 2006 ; Kothamasu *et al.*, 2006).

Le service de surveillance du processus consiste à détecter les défauts pendant les opérations d'usinage. En ce qui concerne les processus d'enlèvement de métal, comme le tournage ou le fraisage, les défauts qui affectent ces processus et peuvent endommager les pièces à usiner sont principalement dus aux outils. Ces défauts sont des phénomènes comme l'usure de l'outil et la rupture de l'outil qui peuvent également être une conséquence de l'usure de l'outil (Sick, 2002 ; Huang *et al.*, 2007). Ces techniques de surveillance peuvent ensuite être exploitées pour arrêter le processus, lorsque l'outil est usé ou cassé, ou pour adapter en ligne ou hors ligne les paramètres  $V_c$  et/ou  $V_f$  du processus d'usinage à l'usure de l'outil. Les techniques nécessitant une instrumentation dédiées ne s'intègrent pas exactement dans la démarche proposée puisqu'elles n'entraînent pas vraiment de coopération. Cependant, leurs instrumentations pourraient être intégrées comme des estimateurs de l'usure  $W$  dont la valeur serait alors transmise aux CAI et à l'agent CNC.

L'objectif du service d'adaptation ou d'accommodation est de poursuivre l'usinage avec des performances souvent plus faibles pour tenir compte de l'état de la MOCN et/ou de l'état du processus d'usinage, en particulier l'usure de l'outil. En usinage, l'adaptation conduit souvent à modifier les paramètres  $V_c$  et/ou de  $V_f$ , la position du point de référence de l'outil de coupe pour obtenir la surface attendue. Toutefois, l'adaptation peut également consister à modifier les paramètres ou la structure des

régulateurs des variateurs (Charbonnaud *et al.*, 2003 ; Jee et Koren, 2004). L'adaptation peut nécessiter une communication entre les CAI et l'agent CNC. Par exemple, si l'adaptation nécessite une modification de  $V_f$ , l'adaptation des vitesses de déplacement de tous les axes concourant à l'usinage de la pièce est nécessaire pour ne pas modifier la trajectoire spatiale de l'outil.

Les services mis en œuvre par l'agent CNC sont ceux présentés dans le paragraphe 2.3.1. Ils présentent un aspect relativement générique, puisqu'il s'agit de transmettre certaines informations aux CAI (trajectoires d'outil, profondeur de passe, modèle de coupe) et de vérifier le non dépassement de limites avec pour les situations de dépassement un comportement prédéterminé.

Comme pour la plateforme de simulation, l'approche orientée objet a été retenue pour représenter les éléments de conception et plus particulièrement le langage graphique UML 2 (Unified Modeling Language). Ce langage permet la modélisation selon des vues fonctionnelles, informationnelles et comportementales. UML 2 est constitué de treize types de diagrammes pour la spécification, la modélisation ou l'analyse de systèmes comme les diagrammes états-transitions qui décrivent les états des objets, ainsi que les transitions entre ces états, les diagrammes d'activités qui représentent les séquençement des activités et dans lesquels les flux entre activités peuvent être représentés, les diagrammes de séquence qui sont utilisés pour modéliser les échanges de messages entre objets (Miles et Hamilton, 2006).

L'approche orientée objet permet d'appréhender des concepts tels que l'héritage, le polymorphisme, l'abstraction, l'encapsulation, etc. (Blaha et Rumbaugh, 2005). Ces caractéristiques permettent de considérer en même temps différents types d'entraînements pour les broches et les axes équipés de moteurs à courant continu ou à courant alternatif pour différents types de machines-outils comme les centres de fraisage, les tours... L'approche orientée objet permet de définir des interfaces communes pour des services qui sont implémentés en fonction des caractéristiques technologiques des entraînements des machines-outils et des processus d'usinage.

La description comportementale générale des CAI est constituée de deux états principaux, représentés dans le diagramme états-transitions de la Figure 21 : la surveillance de l'entraînement (axe ou broche) appelé *drive monitoring* et la surveillance du processus d'usinage appelé *process monitoring*. Ces deux états sont distingués pour les raisons détaillées dans le paragraphe 1.3.2 même si des activités communes y sont exécutées :

- mesurer (*to measure*) qui consiste à rendre opérationnelles les mesures des grandeurs physiques,
- valider (*to validate*) qui consiste à valider ces mesures,
- asservir (*to regulate*) qui consiste à assurer que l'actionneur agisse selon la consigne qui peut être mis en œuvre par des régulateurs comme sur la Figure 5 par exemple ou assurer numériquement.

L'activité spécifique de *drive monitoring* est surveiller l'entraînement (*to monitor drive*) et les activités spécifiques de *process monitoring* sont adapter ou accommoder (*to adapt*) et surveiller le processus (*to monitor process*). Les activités de ces deux états sont séquençées selon les diagrammes d'activités de la Figure 22. Ces séquences sont exécutées à chaque période d'échantillonnage tant que l'agent CNC ne transmet pas d'information provoquant la sortie de ces états.

Les trois autres états ont des vocations liées au démarrage (*test*), à la configuration (*setup*) comme la détermination de paramètres des traitements réalisée par le CAI et à la consultation par la maintenance (*maintenance*) des informations enregistrées (valeurs estimées de paramètres, défauts de chaîne de

mesure...) pour de l'aide au diagnostic ou effectuer un pronostic de l'axe ou la broche en fonction de l'évolution des paramètres (Prakash *et al.*, 2018).

Dans cette gestion des états des CAI, l'agent CNC gère l'activité de la machine et transmet donc les informations provoquant les changements d'états des CAI hormis la fin de test qui est émise par le CAI.

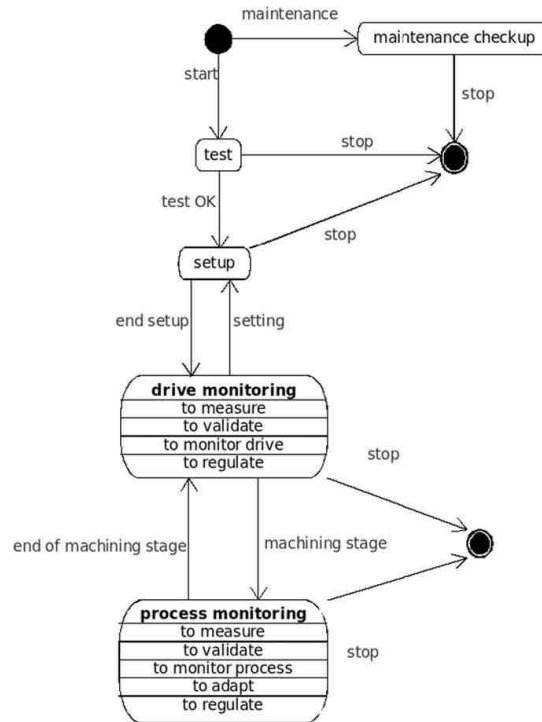


Figure 21. Diagramme états-transitions d'un CAI

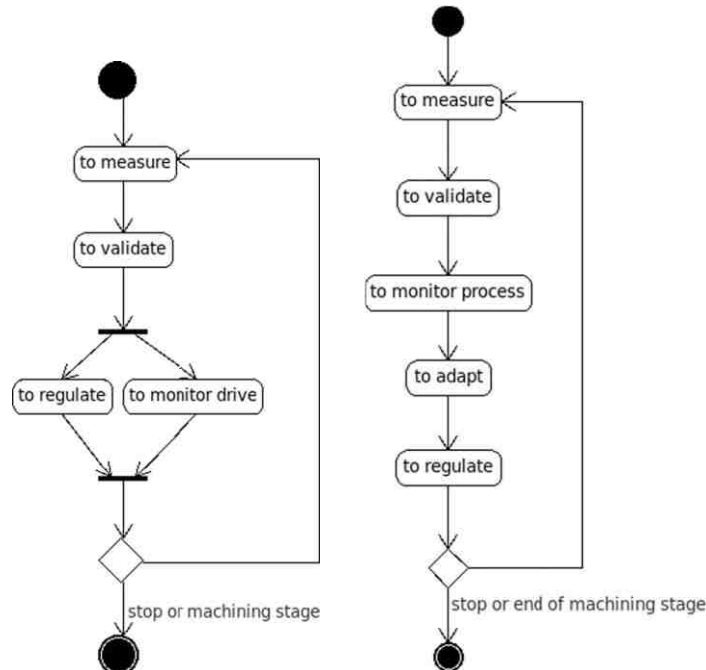


Figure 22. Diagrammes d'activités de *drive monitoring* à gauche et de *process monitoring* à droite

### 2.4.3 Echanges relatifs à la coopération entre les agents

Dans l'état *process monitoring*, les activités *to monitor process* et *to adapt* nécessitent des informations sur le procédé, la position des axes, la vitesse de la broche, la géométrie de la pièce brute, l'atteinte de



limites (puissance maximale, paramètres de coupe...) pour évaluer l'état du processus représenté par l'usure de l'outil et décider de l'adaptation ou l'accommodation appropriée et en déduire les actions vis-à-vis des consignes à transmettre aux régulateurs (*to regulate*) ou des modifications des valeurs de leurs paramètres et éventuellement de leur structure.

L'activité *to monitor process* nécessite des échanges d'informations entre les agents pour que chaque CAI puisse déterminer un état du processus correspondant à une estimation de l'usure de l'outil. Lorsqu'un nombre prédéfini d'estimations de l'usure sont au-delà d'une valeur maximale admissible, l'agent CNC arrête l'opération d'usinage. Ces échanges d'informations sont représentés sur le diagramme de séquence de la Figure 23.

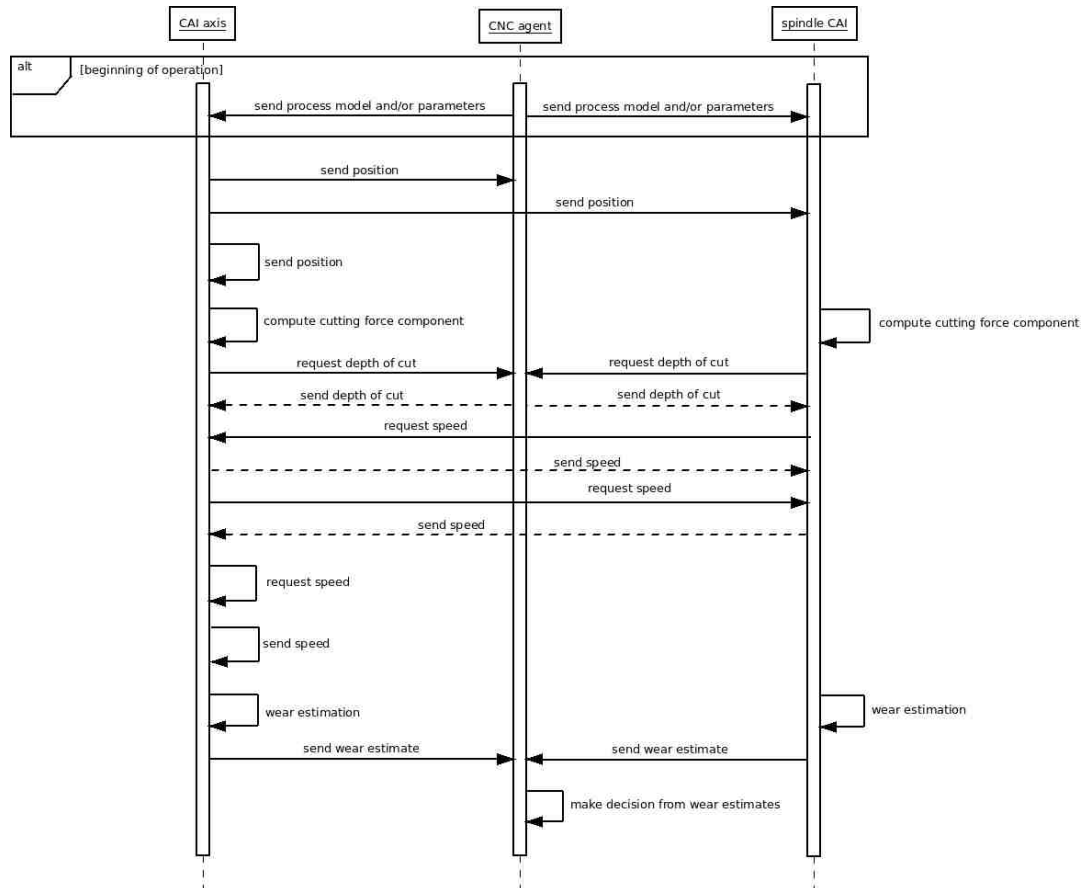


Figure 23. Diagramme de séquence de l'activité *to monitor process*

L'activité *to adapt* nécessite donc une coopération entre les CAI et l'agent CNC. Ceci est surtout le cas lorsqu'un CAI demande une modification de la vitesse d'avance  $V_f$ . Si celle-ci est possible (elle ne provoque pas de sortie des limites des paramètres de coupe), les autres CAI associés aux axes doivent être en mesure de réduire leur vitesse dans la même proportion afin de garantir la géométrie de la pièce. Cependant, la stratégie de modification des vitesses d'avance  $V_f$  et de coupe  $V_c$  peut évoluer selon les modèles de coupe et de l'évolution de l'usure de l'outil en fonction des paramètres de coupe. Sa gestion peut être faite par l'agent CNC. Elle peut également dépendre de phénomènes indésirables comme des vibrations de pièces dans le cas de fraisage de parois minces (Séguy *et al.*, 2011). En l'absence de telles contraintes, le schéma de coopération entre agents pour la mise en œuvre de l'activité *to adapt* est décrite par le diagramme de séquence de la Figure 24. Une alternative à ce diagramme de séquence est la possibilité de laisser gérer la stratégie d'adaptation à l'agent CNC tel que ceci a été proposé dans [A3].

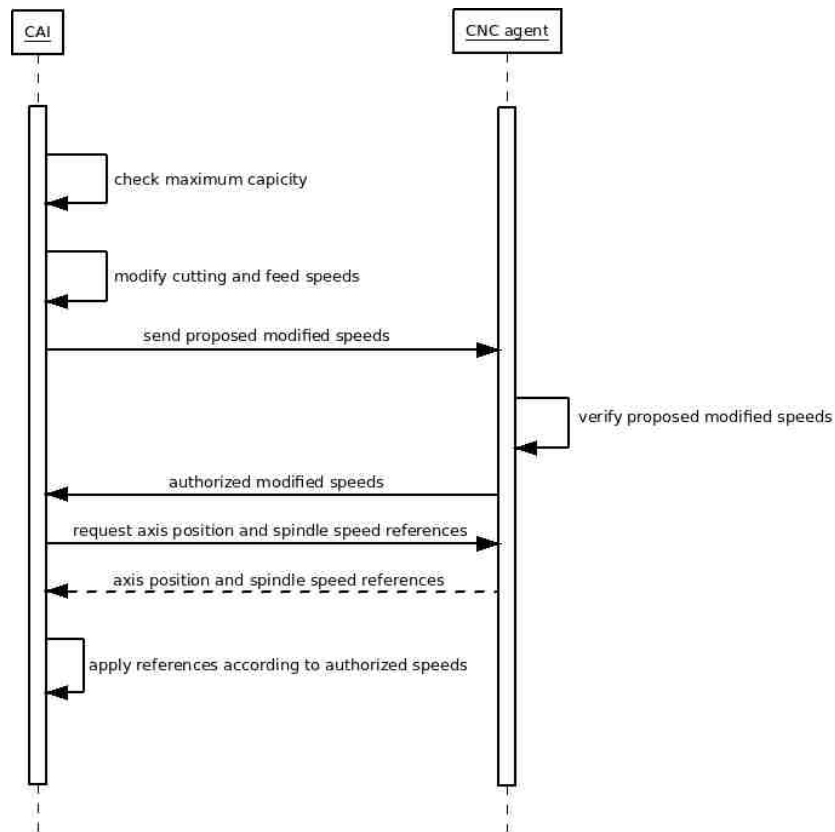


Figure 24. Diagramme de séquence de l'activité *to adapt*

Ce cadre de conception d'architectures de MOCN mettant en œuvre des capteurs/actionneurs intelligents a fait l'objet de l'article [A3].

Ce cadre de conception doit permettre également la mise en œuvre d'autres stratégies, notamment pour réduire les vibrations (Séguy *et al.*, 2011). En effet, il est possible d'ajouter à cette architecture des objets logiciels interagissant avec l'agent CNC pour modifier les consignes calculées à partir du programme pièce ou pour fournir les consignes dans le message retour *axis position and spindle feed references*.

## 2.5 Conclusion sur la conduite et la surveillance distribuées des machines-outils et de l'usinage

Ces travaux sur la conduite et la surveillance distribuées des machines-outils et de l'usinage ont montré que l'ajout de capacités décisionnelles au niveau hiérarchique le plus bas (celui des capteurs et des actionneurs) de la pyramide CIM (voir Figure 1) permettait d'adapter localement la conduite du processus à des perturbations, l'usure d'outil en l'occurrence, sans solliciter de niveaux décisionnels plus élevés. Les concepts de capteurs et actionneurs « intelligents » ont montré qu'ils constituent un cadre de mise en œuvre permettant d'ajouter à ce niveau décisionnel supplémentaire des capacités de surveillance à la fois de la machine mais aussi du processus grâce à leurs capacités internes de traitement numérique de l'information et de communication bidirectionnelle. Les capacités de décisions données à ces instruments en font des agents tels que définis par Jennings et Wooldridge (1995).

Au cours de ces travaux ont été réalisées à l'aide de plateformes de simulation :

- une conduite adaptative d'une opération de tournage par modification de la vitesse d'avance dans le but de maintenir un effort de coupe constant au niveau de la broche associée à une surveillance des actionneurs, par l'estimation de leurs paramètres physiques, et du processus

de tournage, par l'estimation de l'usure évaluée par l'intermédiaire de la valeur des coefficients  $K_{wj}$  de la relation (20) [C7, A1],

- une conduite visant à garantir la qualité de surface des pièces usinées, à augmenter la productivité et à réduire la maintenance par la mise en œuvre d'une stratégie adaptant les vitesses d'avance et de coupe qui a été associée à la surveillance des actionneurs par l'estimation des paramètres physique et du processus de coupe par une surveillance de l'usure.

Pour cette dernière conduite, les résultats de simulation ont montré que le temps moyen d'usinage était réduit et que plus de pièces pouvaient être usinées avant que l'outil n'atteigne une usure critique tout en garantissant l'intégrité de la machine en ne dépassant pas des efforts maximum sur les actionneurs. Enfin, les fonctionnalités de surveillance permettent une aide à la maintenance en fournissant [A2] :

- les valeurs des paramètres des axes pour la recherche d'origine de défauts ou encore pour le pronostic en analysant les évolutions de ces valeurs,
- des estimations de l'usure des outils pour leur remplacement d'outils avant qu'elle ne soit critique,
- un autodiagnostic des chaînes de mesures des actionneurs.

Cependant, les choix des traitements proposés ont été guidés par certaines spécificités, notamment les motorisations des axes et broches et le procédé de d'usinage. Il nous a donc semblé souhaitable de capitaliser la démarche et les modèles que nous avons développés et d'en extraire et organiser les aspects plus génériques pour proposer un cadre de conception d'architectures de MOCN mettant en œuvre des agents au niveau décisionnel supplémentaire CAID que sont les CAI et un agent CNC de niveau décisionnel supérieur. Nous avons défini les fonctionnalités que ces agents devaient mettre en œuvre et proposé des réalisations. Nous avons élaboré des modèles représentant leur comportement dynamique ainsi qu'une trame montrant les échanges pour leur collaboration dans la réalisation des fonctionnalités la requérant. Ces agents étant des objets logiciels, plusieurs architectures matérielles possibles ont été définies et des critères de choix permettant d'en privilégier une plus qu'une autre proposés [A3]. De futurs développements peuvent consister à intégrer dans cette architecture d'autres traitements à des fins de surveillance, de diagnostic, de pronostic et/ou d'accommodation à l'état de la machine et/ou du procédé qui peut être autre que de l'usinage.

La démarche et les modèles proposés constituent des connaissances dont la capitalisation peut avoir pour but une aide à la conception par leur réutilisation ou leur adaptation lorsque des besoins de similaires apparaissent. Ainsi, l'entreprise peut gagner en réactivité dans le développement de nouvelles machines-outils.

### 3 Modélisation d'un retour d'expérience cognitif

L'idée que les connaissances forment un capital immatériel détenu par différents acteurs est aujourd'hui largement acceptée dans les entreprises ou autres organisations sociotechniques. La gestion de ces connaissances vise à les expliciter dans le but de rendre les processus des organisations sociotechniques plus efficaces mais aussi de faciliter la transmission des savoirs et expertises de leurs personnels. Ces préoccupations sont d'autant plus prégnantes lorsque les organisations doivent faire face à des fortes mobilités de leurs personnels (changement de projets ou de postes, départs...).

Parmi les approches qualifiées d'opérationnelles de gestion des connaissances, le retour d'expérience peut être considéré comme une approche ascendante de gestion des connaissances. En effet, il est issu d'informations factuelles analysées constituant un ensemble de connaissances qui peut être réutilisé. Ainsi, la mise en œuvre de retour d'expérience dans une organisation sociotechnique nécessite de s'interroger sur la capitalisation des expériences et sur les moyens de les réutiliser. Pour la capitalisation, il s'agit de définir les différents éléments caractérisant une expérience et de les organiser. La réutilisation d'expériences nécessite d'appréhender la nature des connaissances à extraire des expériences capitalisées et des outils à mettre en œuvre ou à développer pour effectuer cette extraction.

Les développements réalisés au cours de cette troisième partie de mon parcours recherche ont été menés en partie parallèlement à la deuxième. Ils sont relatifs au projet SUP (Sécurité Urgences Pyrénées) dont une finalité consistait en un retour d'expérience dédié à de la prévention du risque en raison du domaine d'application. C'est dans ce contexte que Cédric Béler a effectué ses travaux de thèse [ThBéler] dirigée par Laurent Geneste et que j'ai co-encadrés. Ils ont porté sur un retour d'expérience cognitif ayant pour objectifs de collecter des fragments de connaissances : les expériences qui sont des représentations structurées de faits passés auxquels sont associés des éléments d'analyse ou de description des solutions apportées ; puis de mettre en œuvre des mécanismes d'exploitation des expériences permettant l'extraction d'indicateur de risque. Ces travaux ont comporté trois volets.

Un premier volet a porté sur la représentation des expériences permettant de prendre en compte les incertitudes, notamment sur les éléments d'analyse ou de description des solutions apportées. Pour cela un modèle de représentation des expériences a été proposé basé sur une structure « objet » (attribut-valeur étendue). Si cette approche ne permet certes pas des inférences aussi poussées qu'avec d'autres langages de représentation formels des connaissances, il nous a semblé qu'elle permettait aux acteurs d'exprimer plus facilement des connaissances. La représentation des connaissances proposée permet également de prendre en compte le fait que certaines informations, notamment celles renseignées par des acteurs humains (des experts) à propos de faits, d'événements et d'autres informations en relation avec un environnement réel, puissent être incertaines, imprécises ou incomplètes.

Le deuxième volet a été consacré à l'exploitation du retour d'expérience. A partir de la représentation de l'expérience, l'exploitation proposée est inspirée du mécanisme de recherche par similarité mis en œuvre dans le domaine du raisonnement à partir de cas (*Case-Based Reasoning* - CBR). Pour cela, les méthodes et techniques de calcul de similarité employées pour des formalismes objets ou attributs-valeurs ont été détaillés. Pour les éléments de représentation de l'expérience relatifs à l'expression de l'incertitude, l'imprécision ou l'incomplétude, des mesures de similarité ensemblistes ont été proposées. Ces mesures de similarités ont été mises en œuvre dans un algorithme récursif constituant principal du moteur de recherche dans la base d'expériences. Deux variantes de cet algorithme ont été proposées : l'une pour une recherche relative à certaines informations choisies et pondérées et l'autre pour une recherche qui tient compte des analyses expertes réalisées durant la phase de capitalisation.

Le troisième volet a été consacré à l'élaboration d'un indicateur de risque basé sur les expériences extraites. La proposition consiste en l'extension de la représentation d'une expérience par un descripteur représentant la gravité. L'indicateur de risque a été élaboré en conservant une proximité avec les référentiels traditionnels de type « occurrence-gravité ». Pour cela, un algorithme a été défini pour calculer les similarités globales pour chaque gravité correspondante d'expérience et d'extraire une mesure globale du risque.

Les propositions issues de ces trois volets ont été développées, dans le cadre d'un projet européen relatif à la sécurité en montagne. Cependant, un cadre plus générique a été proposé qui permet de réaliser aisément des applications de retour d'expérience, notamment dans des contextes industriels.

### 3.1 Modélisation de l'expérience

Afin de modéliser l'expérience dans le cadre d'une application de retour d'expérience, nous nous sommes évidemment intéressés au retour d'expérience lequel concerne, au sens large, l'analyse d'un fait ou d'un événement passé dans le but d'exploiter la connaissance qui en découle. Cette exploitation peut tout aussi bien consister à se rapprocher de situations s'il s'agit d'expériences positives ou de s'en éloigner s'il s'agit d'expériences négatives. Après une étude des différentes définitions et caractéristiques du retour d'expérience, nous avons retenu la définition suivante (Rakoto *et al.*, 2002) [O1] :

*« Le retour d'expérience est une démarche structurée de capitalisation et d'exploitation des connaissances issues de l'analyse d'événements positifs et/ou négatifs. Elle met en œuvre un ensemble de ressources humaines et technologiques qui doivent être organisées pour contribuer à réduire les répétitions d'erreurs et à favoriser certaines pratiques performantes ».*

L'architecture de retour d'expérience, qui a servi de support à ces travaux, consiste en une généralisation d'approches associées au domaine industriel (Rakoto, 2004) à laquelle le positionnement d'une étape d'analyse de contexte a été ajouté. Cette étape intervient lors de la définition de l'expérience. Le retour d'expérience peut être considéré comme un processus global de transmission de connaissances composé de deux processus opérationnels que sont la capitalisation et l'exploitation. Dans cette architecture, une base de retour d'expérience sert de pivot comme cela est représenté sur la Figure 25.

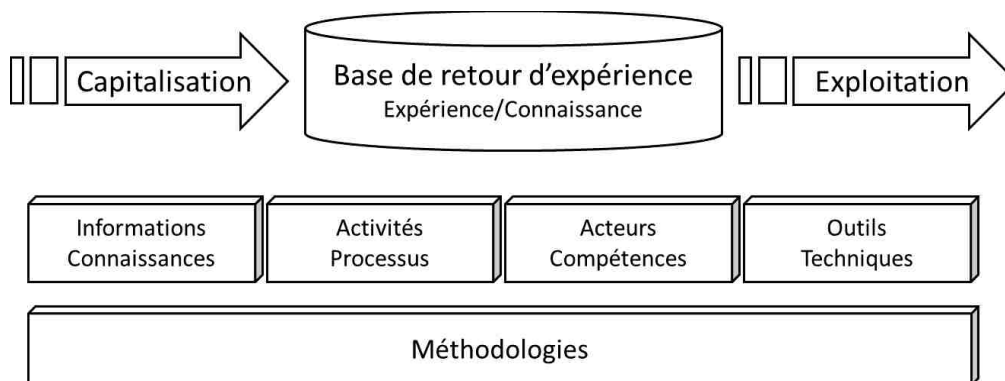


Figure 25. Méthodologies, processus et composants support du retour d'expérience

La vue globale du processus de retour d'expérience représentée par la Figure 25 montre que sa mise en œuvre nécessite la prise en compte de quatre dimensions :

- « informations et connaissances » qui concerne la modélisation de l'entité expérience, l'organisation de cette entité et en particulier le lien entre donnée, information et connaissance,

- « activités et processus » qui précise les différents processus du retour d'expérience et les tâches qui les composent. Les processus de capitalisation et d'exploitation sont déclinés en plusieurs sous-processus construits à partir de plusieurs activités,
- « acteurs et compétences » qui définit les rôles et les responsabilités des différents acteurs par rapport à leur utilisation du système,
- « outils et techniques » en rapport avec les moyens logiciels et de gestion mis en œuvre pour pouvoir opérationnaliser le retour d'expérience.

La modélisation de l'expérience considère évidemment la dimension « informations et connaissances ». Il a donc fallu définir un modèle ou un langage adapté à la représentation de l'expérience. Puis l'expérience a été structurée en plusieurs sections : un évènement, son contexte, des analyses expertes réalisées à partir du contexte, des solutions et des leçons apprises (notion de *lesson learned*). Nous nous sommes également concentrés sur la finalité du retour d'expérience dédié à de la prévention du risque en raison du domaine d'application relatif projet SUP (Sécurité Urgences Pyrénées) qui était un projet Interreg III A France/Espagne décrit dans la partie « synthèse des activités de recherche et d'enseignement » de mémoire. Cet aspect de prévention, assez peu traité dans la littérature, a nécessité de considérer la façon dont les experts analysent un contexte pour en caractériser les éléments ayant favorisé l'occurrence d'un évènement négatif. Il fallait également tenir compte que, dans le contexte du projet SUP, les approches probabilistes d'évaluation des risques ne sont pas adaptées car les expériences traitées sont peu nombreuses et peuvent être incomplètes ou imparfaites dans leur description.

Deux grandes approches sont distinguées dans la littérature pour la représentation des connaissances : celles basées sur une logique (Moore, 1982 ; Wang 2006) et celles basées sur les *frames* (approches structurelles) (Minsky, 1975). Ces approches sont souvent combinées pour former des approches « hybrides » comme les réseaux et les graphes conceptuels (Quillian, 1966), les langages *post frames* et centrés objets (Dekker, 1994), les logiques de description (Brachman et Schmoltze, 1985). L'étude de ces approches a guidé nos choix pour la modélisation des expériences devant alimenter la base d'expériences en vue d'être exploitées à des fins de prévention de risques.

### 3.1.1 Choix d'une représentation

Les méthodes d'ingénierie des connaissances et les outils de développement orientés objet du génie logiciel sont relativement proches même si la littérature du génie logiciel et de l'ingénierie des connaissances font apparaître une nette distinction. Cependant, des primitives communes existent entre représentation d'ontologies et modélisation orientée objet comme cela est montré sur la Figure 26 définie issue de (Knublauch, 2002).

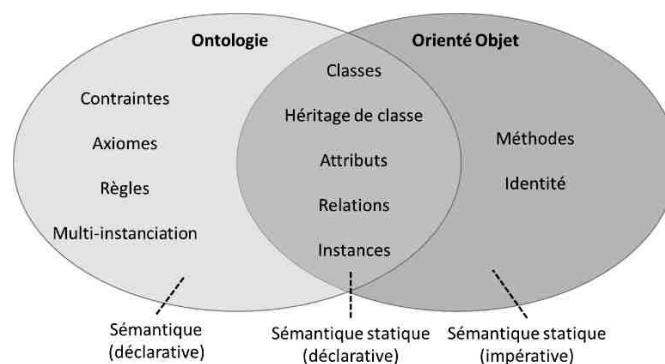


Figure 26. Primitives de modélisation d'ontologies et orientée objet

Les primitives communes sont celles relatives à la structuration de l'information. Les différences majeures proviennent de la sémantique impérative des langages de programmation orientés objet introduite principalement par les méthodes. Les langages de représentation d'ontologies utilisent davantage de sémantique déclarative permettant d'exprimer des contraintes, des axiomes et des règles.

UML a également été retenu pour cette étude. Les diagrammes, associés à leur modèle standardisé, sont des outils graphiques en partie interprétables par un système informatique. Un inconvénient est toutefois lié à un certain manque de sémantique pour la représentation des connaissances qui peuvent être partiellement compensé, car non-implémentée directement par les logiciels, par les notes (Cranefield et Purvis, 1999) ou des documentations associées aux modèles. Malgré cela, le paradigme orienté objet a été pris comme point de départ.

### 3.1.2 Modélisation de l'incertitude

Les expériences peuvent être considérées comme des collections d'informations qui traduisent un contexte dont les informations sont rarement connues avec précision. Elles peuvent aussi être totalement inconnues dans certains cas. Le formalisme retenu pour modéliser les expériences devait permettre de représenter ces imperfections de l'information et de les intégrer dans les différents processus de retour d'expérience afin de disposer de résultats convenables. Ces imperfections de l'information devaient aussi être propagées des données initiales jusqu'au résultat final. L'imperfection de l'information peut prendre quatre formes lorsqu'elle provient d'une source unique :

- l'**incertitude** qui est relative à la vérité d'une information, et caractérise son degré de conformité à la réalité. Elle fait référence à la nature de l'objet ou du fait concerné, à sa qualité, à son essence ou à son occurrence,
- l'**imprécision** qui concerne le contenu de l'information et indique donc son défaut quantitatif de connaissance,
- l'**incomplétude** qui caractérise l'absence d'information apportée par la source sur certains aspects du problème,
- l'**ambiguïté** qui exprime la capacité d'une information à permettre des interprétations différentes,

auxquelles s'ajoutent si l'information provient de sources multiples :

- le **conflit** qui caractérise plusieurs informations conduisant à des interprétations contradictoires et donc incompatibles. Les situations conflictuelles sont fréquentes dans les problèmes de fusion de données et aussi de prise de décision (cas des analyses multi-expertes),
- la **redondance** qui est l'opposée du conflit. Selon certains points de vue c'est un aspect positif, puisqu'il peut venir confirmer une information. La redondance entre les sources est souvent observée, dans la mesure où les sources donnent des informations sur le même phénomène. Dans ce cas elle n'est pas gênante et peut être agrégée.

Des définitions de l'imperfection de l'information sont données dans (Motro et Smets, 1997).

L'approche subjective de représentation de ces imperfections a été retenue qui considère la probabilité comme la mesure personnelle de la croyance en l'occurrence de l'événement (Dubois *et al.*, 2003). En effet, la probabilité  $y$  est interprétée comme la traduction numérique d'un état de connaissance (la connaissance d'un expert par exemple). Trois cadres de développements théoriques répondent à cette approche.

- La théorie des probabilités, associée à la théorie bayésienne de la décision pour la décision dans l'incertain. Si la théorie des probabilités permet de bien représenté l'incertitude, elle ne peut représenter que difficilement l'imprécision de l'information. Elle est donc peu adaptée à la représentation de l'incertitude liée à l'expertise.
- La théorie sous-ensembles flous fournit un cadre permettant de représenter explicitement des informations imprécises, au moyen de fonctions d'appartenance (Zadeh, 1965). La théorie des possibilités (Dubois et Prade, 1988), dérivée de la théorie des sous-ensembles flous permet de représenter l'incertitude et l'imprécision au moyen de fonctions de possibilité et de nécessité. Ces théories offrent une grande variété d'opérateurs prenant en compte des mesures de conflit ou encore de fiabilité des sources. Cependant, les capacités d'expression présentent quelques limites comme l'impossibilité de représenter une incertitude probabiliste.
- La théorie des fonctions de croyance (*theory of evidence*) est basée sur l'affectation de mesures subjectives non-additives des chances de réalisation d'un évènement voire d'un groupe d'évènements. Elle permet d'exprimer un avis personnel basé sur la croyance (état de connaissance) de l'individu. Elle est aussi particulièrement adaptée à l'acquisition d'informations, analyses et autres connaissances fournies par un expert. Elle offre, en effet, une représentation des connaissances partielles, de l'ignorance totale jusqu'à la connaissance parfaite. La théorie des fonctions de croyance intègre aussi des outils permettant de combiner des informations issues de sources différentes. Proposée par Dempster puis Shafer lui vaut d'être aussi connue sous le nom de théorie de Dempster Shafer (*Dempster Shafer Theory – DST*). Le modèle de Shafer (1976) est basé sur l'acceptation d'une mesure de probabilité sur un espace sous-jacent (ensemble des hypothèses possibles). Le modèle des croyances transférables (*Transferable Belief Model – TBM*) est une interprétation subjectiviste non probabiliste des fonctions de croyances (Smets et Kennes, 1994). La théorie des fonctions de croyance est un cadre riche et flexible permettant la représentation et la gestion de différentes formes d'incertitude.

Le TBM a semblé bien adapté pour les travaux de cette thèse car il est adapté à la représentation de l'expertise que nous associons aux expériences et n'utilise pas la base probabiliste comme la DST. Ce modèle distingue également le niveau crédal (croyance) du niveau pignistique (décisionnel) qui a semblé pertinent dans le cadre du retour d'expérience.

### 3.1.3 Introduction du modèle des croyances transférables (TBM)

Le TBM interprète une fonction de croyance comme la représentation de l'opinion d'un agent rationnel relativement à une certaine question, sans référence à une probabilité ou une famille de probabilités sous-jacentes. Ce cadre repose sur l'hypothèse que raisonnement dans l'incertain (niveau crédal) et décision (niveau pignistique) sont deux tâches cognitives de nature différentes. Cependant, le passage du niveau crédal au niveau pignistique n'est pas réversible. C'est pourquoi le passage du niveau crédal au niveau pignistique dans un processus doit être fait au moment où celui-ci devient nécessaire pour une prise de décision, les autres opérations devant être effectuées au niveau crédal.

La représentation de l'incertitude retenue a essentiellement été faite par l'intermédiaire de masses de croyance élémentaires (appelé aussi *basic belief assignment – bba*). On considère pour cela une variable incertaine  $\omega$  dont le référentiel de définition (univers des possibles) correspond à un ensemble fini de valeurs, d'états ou d'hypothèses du problème traité appelé cadre de discernement noté  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\} = \cup \omega_i$ . Dans le TBM, les  $\omega_i$  doivent être mutuellement exclusifs (ils ne peuvent pas être vrai en même temps) et  $\Omega$  doit être exhaustif.



Une fonction de masse ou structure de croyance est la distribution d'une masse unitaire de croyance parmi tous les sous-ensembles possibles de valeurs de  $\omega$  noté  $2^\Omega$ .  $\varepsilon$  étant un sous-ensemble de  $\Omega$ , on a :  $2^\Omega = \{\varepsilon \subseteq \Omega\} = \{\emptyset, \{\omega_1\}, \{\omega_2\}, \dots, \{\omega_1, \omega_2\}, \dots, \Omega\}$ .

La structure de croyance traduit un état de connaissance partiel sur la valeur d'une variable  $\omega$  dont les valeurs sont dans  $\Omega$ .  $m_S^\Omega(\varepsilon)$  correspond à la « part » de croyance allouée par une source  $S$  à l'hypothèse «  $\omega \in \varepsilon$  » et à aucune hypothèse plus restrictive, étant donnée une base de connaissance  $B$ . La notation complète est  $m_S^\Omega\{\omega\}[B]$ . Dans la littérature, le «  $m$  » est parfois remplacé par « *bba* ». Une structure de croyance est donc :

$$m^\Omega = \begin{cases} 2^\Omega \rightarrow [0,1] \\ \sum_{\varepsilon \in \Omega} m^\Omega(\varepsilon) = 1 \end{cases}$$

Le fait d'allouer de la masse de croyance à des éléments de  $2^\Omega$  qui ne sont pas des singletons permet de représenter l'ambiguïté, l'incomplétude, l'imprécision et l'incertitude. Par exemple, si  $m(\{1,2,3\}) = 1$ , cela signifie qu'on est sûr que  $\omega$  vaut 1, 2 ou 3.

Les éléments de  $2^\Omega$  ayant une masse non nulle sont appelés éléments focaux et forment le noyau de la structure de croyance  $N_m^\Omega$  :

$$N_m^\Omega = \{\varepsilon \in 2^\Omega | m^\Omega(\varepsilon) > 0\}$$

Lorsque le noyau de la structure de croyance ne comporte que des singletons ( $N_m^\Omega \subseteq \Omega$ ), la distribution est dite « dogmatique » et correspond à une distribution de probabilité (distribution de masse bayésienne).

Dans l'hypothèse du monde fermé,  $\emptyset$  est l'évènement impossible et  $m^\Omega(\emptyset) = 0$ . Dans l'hypothèse du monde ouvert  $m^\Omega(\emptyset) \geq 0$ , dans ce cas, soit  $\emptyset$  correspond à toutes les valeurs, états ou hypothèses omis, soit il représente une information « impossible » qui traduit, par exemple, le conflit entre plusieurs sources d'informations et sa valeur représente alors une mesure de ce conflit.

Deux autres mesures sont associées aux structures de croyance : la plausibilité notée  $Pl$  et la croyance notée  $Cr$  (ou *Bel* pour *Belief*). La croyance est la somme des masses de croyance de tous les sous-ensembles  $\varepsilon_k$  de l'ensemble d'intérêt  $\varepsilon_i$  :  $Cr(\varepsilon_i) = \sum_{\varepsilon_k \subseteq \varepsilon_i} m^\Omega(\varepsilon_k)$ . La plausibilité est la somme des masses de croyance de tous les ensembles  $\varepsilon_k$  ayant une intersection non vide avec l'ensemble d'intérêt  $\varepsilon_i$  :  $Pl(\varepsilon_i) = \sum_{\varepsilon_k \cap \varepsilon_i \neq \emptyset} m^\Omega(\varepsilon_k)$ . En notant  $\bar{\varepsilon}_i$ , le complément de  $\varepsilon_i$ , la plausibilité et la croyance sont reliées par :  $Pl(\varepsilon_i) = 1 - Cr(\bar{\varepsilon}_i)$ . La différence  $Pl(\varepsilon_i) - Cr(\varepsilon_i)$  peut être considérée comme l'ignorance associée à  $\varepsilon_i$ . Dans les approches probabilistes de la DST,  $Cr(\varepsilon_i)$  et  $Pl(\varepsilon_i)$  peuvent être respectivement considérées comme la limite inférieure et la limite supérieure de la probabilité des éléments de  $\varepsilon_i$ .

Le passage du niveau crédal au niveau pignistique est effectué à partir de la structure de croyance par une simple opération définissant la probabilité pignistique notée  $BetP$  où :

$$BetP(\varepsilon_i) = \sum_{\varepsilon_k \in 2^\Omega} m^\Omega(\varepsilon_k) \frac{|\varepsilon_i \cap \varepsilon_k|}{|\varepsilon_k|}$$

Cependant, la décision peut être prise à partir des mesures de croyance ou de plausibilité.

Le cadre formel riche défini par la DST et le TBM, permet d'effectuer des révisions de l'information apportant ainsi un aspect dynamique à celle-ci. Ceci présente un intérêt certain lorsque les informations sur un même évènement proviennent de plusieurs sources c'est-à-dire lorsqu'on dispose plusieurs structures de croyance pour un même cadre de discernement. Ces révisions permettent de définir le

conflit entre les sources, d'opérer des révisions conjonctives ou disjonctives en fonction du conflit, d'affaiblir des sources pouvant être considérées comme peu fiables... Ces révisions sont détaillées dans [ThBéler].

### 3.1.4 Un formalisme hybride objet incertain

Le choix pour la représentation de l'expérience a porté sur une « hybridation » de la modélisation orientée objet et les structures de croyance. Le but était de définir un cadre extensible basée sur une modélisation orientée objet permettant d'exprimer la structure des expériences sous la forme d'ensembles de couples (attribut, valeur) autorisant les attributs composites (attributs contenant d'autres attributs de types différents). Les structures de croyance permettent de joindre à cette structuration de l'expérience la représentation de l'incertitude.

La modélisation orientée objet facilite la représentation d'organisations hiérarchiques de type taxonomie puisqu'elle y est nativement présente. Les fonctions de croyance, permettant de représenter la plupart des imperfections de l'information, sont également bien adaptées à une représentation par attribut et valeur sachant que l'attribut est une composante intrinsèque fondamentale de la notion d'objet (Blaha et Rumbaugh, 2005). L'attribution de confiance sur des sous-ensembles du domaine de décision nous a semblé traduire très bien l'attitude des experts lorsqu'ils s'expriment. Le TBM a été retenu car il permet de ne plus considérer les aspects probabilistes et permet d'utiliser l'hypothèse du monde ouvert permettant d'attribuer de la croyance à toute hypothèse ne faisant pas partie du cadre de discernement signifiant, par exemple, que des éléments d'explication d'un évènement seraient absents du cadre d'analyse ou de discernement.

La structuration de l'expérience est représentée sur la Figure 27. Cette structuration définit le vocabulaire utile au processus de retour d'expérience soit l'ontologie du retour d'expérience. Elle représente aussi l'ontologie du domaine et donc le vocabulaire utilisé : évènement, contexte, analyse et solution qui dépendent du domaine d'application. Afin d'assurer une certaine genericité du retour d'expérience, nous avons choisi de développer un modèle générique, indépendant de l'ontologie du domaine.

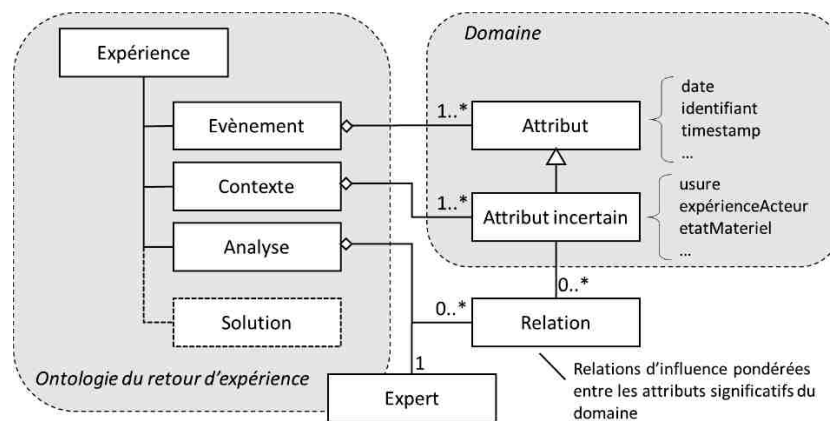


Figure 27. Structuration de l'expérience [ThBéler]

En effet, la partie de gauche de la Figure 27, exprimée dans un formalisme UML, décrit l'ontologie du retour d'expérience où il s'agit d'une taxonomie reprenant les entités identifiées : évènement, contexte... Les relations avec les attributs qui caractérisent l'évènement et celles avec les attributs incertains qui caractérisent le contexte y sont représentées. L'ontologie de domaine n'est cependant pas représentée sur ce schéma. Toutefois, la classe attribut incertain représente les points à partir desquels les attributs du domaine seront créés par sous-classage.

Ces attributs simples ou objets, aussi nommés « descripteurs », sont en relation avec le domaine. Les attributs sont valués au moyen de la représentation issue du TBM. L'attribut est ainsi une interface entre le langage objet et le TBM. L'analyse fait aussi intervenir l'incertitude mais de manière différente à celle du contexte. L'entité analyse est une relation entre informations disponibles. Dans notre cas, il s'agit de la conjonction des attributs significatifs qui caractérisent au mieux l'occurrence de l'évènement selon le point de vue d'un expert.

Deux entités incertaines font partie du modèle : l'attribut incertain et l'analyse. L'attribut incertain permet de représenter des valeurs d'attributs imprécises, incertaines, voire inconnues. La possibilité est offerte à l'utilisateur de sélectionner parmi les valeurs de l'attribut celles qui sont possibles au lieu de ne choisir qu'une valeur unique et donc précise. Le domaine des valeurs d'un attribut formant ainsi un cadre de discernement qu'il faut discrétiser dans certain cas, car les cadres de discernement sont des ensembles finis. Une interface peut aider l'utilisateur à définir une structure de croyance pour les attributs incertains plutôt que de le laisser affecter des masses de croyance sur chaque partie de l'ensemble des parties du cadre de discernement. L'analyse des experts est également traduite au moyen de relations qui sont incertaines. Le choix a été fait de permettre à l'expert d'explicitier une analyse imparfaite, avec des doutes.

Un élément d'information est quadruplet (attribut, objet, valeur, confiance) (Dubois et Prade, 1988). Il renvoie à une fonction qui affecte une valeur ou ensemble de valeurs à l'objet dont le nom figure dans l'élément d'information. Cependant, l'objet peut être composite et donc faire appel à plusieurs objets du domaine pouvant eux-mêmes être composites. Il est question de descripteurs pour les éléments d'information et d'attributs pour les variables des objets du domaine. Un contexte est composé de descripteurs simples ou de descripteurs composites (dits objets). Pour un descripteur simple  $d_i^S$  le cadre de discernement est  $\Omega_i^S = \{s_1^i, s_2^i, \dots, s_n^i\}$  avec une structure de croyance  $\nu_i^S$  sur  $2^{\Omega_i^S}$  et pour un descripteur objet  $d_i^O$  le cadre de discernement est  $\Omega_i^O = \{o_1^i, o_2^i, \dots, o_n^i\}$  avec une structure de croyance  $\nu_i^O$  sur  $2^{\Omega_i^O}$ . Ceci conduit à une représentation arborescente comme ceci est montré sur l'exemple de la Figure 28.

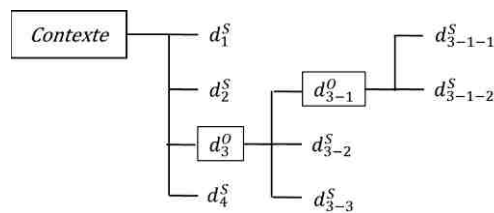


Figure 28. Représentation hiérarchique arborescente avec descripteurs simples et objet

Selon l'interface développée, cette structuration peut permettre à l'expert de ne pas forcément descendre dans les détails de certains éléments de contexte lors de la définition des structures de croyance correspondant à une analyse d'un contexte.

Les interfaces ont pour but de permettre aux utilisateurs d'enrichir la base d'expériences par, dans un premier temps, la saisie des éléments contextuels d'un évènement, puis, dans un second temps, par la saisie des experts de leurs analyses portant sur les éléments de contextes consistant, de façon assistée ou non, en la définition de structures de croyance sur les descripteurs de contexte.

L'arborescence, présentée sur la Figure 28, permet des traitements récursifs lors du processus d'exploitation du retour d'expérience.

## 3.2 Exploitation des expériences

La suite des travaux a consisté en des développements d'algorithmes permettant d'exploiter une base d'expériences dans laquelle les expériences sont représentées à l'aide du formalisme hybride proposé. Deux familles d'algorithmes ont été développés : ceux qui permettent de rechercher des expériences en fonction d'un contexte courant et ceux qui extraient une connaissance plus générale de la base. A l'égard de l'application de prévention cible du projet SUP, cette extraction a consisté à déterminer un indicateur de risque.

### 3.2.1 Indicateur de risque basé sur l'expérience

La proposition de la construction d'un indicateur de risque a été fortement conditionnée par le projet Interreg IIIA France-Espagne SUP dont un démonstrateur de retour d'expérience dédié à la prévention des risques liés à la pratique d'activités en montagne faisait partie des livrables. L'idée qui a conduit à cette proposition d'indicateur de risque est qu'à partir de la description d'un contexte courant, si des accidents ont eu lieu dans des contextes similaires, alors l'utilisateur de la plateforme de retour d'expérience peut renforcer sa vigilance sur l'activité qu'il souhaite mener dans ce contexte ou bien la reporter. Les algorithmes présentés dans le paragraphe 3.2.2 permettent d'extraire de la base d'expériences les situations pour lesquelles des accidents ont eu lieu pour des contextes similaires. Cependant, il nous a alors semblé intéressant de construire un indicateur de risque exploitant la base de retour d'expérience permettant d'explicitier une connaissance implicite contenue dans les expériences.

#### 3.2.1.1 Notions de risque

Le risque est très souvent considéré comme la combinaison d'aléas et de vulnérabilité qui, en d'autres termes, correspond au potentiel d'occurrence d'un ou plusieurs événements non souhaités voire redoutés et les dommages potentiels dont ils seraient la conséquence. Le risque peut donc être perçu comme :

- une situation potentielle non souhaitée ayant des conséquences négatives résultant de la survenue d'un ou plusieurs événements dont l'occurrence est incertaine,
- tout événement redouté qui réduit l'espérance de gain ou d'efficacité dans une activité humaine.

L'évaluation du risque est souvent donnée par un produit  $aléa \times vulnérabilité$ , où l'aléa représente les chances d'occurrence d'un événement et la vulnérabilité les pertes potentielles associées.

Cependant, cette approche du risque constitue une simplification car aléa et vulnérabilité ne sont pas toujours indépendants. En effet, une avalanche peut-être déclenchée par un skieur auquel cas, le skieur, en relation avec la vulnérabilité est aussi responsable de l'occurrence de l'évènement tout en étant victime s'il a été emporté par celle-ci. Dans le cas des risques naturels, le risque, selon Asté (2001), est associé à des pertes, dommages, préjudices ou dysfonctionnements potentiels susceptibles d'être générés directement ou indirectement par un phénomène pressenti. La notion de risque exprime toujours la notion d'aléa et de vulnérabilité mais, dans ces travaux, la relation entre les deux est indéfinie comme l'indique la formulation « susceptibles d'être générés directement ou indirectement ».

Une vision complémentaire du risque est l'approche causes/conséquences. Dans cette approche, les conséquences dommageables font suites à l'apparition d'évènements déclencheurs appelés « causes ». Le risque y est considéré comme une combinaison causes/situation/conséquences et peut être représenté comme sur la Figure 29 issue de (Gouriveau, 2003).

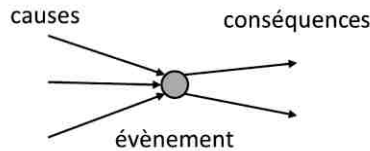


Figure 29. Approche causes/conséquences du risque

Si cette approche présente comme avantage de présenter un caractère relativement général et d'être facile à mettre en œuvre dans les systèmes informatiques, la caractérisation des causes et des conséquences reste souvent complexe. Il existe de nombreux cas dans lesquels la méconnaissance des phénomènes est telle qu'il n'est pas possible de déterminer et de quantifier avec certitude les différents facteurs entraînant un évènement particulier. Il est donc assez rare de donner des mesures d'occurrence justes et précises d'un évènement ou d'un phénomène.

Pour pallier ceci, des référentiels de risque peuvent être définis à l'aide de valeurs échelonnées. Sachant que le risque nul n'existe pas, ces valeurs échelonnées vont souvent d'une valeur 1 (risque minimum ou faible) à une valeur haute (risque maximum ou très élevé). La valeur haute ne signifie pas pour autant que l'évènement redouté surviendra mais juste que les conditions sont très favorables pour qu'il survienne. Un référentiel de risque est un outil qui permet de relier aléa, vulnérabilité (ou gravité) et niveau de risque. La hiérarchisation des évènements entraîne naturellement la prise en compte d'un référentiel du risque. Intuitivement, nous comprenons que des évènements de gravité modérée ou faible peuvent être tolérés dans une certaine mesure contrairement aux évènements graves et aux catastrophes. Ainsi, un évènement possiblement grave mais peu fréquent pourra conduire au même niveau de risque qu'un évènement bénin se produisant quasiment à chaque réalisation des conditions favorables. Sachant que le risque peut être exprimé en fonction de l'occurrence de l'évènement et de la gravité des conséquences (l'impact), nous pouvons utiliser un référentiel qui considère le niveau de risque  $R$  donné par une fonction de  $P$  (occurrence) et  $I$  (Impact). L'association occurrence/impact peut alors être matérialisée par le positionnement dans le plan  $(P,I)$  d'un point représentatif de cette situation (voir Figure 30).

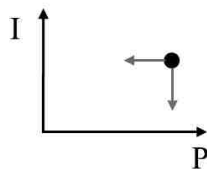


Figure 30. Situation de risque

Dans le cas des expériences, des courbes iso-risque ont été définies dans le plan  $(P,I)$  à partir de la fonctionnel paramétrable, définie dans (Gouriveau, 2003),  $I = \frac{R-a.P}{b+(1-a-b).P}$  où  $R$  est le risque,  $I$  est la gravité des conséquences potentielles,  $P$  est le degré d'occurrence et  $a$  et  $b$  les paramètres variant entre 0 et 1. Cinq valeurs ont été retenues pour le référentiel de risque pour les expériences comme cela est présenté sur la Figure 31 allant de  $I$  (faible ou acceptable) à  $V$  (très élevé ou inacceptable)

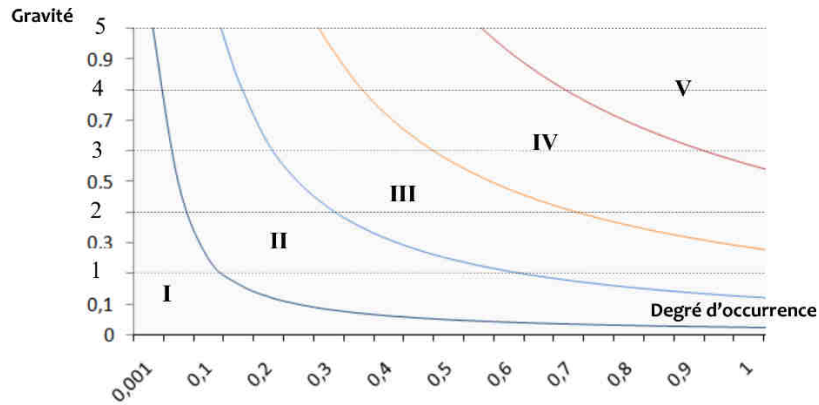


Figure 31. Référentiel du risque pour les expériences [ThBéler]

La mise en œuvre du TBM dans la modélisation des expériences a nécessité, tant pour la gravité que pour le degré d'occurrence, à leur discrétisation conduisant au partitionnement des niveaux de risque représentée sur la Figure 32. Le degré d'occurrence ne correspond donc pas à une probabilité mais à une distribution de masse bayésienne. Le principe de construction de l'indicateur du risque consiste à positionner sur ce graphe chaque contribution d'expérience pondérée par son degré de similarité global. Après avoir effectué ce positionnement sur le graphique, il est possible d'établir une nouvelle distribution de masse sur l'ensemble  $\{I, II, III, IV, V\}$ .

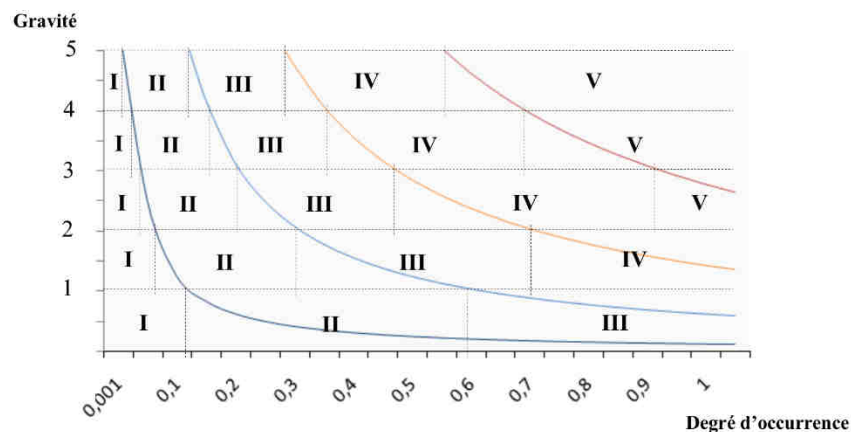


Figure 32. Partitionnement des niveaux de risque [ThBéler]

### 3.2.1.2 Construction d'un indicateur de risque basé sur des expériences

Dans le contexte du projet SUP liés aux activités professionnelles en montagne, la base de retour d'expérience ne comporte que des expériences négatives donc des contextes associés à des dommages. La recherche d'expériences pertinentes par rapport à un contexte courant proposé dans le paragraphe 3.2.2 permet d'obtenir un ensemble d'expériences négatives significatives. Comme le nombre d'expériences est faible, l'évaluation du risque ou du degré d'occurrence ne peut pas être effectué par une approche statistique et l'aspect fréquentiel a donc été ignoré. L'indicateur construit consiste à établir une synthèse de la connaissance disponible dans les expériences. Il ne peut pas être considéré comme une mesure prédictive mais plutôt comme une information ciblée dépendant du contenu de la base de retour d'expérience.

Comme la notion de fréquence n'est pas considérée, l'approche qui a été proposée dans [ThBéler] diffère du cadre habituel d'évaluation des risques tout en conservant un référentiel similaire. L'indicateur proposé est basé sur l'hypothèse suivante : lors d'une confrontation à une nouvelle situation, si un événement s'est produit dans des conditions parfaitement similaires, alors la croyance qu'un événement

de même type peut se produire est maximum. L'indicateur est d'autant plus significatif que la base comporte un grand nombre d'expériences.

L'indicateur est construit, suite à une recherche par similarité avec un contexte courant, à partir de l'ensemble d'expériences collectées par l'agrégation de la contribution de chacune des expériences similaires et en tenant compte de la gravité et de l'analyse. Puis, un changement de référentiel est effectué afin de passer d'une famille de distributions de similarité (prenant ses valeurs entre 0 et 1) par niveaux de gravité à une distribution bayésienne sur le référentiel du risque. Ce transfert est effectué à partir des courbes iso-risque définies pour le domaine considéré.

L'algorithme permettant de construire cet indicateur comporte quatre étapes.

1. Suite à la recherche par similarité par rapport à un contexte courant, un tableau de distributions de masses bayésiennes de similarité est obtenu. Chaque masse est associée à un niveau de gravité. Les éléments qui traduisent l'analyse de l'expert sont connus.
2. L'algorithme effectue l'agrégation par niveau de gravité de chacune des masses des distributions pour chaque ensemble focal.
3. Les masses agrégées sont positionnées sur le référentiel du risque en fonction de la gravité.
4. A partir de ces masses agrégées et des seuils associés qui définissent les limites de niveaux de risque, la famille de distributions (par niveaux) est combinée en une seule distribution sur le référentiel du risque, fournissant l'indicateur du risque après normalisation.

Ces étapes sont représentées sur la Figure 33 pour un exemple simple où deux expériences sont issues de la recherche dans la base de retour d'expérience statuant chacune à un niveau de gravité *IV*. L'algorithme complet **Algorithme INDICATEUR<sub>RISQUE</sub>** est ensuite détaillé [ThBéler].

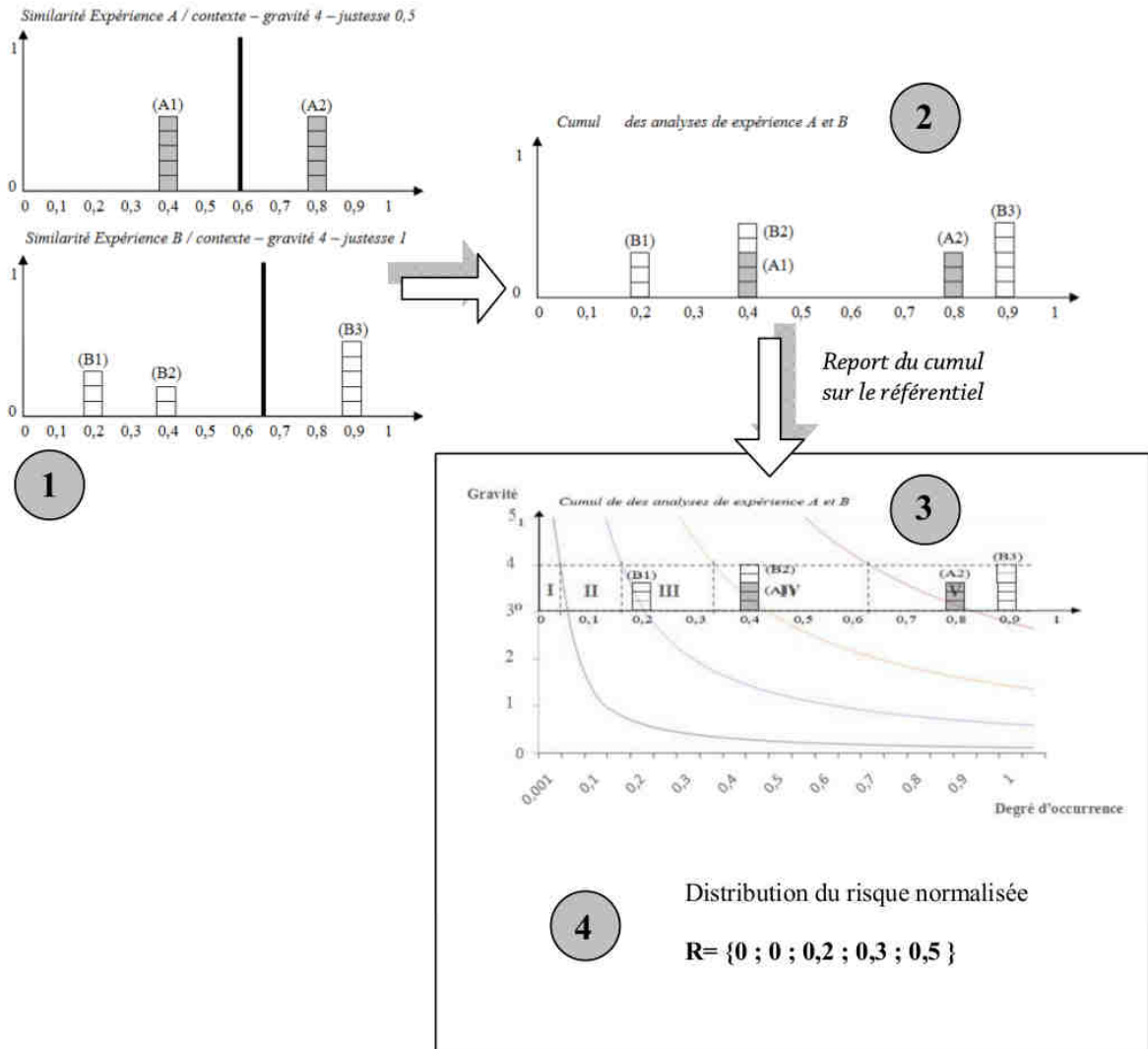


Figure 33. Etapes de la construction de l'indicateur de risque [ThBéler]

L'indicateur du risque défini par la méthode proposée est une distribution de masses de croyance bayésienne sur l'ensemble des niveaux de risque possibles. La construction de cet indicateur de risque constitue un cas d'utilisation dans un contexte de prévention du retour d'expérience développé dans le cadre du projet SUP en complément des cas d'utilisation de type « réutilisation de solutions » communément mis en œuvre dans le cadre du CBR.



## Algorithme INDICATEUR<sub>RISQUE</sub> (contexteCourant c[])

### entrées :

c[] le contexte courant contenant un ensemble de descripteurs  $[d_{c1}, \dots; d_{ci}, \dots; d_{cn}]$

Nombre g de niveau de gravité

Nombre r de niveau de risque

SIM<sub>agrég</sub>[] un tableau contenant g distributions de masses agrégées

Le tableau SIM<sub>agrég</sub> [] contient g tableaux de similarité Sim<sub>i</sub> [ ] = [0; ...; 0]<sub>m+1</sub> qui sont des distributions de masse bayésiennes (non normalisées).

N l'indice fonction du nombre d'expérience (analyse) prises en compte et de leur justesse

SEUIL<sub>risque</sub> [ ] [ ] matrice g x r contenant les valeurs seuils de chaque niveau de risque pour chaque niveau de gravité

### sortie :

RISQUE[ ], un tableau représentant le risque par une distribution de masse bayésienne sur  $\Omega = \{1; \dots; r\}$

TableauSIM ← COMPAREContexteCourant( )

N ← 0

Pour chaque valeur (a<sub>j</sub> → SIMbbaj) de TableauSIM

gravité ← a<sub>j</sub>.expérience.evenement.gravité

SIMbba<sub>temp</sub>[] ← SIM<sub>agrég</sub>[gravité]

coefficient ← a<sub>j</sub>.justesse

N ← N + coefficient

Pour chaque indice x de SIMbbaj[]

SIMbba<sub>temp</sub>[x] ← SIMbba<sub>temp</sub>[x] + SIMbbaj[x] \* coefficient

Fin Pour

SIM<sub>agrég</sub>[gravité] ← SIMbba<sub>temp</sub>[]

Fin Pour

Pour chaque indice k de SIM<sub>agrég</sub>[]

index ← 1

Limite ← SEUIL<sub>risque</sub>[k][index]

SimK[] ← SIM<sub>agrég</sub>[k]

SommeTotale ← 0

temp ← 0

Pour chaque indice<sub>i</sub> de SimK[]

SimTemp ← SimK[indice<sub>i</sub>]

Si SimTemp ≠ 0

Si Limite ≤ (indice<sub>i</sub> - 1)/m

index ← index + 1

Limite ← SEUIL<sub>risque</sub>[k][index]

temp ← 0

Fin Si

temp ← temp + SimTemp

Risque[index] ← Risque[index] + temp

SommeTotale ← SommeTotale + SimTemp

Fin Si

Fin Pour

Pour chaque indice<sub>i</sub> de Risque []

Risque [indice<sub>i</sub>] ← Risque [indice<sub>i</sub>] / SommeTotale

Fin Pour

**Retourne Risque[], et N**

❶ Appel d'algorithme de recherche dans la base basé sur l'algorithme : CALCUL<sub>AGREGATION</sub>ET()

❷ agrégation

TableauSIM est un tableau d'association (a<sub>j</sub> → SIMbba)

mémoriser les exp concernées ou analyses

❸ construction de la distribution de risque

pour la normalisation

optimiser si simtemp = 0

Limite suivante

correspondance entre les intervalles et la limite - a vérifier

❹ Normalisation de la mesure du risque

### 3.2.2 Recherche d'expériences

Les traitements de l'expérience réalisés sans tenir compte de l'analyse experte sont similaires, dans une certaine mesure, à ceux effectués dans le cadre du CBR et, en particulier, aux approches basées sur des représentations de cas selon un formalisme objet.

Le processus de CBR est parent du processus du retour d'expérience. Le CBR comporte une phase de capitalisation de situations, de contextes. Cette capitalisation a pour objectif, dans une phase d'exploitation, la remémoration de situations, contextes présentant des similarités avec une situation, un contexte courant afin d'élaborer une nouvelle solution au problème relatif à la situation ou au contexte courant par réutilisation ou adaptation des solutions remémorées dans l'hypothèse d'avoir des solutions similaires pour des problèmes semblables (Aamodt et Plaza, 1994). Ce processus de CBR correspond très bien à celui décrit pour le retour d'expérience sur la Figure 25. Le CBR traduit donc, le même type d'inférence que le retour d'expérience à savoir réutiliser, quand cela est possible, ce qui existe déjà pour traiter une nouvelle situation.

Cette inférence nécessite la comparaison entre une situation de référence ou courante et une situation de la base, pour pouvoir ensuite être effectuée sur l'ensemble des situations de la base. Pour mettre en œuvre cette comparaison, nos choix se sont focalisés sur la mesure de similarité.

La similarité est une mesure de proximité entre deux éléments. Une mesure de similarité n'est pas obligatoirement liée à une mesure de distance bien qu'il soit possible et classique de la définir comme telle. Distance et similarité sont des fonctions duales exprimant la proximité entre les éléments d'information (Bergmann, 2002). La similarité est définie comme une fonction  $f : \Omega \times \Omega \rightarrow [0, 1]$  ( $\Omega$  étant l'espace caractérisant une situation ou un contexte). Des contextes proches auront une similarité proche de 1. A l'inverse, des contextes très éloignés auront une similarité proche de 0. En notant  $sim$  une fonction de similarité,  $c$  un contexte courant et  $c_1$  et  $c_2$  deux contextes de la base, si  $sim(c, c_1) > sim(c, c_2)$  alors  $c_1$  sera préféré à  $c_2$ . Une fonction similarité doit vérifier les propriétés suivantes :

- réflexivité :  $sim(a, a) = 1$ ,
- symétrie :  $sim(a, b) = sim(b, a)$ ,
- inégalité triangulaire :  $sim(a, b) + sim(b, c) \leq 1 + sim(a, c)$ ,
- monotonie : s'il existe une relation d'ordre  $<$  sur un contexte telle que  $a < b < c$  alors  $sim(a, b) \geq sim(a, c)$ .

Il existe différentes fonctions de similarité pour des contextes définis par des valeurs d'attributs simples et des attributs de même type. On parle alors de similarité locale. Lorsque les attributs sont de types différents, la modélisation de la similarité peut être simplifiée en considérant le calcul d'une similarité globale comme l'agrégation de plusieurs similarités locales relatives à chaque attribut et donc au détail des contextes ou situations. Pour cela, on fait appel à une fonction d'agrégation  $\phi : [0,1]^n \rightarrow [0,1]$  de sorte que la similarité globale  $sim_\phi(x, y) = \phi(sim_{\Omega^1}(x_1, y_1), sim_{\Omega^2}(x_2, y_2), \dots, sim_{\Omega^n}(x_n, y_n))$  où  $\phi$  doit vérifier les propriétés suivantes :

- $\phi(0, \dots, 0) = 0$ ,
- $\phi$  est monotone croissante.

Ces fonctions peuvent faire intervenir des pondérations permettant de donner plus d'importance à certains attributs du contexte qu'à d'autres. Plusieurs fonctions de similarités locales en fonction des types d'attributs, ainsi que de fonctions d'agrégation sont détaillées dans [ThBéler].

Cependant, le modèle d'expérience orienté objet diffère de la vue attribut-valeur principalement par l'introduction des hiérarchies de classes et de l'héritage des attributs. Pour pouvoir définir et calculer la similarité entre deux objets instances de classes, il faut étendre le principe local-global au niveau objet en s'inspirant en partie de la technique développée pour les taxonomies bien que la sémantique ne soit pas la même. Sur la Figure 34, la vue orientée objet à des fins de calcul de similarité sur les objets est

présentée. Cette vue inclue les liens d'instanciation des objets. Pour chaque classe concrète (disposant d'au moins une instance ou objet), il est possible d'ajouter un lien ensembliste indiquant l'appartenance à une classe de tous ces objets. Chaque objet associé à cet ensemble peut aussi être représenté par un lien qui correspond aux feuilles des taxonomies.

La similarité intra-classe ( $sim_{intra}$ ) est définie comme la similarité maximum possible de deux objets. Elle est calculée sur la base des attributs communs des deux classes des objets comparés, c'est-à-dire ceux de la première classe commune dont leurs classes d'appartenance respectives héritent soit ceux de la classe  $C_1$  pour les objets  $obj_3$  et  $obj_7$  ou encore  $C_{12}$  pour les objets  $obj_6$  et  $obj_7$ .

La similarité interclasse ( $sim_{inter}$ ) est, quant à elle, proche des taxonomies de symboles. Ainsi, la similarité interclasse peut être définie comme la similarité des taxonomies si les classes intermédiaires sont toutes des classes abstraites (n'ayant pas d'instance). Dans le cas où il y aurait des classes concrètes intermédiaires (pour lesquelles des objets existent), une pratique pourrait consister à créer une sous-classe vide afin de rendre la super classe abstraite. Dans l'exemple de la Figure 34, il faudrait sous classer  $C_{12}$  en  $C_{123}$  par exemple, sans ajouter d'attributs, afin de rendre  $C_{12}$  abstraite et ainsi se conformer à la structure de type taxonomie.

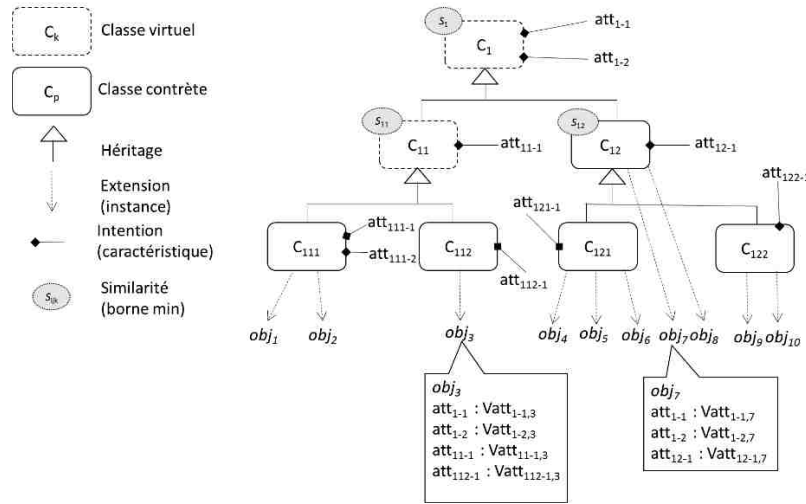


Figure 34. Présentation en vue orientée objet pour illustration du calcul de similarité

Pour calculer la similarité interclasse, il faut donc annoter la chaque classe  $C_i$  de la hiérarchie de classe avec une valeur  $s_i$  comprise entre 0 et 1 telle que si  $C_i > C_j$ , signifiant que  $C_i$  est une superclasse de  $C_j$ , alors  $s_i \leq s_j$ . Cette valeur représente la valeur minimum pour la similarité intra-classe de deux instances quelconques de l'ensemble  $L_C$  des classes.

$$sim_{inter} = \begin{cases} 1, & C_i = C_j \\ s_k, & C_i \neq C_j \text{ avec } C_k > C_i, C_k > C_j \end{cases}$$

Lorsqu'on dispose de la similarité interclasse et intraclasse, il reste à combiner ces deux mesures par, en général, le produit de ces deux valeurs pour obtenir la similarité totale  $sim_{objet}$ . Pour deux objets  $obj_a$  et  $obj_b$ , on a :

$$sim_{objet}(obj_a, obj_b) = sim_{intra}(obj_a, obj_b) \cdot sim_{inter}(class(obj_a), class(obj_b))$$

Ce qui donne pour les objets  $obj_6$  et  $obj_7$  de la Figure 34 :

$$sim_{objet}(obj_3, obj_7) = sim_{intra}(obj_3, obj_7) \cdot sim_{inter}(C_{112}, C_{12})$$

$$sim_{objet}(obj_3, obj_7) = \phi(sim_{att_{1-1}}(obj_3, obj_7), sim_{att_{1-2}}(obj_3, obj_7)) \cdot s_1$$

Cependant, comme de l'information relative à de l'incertitude sur l'information apparaît, le choix a porté plutôt sur une comparaison des ensembles d'attributs des deux objets. Certains attributs non présents seront traités au moyen de l'incertitude.

Sans considération sur la sémantique des ensembles, la similarité entre deux ensembles  $A$  et  $B$  est donnée par la relation (Jousselme *et al.*, 2001) :

$$sim_{ensemble}(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}$$

Si, au contraire, les éléments du domaine peuvent être ordonnés ou comparés, ce principe n'est pas le plus approprié pour calculer la similarité ensembliste. Cette connaissance sur la comparaison des éléments peut être exprimée par une matrice de similarité à mettre en œuvre dans le calcul de la similarité de valeurs d'ensembles (avec sémantique disjonctive). Comme nous n'avons pas alors identifié de fonction de similarité tenant compte de ce type de connaissance dans l'interprétation d'un ensemble comme une valuation incertaine (la « vraie » valeur est une valeur de l'ensemble), nous avons proposé une mesure de similarité pour les ensembles disjonctifs qui tient compte d'une connaissance sur les éléments du domaine exprimée sous la forme d'une matrice de similarité. Cette mesure de similarité est notée  $sim_{ensdis}$ . Soit  $S = [s_{ij}]$  une matrice de similarité de taille  $n \times n$  où  $s_{ii} = 1$  et  $s_{ji} = s_{ij} \in [0,1]$ . On considère deux ensemble  $A$  et  $B$  tels que  $v_{d1} = A \subseteq \Omega$ ,  $v_{d2} = B \subseteq \Omega$ ,  $|A| = k$ ,  $|B| = m$ ,  $|\Omega| = n$ ,  $k \leq m \leq n$  et  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ . Soient deux descripteurs  $d_1$  et  $d_2$  auxquels sont associées les valeurs ensemblistes  $v_{d1} = A$  et  $v_{d2} = B$ .

- Si  $|A| = |B| = 1$ , alors  $v_{d1}$  et  $v_{d2}$  ont une valeur précise et la similarité des deux descripteurs est donnée directement par la matrice de similarité et vaut :  $sim_{ensdis}(v_{d1}, v_{d2}) = s_{ij}$  ou  $i$  et  $j$  correspondent respectivement à  $v_{d1}$  et  $v_{d2}$  dans la matrice.
- Sinon on obtient une liste de valeurs de similarité possible. Pour l'illustrer on considère l'exemple suivant :  $A = \{a, b, c\}$ ,  $B = \{b, c, d, e\}$ ,  $\Omega = \{a, b, c, d, e, f\}$  et la matrice de similarité  $S$  définie par le Tableau 2.

| $S$ | $a$ | $b$ | $c$ | $d$ | $e$ | $f$ |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $a$ | 1   | 0,8 | 0,5 | 0,3 | 0,1 | 0   |
| $b$ | 0,8 | 1   | 0,7 | 0,5 | 0,1 | 0   |
| $c$ | 0,5 | 0,7 | 1   | 0,9 | 0,7 | 0,2 |
| $d$ | 0,3 | 0,5 | 0,9 | 1   | 0,8 | 0,1 |
| $e$ | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 0,8 | 1   | 0   |
| $f$ | 0   | 0   | 0,2 | 0,1 | 0   | 1   |

Tableau 2. Matrice de similarité de l'exemple

$$sim_{ensdis}(A, B) = \{s_{ab}; s_{ac}; s_{ad}; s_{ae}; s_{bb}; s_{bc}; s_{bd}; s_{be}; s_{cb}; s_{cc}; s_{cd}; s_{ce}\}$$

$$sim_{ensdis}(A, B) = \{0,8; 0,5; 0,3; 0,1; 1; 0,7; 0,5; 0,1; 0,7; 1; 0,9; 0,7\}$$

Où on peut pondérer les valeurs par leurs nombres d'occurrence

$$sim_{ensdispond}(A, B) = \{(0,1; 2); (0,3; 1); (0,5; 2); (0,7; 3); (0,8; 1); (0,9; 1); (1; 2)\}$$

Dont la moyenne est  $moyenne(sim_{ensdispond}(A, B)) = 0,61$  alors que la similarité ensembliste serait de  $2/5$  soit  $0,4$ . On note qu'afin d'obtenir une « agrégation » une médiane de  $sim_{ensdispond}(A, B)$  pourrait être tout aussi appropriée. Toujours dans le cas de cet exemple  $sim_{ensdispond}(A, B)$  peut être représentée par une « distribution » comme cela est montré sur la Figure 35.

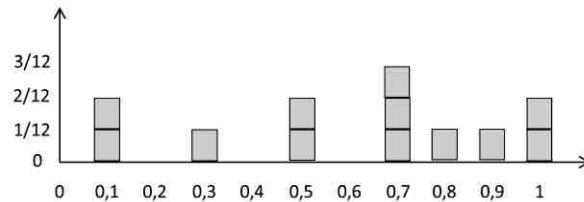


Figure 35. Représentation graphique de  $sim_{ensdis}$

La détermination du système de points ainsi faite est analogue à la détermination d'une distribution de masse bayésienne (masse affectée à des sous-ensembles précis). Pour ramener les valeurs  $sim_{ensdis}$  entre 0 et 1, il faut diviser chacun des poids par le nombre total de couples possibles à savoir  $|sim_{ensdis}(A, B)|$ . On obtient alors une distribution :

$$M_{AB} = \{(0,1; 1/6); (0,3; 1/12); (0,5; 1/6); (0,7; 1/4); (0,8; 1/12); (0,9; 1/12); (1; 1/6)\}$$

$sim_{ensdispond}(A, B)$  et  $M_{AB}$  peuvent être utilisées pour la prise de décision qui résulte d'une hypothèse forte. Il s'agit de la sommation des contributions de chaque couple par la distribution uniforme des chances d'avoir chaque valeur possible de similarité. Il s'agit néanmoins d'une information assez complète qui présente toutes les valeurs possibles.  $moyenne(sim_{ensdispond}(A, B))$  permet d'estimer une valeur de synthèse tenant compte à la fois de l'imprécision et des différentes similarités. Cependant, il faut retarder l'utilisation des mécanismes d'agrégation le plus possible car la nuance (ou la notion d'imprécision) de l'information est alors perdue.

Des similarités entre attributs multi-valués, sur des attributs flous et des structures de croyance issues de la littérature sont également présentées. Cependant, il est possible de reprendre, pour les structures de croyance, un calcul basé sur les matrices de similarités. Pour cela, l'algorithme **SIM<sub>BBA</sub>** est proposé où  $m_1$  et  $m_2$  sont deux fonctions de masse de croyance et où la mesure de la similarité est discrétisée (par pas de  $0,025$ ) dans l'algorithme présenté et repris de [ThBéler].

## Algorithme $SIM_{BBA}(m_1, m_2)$

```

entrées :
Ω contenant n valeurs {a1 ; ... ; a1 ; ... ; an}.
m1 distribution de masse de croyance sur Ω possédant k ensembles focaux : {A1 ; ... ; Ak} avec k ≤ 2n.
m2 distribution de masse de croyance sur Ω possédant r ensembles focaux : {B1 ; ... ; Br} avec r ≤ 2n.
S-[sij] matrice de similarité de taille n x n associée aux éléments {a1 ; ... ; a1 ; ... ; an} de Ω

sortie :
SIMBBA [] - tableau de taille 21 correspondant aux intervalles dans l'ordre croissant et contenant la
valeur de similarité associée.
1 : [0,0,0,25] ; 2 : [0,0,25,0,0,75] ; 3 : [0,0,75,0,1,25] ; ... ; 20 : [0,9,25,0,9,75] ; 21 : [0,9,75,1]

SIMBBA [] ← [0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0]

Pour chaque ensemble focal Ai de m1
  Pour chaque ensemble focal Bj de m2
    listeTemp ← liste vide
    Pour chaque élément x de Ai
      Pour chaque élément y de Bj
        Ajouter le couple (x ; y) dans listeTemp
      Fin pour
    Fin Pour
    Pour chaque couple (i ; j) de listeTemp
      indiceTab ← partieEntière  $\left( \frac{s_{ij} + 0,025}{0,05} \right)$ 
      SIMBBA [indiceTab] ← SIMBBA [indiceTab] +  $\frac{m_1(A_i) \cdot m_2(B_j)}{|A_i| \cdot |B_j|}$ 
    Fin Pour
  Fin Pour
Fin Pour

Retourne SIMBBA []

```

Ces mesures de similarité devant permettre de comparer des expériences, il faut permettre des agrégations de similarité par des fonctions  $\phi$  décomposables. Pour cela, l'agrégation de Minkowski est utilisée. Elle s'écrit avec  $s_i$  une similarité locale et  $w_i$  sa pondération :

$$\phi_{Minkowski}(s_1, \dots, s_n) = \frac{1}{(\sum_{i=1}^n w_i)^{1/p}} \cdot \left( \sum_{i=1}^n w_i \cdot s_i^p \right)^{1/p}$$

En calculant le coefficient relatif aux pondérations  $\frac{1}{(\sum_{i=1}^n w_i)^{1/p}}$  au tout début ou en toute fin du processus d'agrégation et en posant :

$$\phi_{Mink2}(s_1, \dots, s_n) = \left( \sum_{i=1}^n w_i \cdot s_i^p \right)^{1/p}$$

On peut écrire :

$$\phi_{Mink2}(s_1, \dots, s_i, \dots, s_n) = \left( (\phi_{Mink2}(s_1, \dots, s_i))^p + (\phi_{Mink2}(s_{i+1}, \dots, s_n))^p \right)^{1/p}$$

Chacune des distributions peut provenir de la comparaison de descripteurs simples mais aussi objets. C'est pourquoi, il faut considérer la façon d'associer une distribution de similarité à la comparaison de deux descripteurs objets comme cela décrit sur la Figure 28 en prenant en compte les poids associés à chaque descripteur. Pour cela l'algorithme  $CALCUL_{AGREGATION-Mink}$  est proposé où la similarité globale est également discrétisée [ThBéler].

La différence entre une similarité de contexte telle que celle présentée dans les paragraphes précédents et la similarité propre au processus de retour d'expérience est principalement due à la présence des

analyses expertes associées aux expériences. Cette association attribue une nouvelle sémantique à l'information globale contenue dans l'expérience en précisant la ou les conjonctions d'attributs significatifs contrairement au contexte qui ne représente qu'une disjonction d'attributs. La phase de recherche dans la base étant fondamentale en CBR comme en retour d'expérience le mécanisme de recherche et donc de comparaison, par similarité en l'occurrence, doit intégrer l'analyse.

L'algorithme **SIM<sub>BBA</sub>** ne peut pas être utilisé pour la similarité d'expérience (comprenant des analyses) car la sémantique qui lui est associée est celle d'une recherche basée sur la disjonction d'attributs. C'est pourquoi les analyses, qui pourraient être vues simplement comme un sous-ensemble de descripteurs de l'expérience, sont davantage qu'un simple filtre comme le sont les distributions de poids de préférence. Il faut pour cela modéliser la sémantique de « et ». En effet, l'analyse suivante  $Analyse_i(v_{d1}, v_{d3})$  signifie que  $v_{d1}$  et  $v_{d3}$  sont significatives aux yeux de l'expert ; c'est-à-dire que sans l'une des valeurs présentes dans l'analyse, la similarité globale traduisant l'intérêt de l'expérience pour le contexte courant est nulle. Ainsi, la similarité sera maximum si tous les descripteurs présents dans l'analyse sont égaux à ceux présents dans l'expérience mémorisée. La mesure d'agrégation doit donc être pénalisante en cas d'écart. La fonction d'agrégation  $\phi$  doit donc être choisie telle qu'une similarité locale nulle entraîne une similarité globale nulle. Donc, pour que la similarité globale soit non nulle, toutes les similarités locales doivent être non nulles et, donc, que tous les descripteurs aient un degré de similarité non nul. Après l'étude de quelques fonctions  $\phi$  satisfaisant ce critère ainsi que celui d'identité, nous avons proposé la fonction :

$$\phi_{ET}^n(s_1, \dots, s_n) = \left( \prod_{i=1}^n s_i \right)^{1/n}$$

$\phi_{ET}^n$  est également décomposable permettant de calculer les similarités de façon itérative ou récursive.

$$\phi_{ET}^n(s_1, \dots, s_i, \dots, s_n) = \left( \left( \phi_{ET}^i(s_1, \dots, s_i) \right)^i \cdot \left( \phi_{ET}^{n-i}(s_{i+1}, \dots, s_n) \right)^{n-i} \right)^{1/n}$$

Le calcul de l'agrégation d'expérience (comportant donc des analyses) est effectué à l'aide de l'algorithme **CALCUL<sub>AGREGATION-ET</sub>** [ThBéler]. En appliquant cet algorithme, la recherche se trouve biaisée par l'analyse effectuée par les experts. En effet, toute information non significative (présentant au moins une similarité locale nulle) est écartée. Cependant, il permet de retrouver les expériences véritablement significatives pour un contexte donné ce qui, selon nous, constitue l'essence d'un retour d'expérience cognitif.

## Algorithme CALCUL<sub>AGREGATION-Mink</sub> (tableau $V_{BBA}[]$ )

**entrées**  
 $V_{BBA}[]$  : le tableau contenant les  $n$  associations formées de distribution bayésienne de similarités à agréger, associées à un poids de préférence. Ces valeurs de similarité sont relatives à la comparaison 2 à 2 de descripteurs.  
 $w_i$  : un poids de préférence variant entre 0 et 1 (1 par défaut)  
 $p$  : le paramètre de la fonction de Minkowski  
**Resultat**  $V_{BBA}[]_{(n/2, n/2)}$  : un tableau de taille  $n/2$  si  $n$  pair ou  $n/2 + 1$  si  $n$  impair

**sortie**  
**SIM**<sub>global</sub> [] : tableau de taille  $m + 1$  correspondant aux intervalles dans l'ordre croissant et contenant la valeur de similarité associée.  
 $1 : [0 ; 1/2m], 2 : [1/2m ; 3/2m], \dots, m : [1-1/2m ; 1]$

**SIM**<sub>imp</sub> [] = [0, ..., 0] <sub>$m+1$</sub>   
 $n \leftarrow$  Taille de  $V_{BBA}[]$   
**Si**  $n < 1$  Condition d'arrêt de l'algorithme récursif  
**Retourner** Clé de  $(V_{BBA}[1])$

**Simon**  
**Si**  $n/2 = 0$  ①  
**Resultat**  $V_{BBA}[] \leftarrow$  Nouveau Tableau de taille  $n/2$  initialisation du tableau résultat suivant la parité de  $n$  -  $n$  est l'opération modulo  
**Simon**  
**Resultat**  $V_{BBA}[] \leftarrow$  Nouveau Tableau de taille  $n/2 + 1$   
**Resultat**  $V_{BBA}[n/2 + 1] \leftarrow$  Clé de  $(V_{BBA}[n])$   
**Pour** chaque  $i$  variant de 1 à  $partieEntiere(n/2)$  ② remplissage résultat itération  $x$   
**SimDistA**[]  $\leftarrow$  Clé de  $(V_{BBA}[2*i-1])$  associations  
**SimDistB**[]  $\leftarrow$  Clé de  $(V_{BBA}[2*i])$   $SIM_i [m+1] \rightarrow w_i$   
 $w_A$  - Valeur de  $(V_{BBA}[2*i-1])$   
 $w_B$  - Valeur de  $(V_{BBA}[2*i])$   
**Pour**  $j$  variant de 1 à  $m + 1$  ③  $j$  correspond à l'intervalle de  $SIM$ , soit le degré (fonction de  $m$ )  
**masse**<sub>1</sub>  $\leftarrow$  **SimDistA**[ $j$ ]  
**Si**  $masse_1 = 0$   
**Pour**  $k$  variant de 1 à  $m + 1$   
**masse**<sub>2</sub>  $\leftarrow$  **SimDistB**[ $k$ ]  
**Si**  $masse_2 = 0$   
**Alors**  
 $s_1 \leftarrow \frac{1}{m} (j - 1)$  et  $s_2 \leftarrow \frac{1}{m} (k - 1)$   
 $\phi_{Mink,2}(s_1, s_2) \leftarrow (w_A \cdot s_1^p + w_B \cdot s_2^p)^{\frac{1}{p}}$   
 $s_{Mink} \leftarrow \phi_{Mink,2}(s_1, s_2) \leftarrow \frac{\phi_{Mink,2}(s_1, s_2)}{(w_A + w_B)^{\frac{1}{p}}}$   
**indSim**  $\leftarrow 1 + partieEntiere\left(m \cdot s_{Mink} - \frac{1}{2}\right)$   
**SIM**<sub>imp</sub> [ $indSim$ ]  $\leftarrow$  **SIM**<sub>imp</sub> [ $indSim$ ] +  $masse_1, masse_2$   
**Fin Si**  
**Fin Pour** fin de la première boucle d'itération sur les ensembles focaux  
**Fin Si**  
**Fin Pour**  
**Resultat**  $V_{BBA}[i] \leftarrow (SIM_{imp} [] \rightarrow (w_A + w_B))$  fin de la deuxième boucle d'itération sur les ensembles focaux  
**Fin Pour**  
**CALCUL**<sub>AGREGATION-Mink</sub> (**Resultat**  $V_{BBA}[]$ ) ④  
**Fin Si**  
**Fin Si** appel récursif - itération  $x+1$

Les traitements proposés permettent une recherche générique paramétrable par des poids de préférence qui permet d'effectuer des requêtes variées sur la base d'expériences même en l'absence d'analyse.

En plus de ces recherches dans la base d'expériences qui est une étape de base la phase d'exploitation du processus de CBR comme de retour d'expérience, le besoin de prévention de risques du projet SUP, nous a conduit à définir une extraction de connaissance particulière de la base consistant en une indication du risque à partir d'expériences.



## Algorithme CALCUL<sub>AGREGATION-ET</sub> (tableau $V_{BBA}[]$ )

entrées :  
 $V_{BBA}[]$  le tableau contenant les  $n$  associations formées de distribution bayésienne de similarités à agréger associé à un poids de préférence. Ces valeurs de similarités sont relatives à la comparaison 2 à 2 de descripteurs.  
 $V_{BBA}[i]$  - Association  $BBA_i = (Sim_i [1, m+1] \rightarrow p_i)$  une association entre une distribution de similarité et du poids associé.  $Sim_i [1, m+1]$  est la clé de l'association  $V_{BBA}[i]$  et  $p_i$  sa valeur  
 $Sim_i [1, m+1]$  une distribution bayésienne de similarité de taille  $m+1$  (discrétisation de l'intervalle unité).  
 $p_i$  un entier correspondant au nombre de distribution agrégée pour la mesure  $BBA_i$   
**Resultat**  $V_{BBA}[]$   $[n/2, n/2]$  Tableau de taille  $n/2$  si  $n$  pair ou  $n/2 + 1$  si  $n$  impair

sortie :  
 $SIM_{focal} []$  - tableau de taille  $m + 1$  ( $m = 10, 21$  ou  $100$  par exemple) correspondant aux intervalles dans l'ordre croissant et contenant la valeur de similarité associée.  
 $1 : [0 ; 1/2m], 2 : [1/2m ; 3/2m], \dots, m : [1-1/2m ; 1]$

---

```

SIMtemp [] ← {0, ..., 0}m+1
n ← Taille de VBBA[]
Si n = 1
    Retourner Clé de VBBA[1]
Sinon
    Si n/2 = 0
        Resultat VBBA[] ← Nouveau Tableau de taille n/2
    Sinon
        Resultat VBBA[] ← Nouveau Tableau de taille n/2 + 1
        Resultat VBBA[n/2 + 1] ← Clé de VBBA[n]
    Pour chaque i variant de 1 à partieEntiere(n/2)
        SimDistA[] ← Clé de VBBA[2*i-1]
        SimDistB[] ← Clé de VBBA[2*i]
        pA - Valeur de VBBA[2*i-1]
        pB - Valeur de VBBA[2*i]
        Pour j variant de 1 à m + 1
            masse1 ← SimDistA[j]
            Si masse1 ≠ 0
                Pour k variant de 1 à m + 1
                    masse2 ← SimDistB[k]
                    Si masse2 ≠ 0
                         $s_1 \leftarrow \frac{1}{m} (j - 1)$ 
                         $s_2 \leftarrow \frac{1}{m} (k - 1)$ 
                         $s_{AB} \leftarrow \phi_{ET}(s_1, s_2) \leftarrow \frac{1}{(s_1^{p_A} - s_2^{p_A})^{p_A + p_B}}$ 
                         $indSim \leftarrow 1 + partieEntiere\left(m \cdot s_{AB} - \frac{1}{2}\right)$ 
                        SIMtemp [indSim] ← SIMtemp [indSim] + masse1 · masse2
                    Fin Si
                Fin Pour
            Fin Si
        Fin Pour
        Resultat VBBA[i] ← (SIMtemp [] → (wA + wB))
    Fin Pour
CALCULAGREGATION-ET(Resultat VBBA[])
Fin Si

```

Condition d'arrêt de l'algorithme récursif

initialisation du tableau résultat suivant la partie de  $n - i$  est l'opération module

remplissage résultat itération  $x$

associations  $Sim_i [1, m+1] \rightarrow w_i$

$j$  correspond à l'intervalle de  $SIM$ , soit le degré (fonction de  $m$ )

ensemble focal  $i$  ou  $k$  correspond à la valeur de similarité  $s$  (centre de l'intervalle)

fin de la première boucle d'itération sur les ensembles focaux

nouvelle association

fin de la deuxième boucle d'itération sur les ensembles focaux

appel récursif - itération  $x+1$

### 3.3 Conclusion sur le retour d'expérience cognitif

Les travaux exposés dans cette partie de mon parcours recherche ont contribué à la mise en œuvre d'un retour d'expérience cognitif. Pour l'étape de capitalisation, il a été proposé une représentation des expériences prenant en considération les événements, leurs contextes et leurs analyses. Comme les expériences sont très souvent le résultat de travaux faisant place à des interprétations, notamment celles d'experts, la représentation des expériences proposée intègre de manière explicite l'incertitude associée aussi bien aux éléments décrivant le contexte que les analyses effectuées par les experts. Cette intégration met en œuvre le modèle des croyances transférables. Pour faciliter l'opérationnalisation d'un retour d'expérience cognitif, la représentation des expériences est basée sur un formalisme hybridant le paradigme objet et le modèle des croyances transférables.

Concernant l'étape d'exploitation du processus de retour d'expérience, deux algorithmes ont été proposés. Le premier permet, à l'instar d'un processus de CBR, de faire de la recherche d'expérience à partir de similarité de contexte. Pour cela, des traitements basés sur la représentation des connaissances proposée ont été définis permettant d'évaluer la similarité entre deux contextes prenant en compte aussi le fait que la description d'un élément de contexte puisse être plus détaillée pour une expérience que pour une autre ainsi que les incertitudes sur les descriptions. Le second algorithme proposé construit un indicateur de risque, se rapprochant d'une explicitation de connaissance, à partir d'un contexte donné et du contenu de la base de retour d'expérience. Pour cela il met en œuvre le premier algorithme.

Des résultats de ces travaux ont fait l'objet de communications [C9, c5, c6], une contribution à ouvrage présente les processus de retour d'expérience [O1]. Les algorithmes ont été testés à l'aide d'évènements fictifs relatifs aux risques dans le massif pyrénéen avec une interface permettant des présentations sur des fonds cartographiques issus de systèmes d'information géographique. Des propositions ont également été faites pour généraliser l'approche développée dans le cadre du projet SUP et permettre de générer des applications de retour d'expérience pour des contextes industriels notamment [ThBéler, c5]. En effet, le besoin de retour d'expérience existe également dans de nombreux domaines industriels pour des exploitations visant, par exemple, à l'amélioration de la conception de produits à partir de l'analyse de produits défectueux renvoyés par les clients (Rakoto, 2004).

Cependant, le besoin de modélisation des connaissances et de leur exploitation dans le domaine industriel peut aussi avoir des objectifs nécessitant des processus pouvant être différents de ceux pour lesquels le retour d'expérience est généralement mis en œuvre. Les connaissances à modéliser peuvent alors être relatives aux processus mêmes, au fonctionnement des ressources techniques... Les traitements utilisant ces connaissances peuvent être alimentés par des données pouvant aussi présenter des incertitudes.

## 4 Evaluation de la santé des systèmes techniques

Dans le domaine industriel de production de biens ou de services de nombreux événements existent impactant négativement les activités. Parmi ces événements, il y a les défaillances des ressources techniques contribuant à l'activité de production. Afin de réduire l'impact de ces défaillances, deux approches complémentaires sont nécessaires : la remise en état de fonctionnement de la ressource lorsque des défaillances sont survenues et l'évitement de défaillances par la réalisation d'opérations de maintenance avant qu'elles aient lieu.

La remise dans un état de fonctionnement satisfaisant de la ressource technique après une défaillance consiste, après la détection de la défaillance, à rechercher l'origine ou les origines de la défaillance pour ensuite y remédier par des réparations, ou des remplacements de composant. Cette étape de recherche des origines des défaillances est le diagnostic et les actions de remise en état qui suivent sont de la maintenance corrective.

Pour éviter les survenues de défaillances, des approches de maintenance préventive ont été développées. Elles peuvent consister en des entretiens, des inspections ou des remplacements réguliers d'éléments des ressources techniques établis à l'avance en fonction de critères variés comme la sûreté de fonctionnement, les coûts... Bien que ce type de maintenance préventive dit systématique permette de planifier les interventions à l'avance, il peut conduire, notamment, à des remplacements de composants présentant encore un potentiel d'utilisation certain. Pour pallier cela, la maintenance conditionnelle, aussi connue sous le sigle CBM (*Condition Based Maintenance*), considère l'état des éléments des ressources ou systèmes techniques pour intervenir sur les composants arrivant en fin de potentiel d'utilisation réduisant, par rapport à la maintenance préventive systématique, le nombre tâches de maintenance les coûts de maintenance mais nécessitant des moyens pour évaluer si des composants ont atteint ou dépassé la limite de potentiel. Le PHM (*Prognostics and Health Management*) peut être considéré comme une extension du CBM par l'établissement de pronostics. Ces pronostics consistent à prévoir les durées de vie résiduelles (RUL – *Remaining Useful Life*). Le RUL correspond au temps de fonctionnement restant à un composant avant qu'il atteigne un niveau de dégradation inacceptable (Vachtsevanos *et al.*, 2006).

Comme les entreprises sont dans le contexte, déjà évoqué dans la partie 1, où, confrontées à une concurrence mondialisée sur des marchés où la demande est changeante, elles doivent rechercher de façon permanente à répondre au bon moment, au juste besoin, au meilleur prix et au niveau qualité désiré pour rester compétitives. Ceci les conduit à s'équiper de ressources techniques de production de biens ou de services offrant plus de fonctionnalités pour répondre aux besoins de qualité, de flexibilité, et de réactivité conduisant à un accroissement de leur complexité et de leurs coûts. Un enjeu majeur consiste donc à les maintenir en état opérationnel avec le plus haut niveau de disponibilité pour le coût le plus faible.

Les développements présentés dans cette quatrième partie de mon parcours recherche ont porté sur des contributions visant à répondre à cet enjeu. Elles portent sur l'élaboration de données caractérisant l'état de santé des systèmes à des fins d'aide à la décision mais aussi sur leur exploitation en gestion de maintenance et de production.

Ces développements ont débuté dans le cadre du projet Archistic s'inscrivant dans une certaine continuité avec les développements effectués dans le cadre de la surveillance et du développement d'architectures distribuées présentés dans les parties 1 et 2. En effet, il s'agissait de définir une architecture distribuée pour le diagnostic et le pronostic afin de définir « l'état de santé » de systèmes techniques complexes. Cette définition nécessitant d'exploiter les connaissances issues des phases de

conception du système a conduit à une modélisation des systèmes multi-composants ainsi qu'à une proposition d'une architectures distribuées pour la définition de l'état de santé de ces systèmes.

La modélisation des systèmes multi-composants issue de ces développements a ensuite été reprise pour prendre en compte dans, un premier temps, l'incertitude probabiliste puis, dans un second temps, l'incertitude épistémique (liée à un manque de connaissance) sur les informations d'entrée nécessaires à l'évaluation de la santé d'un système multi-composant que sont notamment les diagnostics et les pronostics de composants faisant ainsi appel à des éléments théoriques mis en œuvre dans la partie 3.

#### 4.1 Architecture de diagnostic et de pronostic distribuée de systèmes multi-composants

La définition d'une architecture de diagnostic et de pronostic distribuée de systèmes multi-composants ont été réalisés d'une le cadre du projet Archistic issu d'un appel à projet d'Airbus France. C'est également dans ce contexte que Mickaël Diévert a effectué ses travaux de thèse [ThDiévert] dirigée par Philippe Charbonnaud et que j'ai co-encadrés. Dans ces travaux, il y est question de systèmes techniques complexes de grande dimension. Cependant, nous avons préféré par la suite qualifier les systèmes auxquels nous nous intéressons comme étant multi-composants omettant ainsi l'aspect de complexité souvent associé à l'émergence de certaines propriétés des systèmes qui ne pourraient pas être prévues par les différents modèles dont ils sont l'objet lors de leur conception. Dans ces travaux et ceux qui ont suivi sur ce thème, toutes les connaissances nécessaires à l'évaluation de la santé d'un **Système Technique Multi-Composant (STMC)** et notamment pour sa modélisation sont disponibles par, en grande partie, l'intermédiaire des différents modèles élaborés lors de sa conception. En effet, dans une démarche d'ingénierie des systèmes mettant en œuvre une conception des systèmes basée sur les modèles (MBSE – *Model Based System Engineering*<sup>2</sup>) de nombreux modèles sont construits afin non-seulement de permettre des échanges entre les concepteurs de différents métiers (mécanique, électronique, informatique...) mais aussi pour identifier les relations entre les différents éléments constituant le système à réaliser, pour évaluer sa réponse aux exigences ou encore pour évaluer ses performances, son coût... Dans cette approche, suite au recueil des exigences, le système à réaliser est analysé en termes de services à rendre ou de fonctions à réaliser puis de façon itérative les sous-systèmes sont identifiés et les fonctions qu'ils doivent réaliser sont spécifiées et ainsi de suite jusqu'aux composants contribuant ou supportant une ou plusieurs fonctions élémentaires (Kossiakoff *et al.*, 2011).

Dans le cadre de STMC conséquents, de type avion de ligne dans le cadre du projet Archistic, mais cela est aussi vrai pour des STMC plus « petits », les exploitants cherchent à s'assurer de la capacité de leurs systèmes à être engagés dans des conditions de fiabilité acceptables mais aussi à optimiser leurs coûts de maintenance. Les fabricants de ces systèmes visent donc à fournir à leurs clients les outils pour cela que sont les évaluations de la santé des STMC. Cependant les STMC qu'ils développent sont constitués de sous-systèmes voire de composants, provenant de nombreux fournisseurs, qui interagissent pour mettre en œuvre les services sollicités par les exploitations qu'en font leurs clients.

Ces travaux ont consisté à formaliser les activités de diagnostic et de pronostic ainsi que les connaissances nécessaires à leur déploiement pour l'évaluation de la santé des STMC. Puis des algorithmes ont été proposés pour effectuer cette évaluation ainsi qu'une architecture distribuée pour son déploiement.

---

<sup>2</sup> <https://www.incose.org/docs/default-source/delaware-valley/mbse-overview-incose-30-july-2015.pdf>

#### 4.1.1 Analyse et modélisation pour l'évaluation de la santé des STMC

##### 4.1.1.1 Formalisation des STMC

D'un point de vue de conception, un STMC est réalisé par un certain nombre de sous-systèmes eux-mêmes mis en œuvre par plusieurs niveaux de fonctions assurées, aux niveaux les plus bas de cette décomposition, par des composants. Cette approche suivie en phase de conception est conservée ensuite car elle justifie de la réponse aux exigences du système qui a été analysée en termes de services à rendre ou de fonctions à réaliser. Puis, de façon itérative, les sous-systèmes ont été identifiés et les fonctions qu'ils doivent réaliser ont été spécifiées et ainsi de suite jusqu'aux composants contribuant ou supportant une ou plusieurs fonctions élémentaires (Kossiakoff *et al.*, 2011). Cependant, d'un point de vue maintenance du système, il n'est pas nécessaire de descendre cette décomposition au niveau le plus élémentaire comme, par exemple, une résistance sur une carte électronique d'un avion de ligne, si la capacité d'intervention du service maintenance ne permet pas une intervention directe sur cette résistance. Il est souvent question en aéronautique de LRU (*Line Replaceable Units*) ou de *line replaceable modules*, qui sont les plus petits composants en termes de décomposition du STMC sur lequel la maintenance peut intervenir (souvent pour un remplacement). L'élément remplacé peut ensuite être envoyé dans des ateliers plus spécialisés pour y être réparé.

Deux visions du système doivent alors être considérées. Elles correspondent aux deux catégories d'acteurs opérant sur le système lors de sa phase de vie correspondant à son exploitation. La première est celle des agents en charge de l'organisation et de la conduite des opérations de production de biens ou de services qui sont intéressés par la disponibilité, la fiabilité voire la perte (lorsque cela se produit lors d'une opération de production) de fonctionnalités du système (freinage, lubrification à la coupe...). La seconde catégorie est celle des agents de maintenance qui, inspectent, réparent, remplacent, les composants pour remettre ou maintenir (dans le cas d'une intervention à caractère préventif) le STMC dans un fonctionnement nominal répondant à des critères de fiabilité et de sécurité prédéfinis. Cependant, ces fonctionnalités découlant de l'analyse des besoins effectuée en phase de conception, il est possible d'associer des composants à ces fonctionnalités, auxquelles répondent généralement les sous-systèmes, grâce aux différents modèles de conception. Un STMC peut donc être décomposé selon le diagramme de la classe de la Figure 36

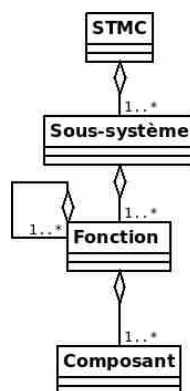


Figure 36. Diagramme de classe d'un STMC

##### 4.1.1.2 Analyse de la fonction diagnostic

Trois fonctions sont généralement mises en œuvre : détection, isolation et identification pour établir un diagnostic dont le but, pour les STMC, est d'isoler et d'identifier la cause d'une défaillance, par exemple, la faute ayant conduit la couche de détection à générer un symptôme. Un symptôme est une preuve observable d'une défaillance sensorielle ; c'est-à-dire un changement d'une quantité observable du

comportement normal spécifié (Isermann, 1997). De nombreux travaux ont été et sont encore effectués dans le domaine de la détection et de l'isolation de fautes pour lesquels différentes approches parfois « hybridées » peuvent être mises en œuvre : basées sur des modèles, basées sur des données, analytiques, basées sur les connaissances (Zwingelstein, 1995 ; Isermann, 1997). Dans le cas des STMC considérés dans le projet Archistic, le but du diagnostic est l'identification des composants à l'origine de pertes de fonctionnalités, c'est-à-dire lorsqu'elles ne répondent plus aux sollicitations dans les limites de performances spécifiées lors de la conception du système ou nécessaires aux besoins des opérations de production, à partir d'une surveillance au niveau des composants. Nous avons donc établi, qu'avec de telles considérations, une fonction de diagnostic consiste à identifier un ensemble  $L2$  de fonctions défaillantes et la localisation de leurs causes qui peut être un ensemble  $L1$  de composants en faute à partir d'un ensemble de symptômes  $S$  et d'un ensemble de tests  $T$ . En effet, dans le cas de certains systèmes comme les avions de ligne, pour confirmer ou infirmer le résultat de la fonction diagnostic, il est possible de générer des tests qui permettent de reproduire des situations opérationnelles du système afin de recréer la défaillance fonctionnelle. Ces générations de tests peuvent être effectuées de façon automatique (la fonction diagnostic peut lancer elle-même le test en fonction du résultat de diagnostic obtenu) ou semi-automatique (un agent de maintenance lance manuellement le test).

Cela conduit à la relation suivante :

$$(21) \quad (L1, L2) = \text{Diag}(K\text{Diag}, S, T)$$

où  $\text{Diag}$  est la fonction de diagnostic et  $K\text{Diag}$  désigne la connaissance disponible sur le système support de la fonction de diagnostic.

Pour les besoins de distribution du projet Archistic où une distribution des traitements était recherchée, la fonction  $\text{Diag}$  s'est avérée comme pouvant être réalisée par deux sous-fonctions notées  $\text{Diag1}$  et  $\text{Diag2}$ .  $\text{Diag1}$  identifie, à partir d'un ensemble de symptômes et d'un ensemble de tests, l'ensemble des composants en faute du système  $L1$  :

$$(22) \quad L1 = \text{Diag1}(K\text{Diag}, S, T)$$

où  $L1 = \{AB(C_i), \dots, AB(C_p)\}$  avec  $C_k$  désignant un composant et  $AB(C_k)$  ce composant en faute, et la fonction  $\text{Diag2}$  identifie l'ensemble des fonctions défaillantes à partir de tests et des composants en fautes.

$$(23) \quad L2 = \text{Diag2}(K\text{Diag}, L1, T)$$

où  $L2 = \{AB(F_l), \dots, AB(F_q)\}$  avec  $F_j$  désignant une fonction et  $AB(F_j)$  cette fonction défaillante.

#### 4.1.1.3 Analyse de la fonction pronostic

Les méthodes utilisées pour le pronostic de composant peuvent être classées en trois catégories (Hong-Feng, 2012) :

- basées sur des modèles,
- guidées par les données,
- basées sur l'expérience.

Le choix d'utilisation d'une de ces méthodes dépend de la disponibilité d'informations permettant d'alimenter la fonction de pronostic (Muller, 2005). Les méthodes basées sur l'expérience utilisent des données recueillies à partir de retour d'expérience afin d'identifier des modèles de fiabilité. Les méthodes basées sur les modèles mettent en œuvre des relations mathématiques permettant de décrire la dégradation ou l'évolution de la dégradation des composants (Iung *et al.*, 2008). Les méthodes basées

sur les données consistent à transformer les données de surveillance élaborées à partir des capteurs installés sur le système en des modèles comportementaux fiables de dégradation (Heng *et al.*, 2009). Kothamasu *et al.* (2006) ont proposé une liste de méthodes pouvant être mises en œuvre pour assurer le pronostic et le suivi de l'évolution d'une dégradation d'un système.

Quelle que soit la méthode mise en œuvre, une fonction pronostic vise à définir le RUL d'un composant. Le RUL peut être défini comme le temps restant avant que la probabilité de défaillance ou de faute deviennent inacceptable en termes de risques d'impact sur les biens, les personnes et/ou l'environnement. Dans cette première phase effectuée dans le cadre du projet Archistic, nous avons défini le RUL comme le temps restant avant que le composant surveillé ne provoque une défaillance fonctionnelle à partir des conditions opérationnelles (traduites par des contraintes ou des sévérités). Ceci signifie que la fonction pronostic a besoin d'un historique des tâches de production de biens ou de services mais aussi des futures tâches que le système aura à accomplir avec leurs contraintes ou sévérité (Sankararaman *et al.*, 2014). Le RUL des composants peut être déterminé par la couche de surveillance. En fait, l'idéal serait que la détermination du RUL, tout comme la détection de fautes et donc la génération de symptômes pour le diagnostic, soit assurée par l'équipementier ou le fournisseur du composant plus à même de mettre en œuvre la méthode de pronostic et de détection de fautes la mieux adaptée aux modèles du composant dont il est le seul à avoir une bonne connaissance tout en lui permettant de ne pas divulguer des savoir-faire contenus dans ces modèles. Cette production d'information peut faire l'objet de la couche HA (*Health Assessment*) proposé dans le projet de modèle d'architecture OSA-CBM (*Open System Architecture – Condition Based Maintenance*) (Provan, 2003) qui définit sept couches qui sont :

- *Data Acquisition layer* est la couche d'acquisition qui vise à transformer un stimulus en signal électrique. Cette couche redéfinit en fait ce qu'est un capteur,
- *Data Manipulation layer* est la couche qui traite le signal de la couche d'acquisition afin d'être envoyé et utilisé par le système pour en extraire les grandeurs représentatives de l'état de santé du système ou de ses composants,
- *Condition Monitoring/State Detection layer* est la couche qui extrait les données des couches d'acquisition de données et de manipulation de données afin de les comparer à des valeurs limites prédéfinies. Lorsque les limites sont franchies, cette couche génère des alarmes et des symptômes.
- *Health Assessment layer* est la couche qui reçoit les données de la couche de surveillance et d'autres modules de diagnostic pour déterminer si la santé du système, sous-système ou composant surveillé est dégradée. Si sa santé est dégradée, le module de diagnostic génère un diagnostic sur une ou plusieurs conditions de fautes associées à un niveau de confiance. Le diagnostic doit prendre en compte l'évolution de la tendance à partir de l'historique de santé, de la charge, du statut opérationnel et de l'historique de maintenance.
- *Prognostics layer* est la couche qui, en fonction de l'approche mise en œuvre, peut recevoir des données de toutes les couches précédentes. Son principal objectif est de projeter l'état de santé actuel du système et de ses composants dans le futur en prenant en compte les futurs engagements que l'équipement devra assurer. Un état de santé est alors fourni comportant des informations sur les temps de vie résiduels du système et de ses composants.
- *Decision Support layer* est la couche qui fournit des recommandations et des alternatives pour le maintien en bon état du système. Elle exploite pour cela les données des couches de diagnostic et de pronostic. Les recommandations peuvent être des actions de maintenance planifiées, la

modification de la configuration opérationnelle du système afin d'atteindre l'objectif du futur engagement ou bien de revoir les objectifs du futur engagement ou d'affecter à l'équipement un autre futur engagement.

- Présentation (*Presentation/GUI layer*) est la couche qui assure l'interface entre le système de CBM de l'équipement et un ou plusieurs opérateurs humains, elle sert notamment à présenter les informations élaborées par le système de CBM.

Nous notons  $RUL(C_k)$  le RUL d'un composant. Nous avons également introduit la notion de TBA (*Time Before Abnormal*) qui correspond au temps restant avant comportement anormal d'un composant ou d'une fonction dont l'origine peut être extérieure, par exemple : un dysfonctionnement d'un autre composant dont le bon fonctionnement du composant d'intérêt dépend. Cette notion met également en évidence le besoin de connaissance sur le STMC afin de mettre en œuvre une fonction de pronostic d'un STMC à partir des pronostics et donc des RUL de ses composants. Cette fonction de pronostic *Prog* d'un STMC évalue l'ensemble  $H1$  des TBA de chaque composant et l'ensemble  $H2$  des TBA de chacune des fonctions à partir des RUL des composants. La fonction *Prog* peut donc être formalisée de la façon suivante :

$$(24) \quad (H1, H2) = Prog(KProg, \mathbf{RUL})$$

où  $\mathbf{RUL}$  est l'ensemble des RUL des composants et  $KProg$  est la connaissance disponible sur le système support à la fonction de pronostic.

#### 4.1.1.4 Connaissances pour le diagnostic et le pronostic

Les études conduisant à la réalisation d'un STMC produisent des informations, connaissances et modèles utiles au développement des fonctions de diagnostic et de pronostic de ce même STMC. Ceci est encore plus vrai lorsque le développement du STMC est inscrit dans une démarche de MBSE. Plusieurs types de connaissances alors rendues disponibles sont nécessaires (Reiter, 1992 ; Chittaro *et al.*, 1993).

La connaissance structurelle vise à représenter l'ensemble des éléments (fonctions ou composants) implémentant le système ainsi que leurs interconnexions. Ces interconnexions peuvent être identifiées par les flux d'information, d'énergie ou de matière entre les éléments représentés dans les diagrammes de type SA comme SA-RT (*Structured Analysis – Real Time*) ou comme les diagrammes d'activité et les *internal block diagrams* de SysML (*Systems Modeling Language*) (Friedenthal *et al.*, 2009).

Cette connaissance peut être représentée graphiquement comme cela est montré sur la Figure 37. Dans cette représentation, les arcs sont orientés et relient forcément deux entités. Si ceci semble peu problématique dans le cas de STMC autonomes, cela nécessite une représentation des entités avec lesquelles les STMC sont en interaction pour d'autres catégories de systèmes comme, par exemple, l'alimentation en énergie.

L'arc qui lie un élément à un autre n'est pas uniquement un lien physique entre deux éléments mais aussi une relation signifiant qu'une défaillance de l'élément origine de l'arc peut engendrer la défaillance de l'élément destination de l'arc. Une défaillance d'un composant étant due à une faute observée au moyen d'au moins un symptôme généré par la fonction ou la couche de surveillance.



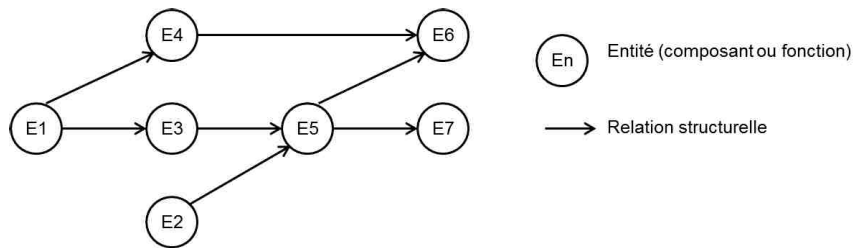


Figure 37. Exemple de représentation graphique de la connaissance structurelle

La connaissance fonctionnelle vise à représenter les entités (composants ou fonctions) concourant à l'implémentation des différentes fonctions du STMC. Une façon de formaliser cette connaissance consiste à exploiter la vue hiérarchique qui décompose un système en sous-systèmes, puis en fonctions, puis en plusieurs niveaux de sous-fonctions jusqu'à ce que des composants implémentent une ou plusieurs sous-fonctions (Kossiakoff *et al.*, 2011). Dans cette décomposition, des logiciels peuvent être considérés comme des composants. Ils peuvent être modifiés (*update*, *upgrade*) voire remplacés. Cependant, pour que la ou les fonctions qu'ils implémentent soient opérationnelles, il faut aussi que les plateformes de calculs qui les supportent soient opérationnelles.

Cette connaissance peut être représentée graphiquement comme cela est montré sur la Figure 38. Dans cette représentation, les arcs sont orientés et relient forcément une entité à une fonction ; les sous-systèmes sont considérés comme des fonctions.

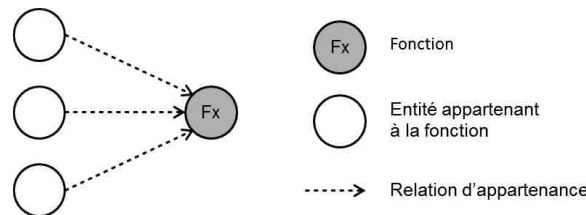


Figure 38. Exemple de représentation graphique de la connaissance fonctionnelle

La modélisation de la connaissance comportementale vise à représenter la dynamique du composant étudié afin de déterminer le comportement global du système. Les modèles sont utilisés principalement pour la détection de symptômes (modèles dynamiques continus, modèles dynamiques échantillonnés, modèles dynamiques à événements discrets ou modèles dynamiques hybrides). Ces modèles peuvent aussi bien décrire les différents modes de fonctionnement de composants, de fonctions, du STMC dont des modes de défaillances. Ces modèles peuvent aussi être mis en œuvre par le pronostic où, à partir de traitements de signaux relevés sur le composant, ses dégradations sont évaluées. Puis à l'aide de modèles prédictifs, le RUL du composant est déterminé. Il nous a semblé, toutefois, préférable que ces modèles, comme cela a été expliqué au paragraphe 4.1.1.3, soient de la responsabilité l'équipementier ou le fournisseur du composant plus à même de mettre en œuvre la méthode de pronostic et de détection de fautes la mieux adaptée aux modèles du composant. Nous avons donc considéré que les symptômes et les RUL étaient fournis par une couche ou fonction et que l'évaluation de la santé des STMC admettait en entrée les symptômes et les RUL des composants fournis par cette couche de surveillance qui pourrait être notamment mise en œuvre par des capteurs ou des actionneurs intelligents comme cela est évoqué dans les parties 1 et 2 de mon parcours recherche.

Une autre forme de connaissances également à considérer est la présence de redondances d'entités. Une redondance consiste à ce que plusieurs entités du STMC assurent une fonction ou un service identique. Des entités redondantes sont généralement mises en œuvre en réponse à des exigences de fiabilité ou de sécurité du système (Goupil, 2011). Ces entités peuvent alors fonctionner simultanément, il s'agit alors

d'une redondance active et, si lorsqu'une entité subit un dysfonctionnement, une autre est alors activé pour assurer le service ou la fonction, il s'agit alors d'une redondance passive. Dans de nombreux cas, le service ou la fonction est assuré tant qu'au moins une entité fonctionne conformément aux attentes. Il existe également des systèmes particuliers dans lesquels le service ou la fonction des entités redondantes n'est plus assuré conformément aux attentes si le nombre d'entités le mettant en œuvre passe en dessous d'un nombre  $p$  par rapport aux  $n$  entités qui sont potentiellement capables de le mettre en œuvre (Bourouni, 2013). Nous avons considéré les redondances comme des fonctions particulières pouvant être représentée graphiquement selon le même principe comme cela est montré sur la Figure 39.

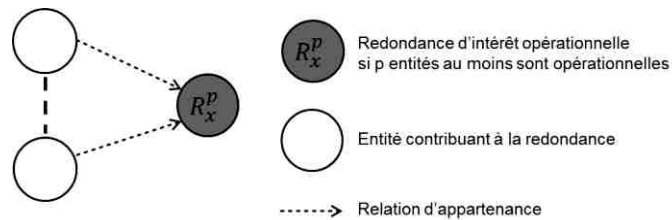


Figure 39. Représentation graphique d'un redondance

Après la représentation des connaissances pour évaluer l'état de santé d'un STMC, des inférences ont été définies utilisant ces représentations ou modèles.

#### 4.1.2 Premières propositions d'inférences pour l'évaluation de la santé des STMC

L'évaluation de l'état de santé d'un STMC passe par une évaluation de l'état de santé actuel du système, qui est fournie par la fonction de diagnostic, et une évaluation de la santé future du système qui est fournie par la fonction de pronostic. Ces deux fonctions exploitent une modélisation du STMC réalisée comme cela a été indiqué dans le paragraphe 4.1.1.4. La mise en œuvre de ces deux fonctions a nécessité l'expression de contraintes concernant la fourniture des symptômes et des RUL.

Nous avons préconisé que la couche de surveillance (*Condition Monitoring/State Detection*) mettait en œuvre les algorithmes de détection des comportements anormaux des composants et ceci quels que soient les indicateurs et les traitements décidant des écarts aux comportements normaux ou attendus et générant les symptômes. Cependant, nous avons tenu compte du fait que la mise en œuvre de cette couche peut impliquer que les composants soient surveillés à des périodicités différentes ce qui conduit à des périodes d'échantillonnage différentes pouvant entraîner un problème lors de la reconstitution de la causalité dans l'ordre d'envoi des symptômes à la fonction de diagnostic par la couche de surveillance. Il s'avère alors qu'une fonction de diagnostic peut recevoir un symptôme et diagnostiquer un composant se comportant anormalement à cause, en fait, de la défaillance d'un autre composant dont le symptôme correspondant n'a pas encore été reçu par la fonction de diagnostic.

Nous avons également préconisé que la couche de surveillance (*Condition Monitoring/State Detection*) mettait en œuvre les algorithmes chargés de l'estimation des RUL des composants issus de fonctions de pronostic des composants. Ces algorithmes évaluent des dégradations à partir d'indicateurs significatifs puis extrapolent ces évaluations passées des dégradations jusqu'à un seuil à ne pas franchir (Vachtsevanos *et al.*, 2006). Toutefois d'autres indicateurs que ceux traduisant une dégradation peuvent être aisément exploités pour la détermination du RUL d'un composant sans nécessiter de mesure et de traitement pour l'évaluation de la dégradation comme des données sur les composants provenant des constructeurs comme le MTTF (*Mean Time To Failure*) ou le MTBF (*Mean Time Between Failures*) duquel le temps de réparation doit être retiré. Puis, le RUL est obtenu par soustraction du temps d'utilisation du composant. Ces RUL constituent les entrées de la fonction de pronostic du STMC.

Symptômes et RUL doivent être associés à un composant voire à un mode de défaillance (symptôme) ou de dégradation (RUL) d'un composant mais aussi datés.

#### 4.1.2.1 Inférences pour le diagnostic

L'hypothèse principale considérée est qu'aucun composant est autoréparable. A partir de cette hypothèse, nous avons considéré qu'un composant pouvait avoir quatre statuts distincts :

- le premier statut, noté « OK », correspond au fonctionnement normal du composant et ceci quel que soit son mode de fonctionnement normal,
- le deuxième statut, noté « DC » pour défaillance connue, correspond à une défaillance connue du composant. C'est-à-dire que cette défaillance a été considérée lors de la phase de conception. La considération de cette défaillance a conduit les concepteurs à définir le ou les symptômes (natures et éventuellement valeurs) correspondant qui sont alors émis par la fonction de surveillance. La nature identifiée de la défaillance complète alors la déclaration de défaillance du diagnostic,
- le troisième statut, noté « HS » pour hors service, correspond à un comportement anormal d'un composant consécutif à une défaillance d'une autre entité dont il dépend structurellement.
- le quatrième statut, noté « DI » pour défaillance inconnue, lorsque le ou les symptômes transmis par la fonction de surveillance ne permettent pas de définir la nature de la défaillance du composant. Il peut notamment s'agir d'une défaillance qui n'a pas été considérée lors de la phase de conception.

La perte du statut OK se fait forcément au profit de l'un des trois autres statuts comme cela est illustré sur la Figure 40.

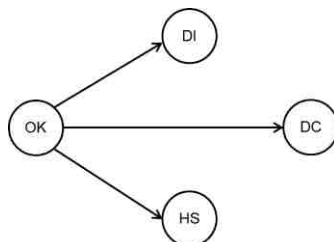


Figure 40. Statuts d'un composant pour le diagnostic

Les symptômes ne sont pas forcément transmis dans l'ordre de leur génération. De plus, les différentes périodicités de surveillance font qu'il n'est pas possible de savoir quand un comportement anormal est apparu mais seulement sur quelle période il est apparu.

Les fonctions et redondances étant mises en œuvre par une ou plusieurs entités (composants, fonctions ou redondance), lorsqu'elles ne sont plus en mesure de produire le service pour lequel elles sont conçues, l'intervention de maintenance doit porter nécessairement sur un composant pour être à nouveau opérationnel. Dans le cas du diagnostic, deux statuts seulement ont été considérés « OK » le service est opérationnel et « HS » le service n'est pas opérationnel.

Le processus de diagnostic d'un STMC proposé est basé sur le diagnostic par « cohérence » (*consistency based diagnosis*) (Biteus *et al.*, 2008). Dans ce mode de diagnostic, il s'agit à partir, d'un ensemble de symptômes, de réduire le plus possible le nombre de composants ayant le statut DI en fonction des connaissances sur le système et d'éventuels tests dont le but est produire d'autres symptômes. Les deux fonctions Diag1 et Diag2 formalisées respectivement par les relations (22) et (23) peuvent être implémenté par les algorithmes Diag1 et Diag2.



du STMC représentées sous les formes graphiques décrites dans le paragraphe 4.1.1.4 et introduites par *Kprog* dans la relation (24), les calculs des TBA sont effectués des façons suivantes :

- pour un composant  $Cx$  disposant de  $n$  RUL, le  $i$ ème RUL de  $Cx$  est noté  $RUL(Cx)_i$ , correspondant aux nombres de dégradations faisant l'objet d'un pronostic ; le pronostic du composant peut être global et dans ce cas  $n = 1$  :

$$(25) \quad TBA(Cx) = \min \left[ \min_{i \in \mathbb{N}, 1 \leq i \leq n} RUL(Cx)_i, \min_{Ei \in \Gamma^{-1}(Cx)} TBA(Ei) \right]$$

- pour une fonction  $Fy$  :

$$(26) \quad TBA(Fy) = \min_{Ei \in \Gamma^{-1}(Fy)} TBA(Ei)$$

- pour une redondance  $R_z^p$  :

$$(27) \quad TBA(R_z^p) = \max_p (TBA(Ei))_{Ei \in \Gamma^{-1}(R_z^p)}$$

où  $\Gamma^{-1}(Ej)$  désigne l'ensemble des prédécesseurs de l'entité  $Ej$  dans la représentation graphique du STMC que la relation soit structurelle ou d'appartenance et  $\max_p(.)$  désigne la  $p^{\text{ième}}$  plus grande valeur.

La fonction de pronostic est effectuée à l'aide du parcours de graphe représentant les connaissances du STMC en appliquant en fonction du type du nœud (entité) la relation (25), (26) ou (27).

Dans cette première approche pour l'évaluation de la santé des STMC, celle-ci est obtenue par les statuts déterminés pour l'ensemble des entités par les algorithmes Diag1 et Diag2 auxquels sont associés les RUL et TBA des composants et les TBA des fonctions et redondances.

#### 4.1.3 Proposition d'un déploiement distribué

Le contexte du projet Archistic visant une application à des avions de ligne constitués de plusieurs milliers de composants, la complexité algorithmique des fonctions de diagnostic et de pronostic due aux parcours des graphes modélisant le système a été considérée comme nécessitant un déploiement distribué.

L'architecture proposée est représentée sur la Figure 41. Elle est constituée de cinq types d'éléments.

- Un élément représentant la couche de surveillance émet les symptômes et les RUL pouvant être constitué de plusieurs éléments chargés d'émettre les éventuels symptômes et/ou RUL, il peut s'agir de capteurs ou d'actionneurs intelligents, de moniteurs...
- Une base de données (BdD) permet aux agents de l'architecture d'avoir l'accès aux connaissances structurelles, comportementales et topologiques nécessaires aux traitements qu'ils effectuent. Cette base de données, représentée ici de façon unique, pourrait être distribuée. Des exemples de distributions peuvent être une base par type de connaissance ou encore une base par fonction.
- Un élément appelé « *blackboard* » noté BB sur la Figure 41, agit comme une mémoire partagée et permet de collecter et de rendre disponible à l'ensemble des agents de l'architecture les informations sur l'évaluation de la santé du système élaborées par eux-mêmes.
- Des Agents de Diagnostic (AD) élaborent le diagnostic des composants et des fonctions du STMC selon le principe décrit dans le paragraphe 4.1.2.1.
- Des Agents de Pronostic (AP) élaborent le pronostic des composants et des fonctions du STMC selon le principe décrit dans le paragraphe 4.1.2.2.

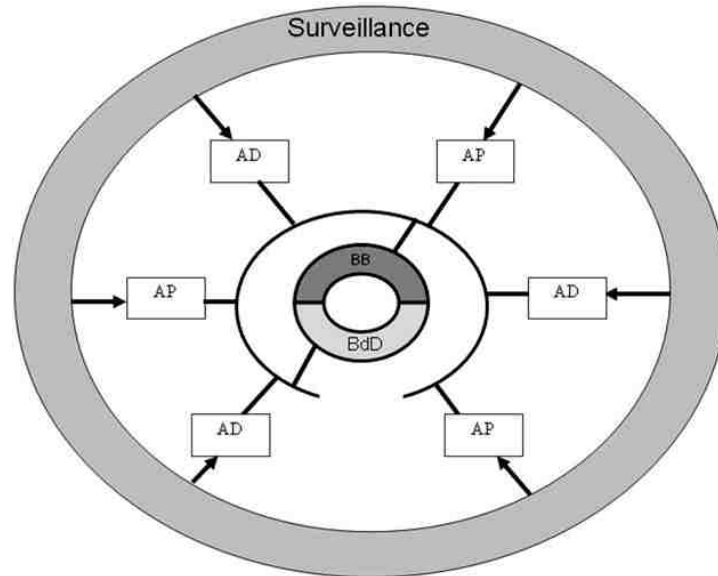


Figure 41. Déploiement distribué d'une fonction d'évaluation de l'état de santé d'un STMC [ThDiévert]

Dans ce choix de déploiement, tous les agents de diagnostic ne reçoivent pas tous les symptômes et tous les agents de pronostic ne reçoivent pas tous les RUL de la couche de surveillance. Seuls les symptômes ou les RUL des composants appartenant à la partie du STMC qui leur est dédiée le sont.

Lors de la réception d'un symptôme, un AD exécute les algorithmes Diag1 et Diag2 en utilisant la BdD pour les connaissances. Il inscrit les nouveaux statuts des entités sur le BB et réutilise la BdD pour prévenir les autres AP ayant en charge des parties du STMC ayant des dépendances structurelles ou fonctionnelles avec les entités dont il a changé le statut. Lorsqu'un AP est prévenu d'un changement de statut par un autre AP, il relance les algorithmes Diag1 et Diag2 en exploitant ces nouvelles informations inscrites sur le BB pour changer les statuts des entités de la partie du STMC à sa charge et prévenir les autres AP ayant en charge des parties du STMC ayant des dépendances structurelles ou fonctionnelles avec les entités dont il vient de changer le statut.

Le principe de communication des AP est similaire à celui des AD en remplaçant les symptômes par les RUL et les statuts par les TBA.

S'il est important que les diagnostics soient élaborés rapidement après l'émission de symptômes pour des raisons d'adaptation du pilotage du STMC à la situation qui est évaluée, il n'est pas forcément nécessaire que les RUL et TBA soient produits aussi rapidement. Nous pensons en effet que les RUL et TBA peuvent être déterminés à la fin d'une tâche de production pour évaluer, par exemple, la capacité du système à effectuer la prochaine tâche de production et déterminer les besoins de maintenance de composants.

L'évaluation de la santé du STMC est définie par le contenu du BB. En effet, celui-ci contient les statuts des entités en fonction des symptômes reçus et leur TBA. Cependant, il est aussi possible d'y inscrire les RUL des composants. Ainsi, la gestion de production dispose de l'état fonctionnelle actuel et futur et la gestion de maintenance des statuts des composants défectueux ou à inspecter ainsi que ceux ayant un RUL faible pouvant requérir une intervention. Cet ensemble d'information constitue une forme d'aide à la décision à la fois pour le pilotage du système, la gestion de production et la maintenance.

En plus du mémoire de thèse de Mickaël Diévert [ThDiévert], la proposition de représentation des connaissances sur les STMC, les traitements pour le diagnostic et le pronostic ainsi que la proposition

de déploiements ont fait l'objet des communications [C10, C11, C12]. Une communication portant plus particulièrement sur le pronostic a également été faite [C13].

Cependant, l'objectif principal des développements menés dans le cadre du projet Archistic étant la définition d'une architecture distribuée pour l'évaluation de l'état de santé des STMC, certaines caractéristiques sur les données produites par les éléments de la couche de surveillance ont été négligées. C'est particulièrement le cas pour les RUL qui sont considérés comme des scalaires alors qu'ils sont issus de traitements effectuant des extrapolations dans le but de prévoir le temps d'utilisation restant avant que la dégradation atteigne une limite au-delà de laquelle. Comme il s'agit de prévisions, les RUL comportent de l'incertitude. Les travaux menés par la suite ont donc porté sur la définition de nouvelles inférences permettant de prendre en considération l'incertitude sur les RUL.

## 4.2 Proposition d'inférences prenant en compte les incertitudes des pronostics locaux

De nombreux travaux sur le pronostic de composant présentent des méthodes et leurs résultats pour évaluer les RUL de ces mêmes composants d'une grande variété :

- roulements (Medjaher *et al.*, 2012 ; Tobon-Mejia *et al.*, 2012),
- engrenages (Yam *et al.*, 2001 ; Zhao *et al.*, 2013),
- batteries (He *et al.*, 2011 ; Jin *et al.*, 2013 ; Liao et Köttig, 2014),
- systèmes de freinage (Ferreiro *et al.*, 2012),
- turbines à gaz (Zaidan *et al.*, 2015),
- ...

mais aussi des éléments de structure (Remy *et al.*, 2007 ; Sankararaman *et al.*, 2011) et ceci quelle que soit l'approche (basée sur des modèles, guidée par les données, basée sur l'expérience). Ces travaux contribuent à l'évaluation des RUL des composants, à l'amélioration de la précision de l'évaluation des RUL ou à la prévision de l'évolution des dégradations dans le temps (He *et al.*, 2011 ; Gouriveau *et al.*, 2012 ; Zhao *et al.*, 2013). L'amélioration de la précision de l'évaluation des RUL ou à la prévision de l'évolution des dégradations permet de réduire l'incertitude des pronostics de composants. Il s'agit donc d'un enjeu majeur du PHM. Cependant, la caractérisation de l'incertitude est tout aussi importante que la détermination du RUL (Sankararaman *et al.*, 2014 ; Liao and Köttig, 2014). Dans les cas où l'incertitude du pronostic du composant fournit une fonction de densité de probabilité (pdf – *probability density function*) de défaillance en fonction de la durée de son utilisation, l'incertitude peut être représentée de la façon décrite sur la Figure 42 (Vachtsevanos *et al.*, 2006). Il peut aussi s'agir d'une fonction de distribution cumulée de probabilité (cpdf – *cumulative probability distribution function*). Si pour différentes raisons (encombrement, poids, coût...), il n'est pas possible d'avoir de pronostic pour chaque composant, il est possible d'exploiter la pdf ou la cpdf de défaillance d'un composant en fonction de son utilisation (durée ou nombre de cycles) issue des résultats des études de fiabilité menées par le fabricant du composant visant à déterminer son MTTF ou MTBF. Pour un niveau de dégradation maximal prédéfini, deux situations sont possibles : l'évaluation de la durée d'utilisation restant avant d'atteindre ce niveau à partir d'un pronostic ou de données issues d'étude de MTTF ou MTBF et l'évaluation de la dégradation pour une durée d'utilisation donnée. Ces situations sont représentées sur la Figure 43 pour des pronostics fournissant une pdf.

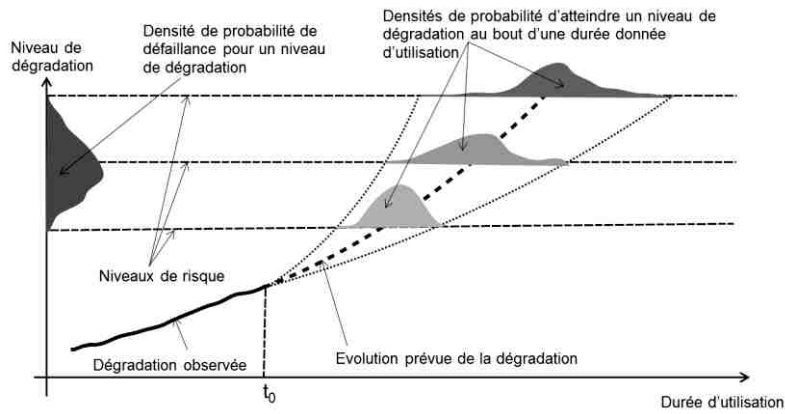


Figure 42. Densités de probabilité associées au RUL

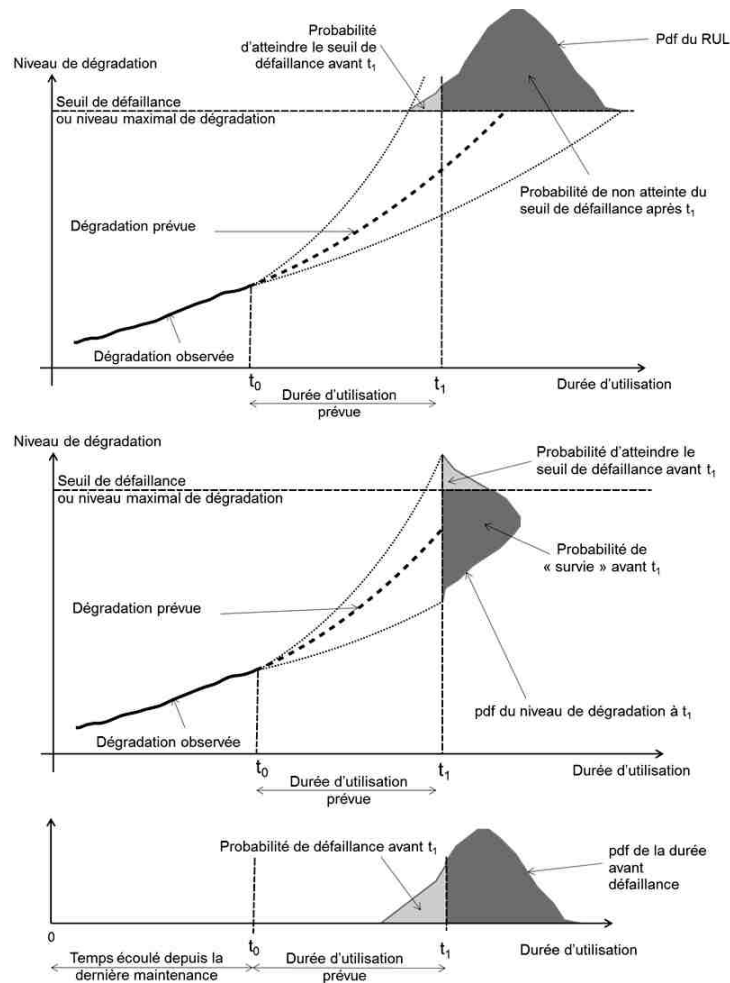


Figure 43. Exemples de pdf de prévision de RUL et d'évolution d'une dégradation

Notons que les pdf et cpdf peuvent être fournies en fonction du nombre de cycles et non en fonction de la durée d'utilisation. Dans ce cas, le nombre de cycles doit être déterminé pour toutes les tâches planifiées pour qu'il soit ramené à une durée d'utilisation.

A partir de ce constat, l'évaluation de l'aptitude d'un STMC à accomplir des futures tâches de production de biens ou de services devant s'achever à une date  $t_1$  consiste à évaluer sa fiabilité prévue à  $t_1$  en fonction des pronostics de ses composants déterminer pour cette même date. Il s'agit donc d'une analyse de fiabilité future STMC. Cette fiabilité future doit être déterminée selon les services ou fonctions du



STMC nécessaires à la réalisation des objectifs des futures tâches de production afin que la gestion de production détermine s'il est raisonnable d'engager le STMC sur cette séquence de tâches. Dans le cas où ce ne serait pas raisonnable, la gestion de production pourrait décider de retirer certaines tâches de la séquence comme celles sollicitant des fonctions évaluées comme « fragiles ». L'autre intérêt est de désigner le ou les composants devant subir une intervention de maintenance à la fin de la séquence. Ceci permettant à la gestion de maintenance d'anticiper la logistique des interventions, et de prévoir les ressources nécessaires et les durées d'intervention. Ces considérations impliquent que la production et la maintenance soient planifiées conjointement améliorant ainsi des indicateurs de performance plus globaux que ceux relatifs uniquement à la gestion de la maintenance ou à la gestion de production (Coudert *et al.*, 2002 ; Chaouqui *et al.*, 2012). Par conséquent, les systèmes techniques ne devraient pas seulement être considérés comme des arrangements de composants, mais aussi comme des fournisseurs de fonctions sollicitées par des tâches de production.

La modélisation proposée au paragraphe 4.1.1.4 fait apparaître sous forme de graphe les relations entre les composants et les fonctions de différents niveaux. Les pronostics des composants indiquent les chances pour qu'un composant soit à  $t_1$  dans l'un des états que nous avons considérés. L'évaluation de l'aptitude d'un STMC à accomplir des tâches de production devant s'achever à  $t_1$  consiste ainsi à déterminer les chances à cette date  $t_1$ , se combinant en fonctions de relations structurelles ou d'appartenance pour déterminer, pour chaque entité (composant, fonction, redondance) d'être dans un des états considérés pour celle-ci. Cette évaluation nous a conduits à nous intéresser aux réseaux bayésiens pour la mettre en œuvre. En effet, il s'agit de modèles discrets dans lesquels les transitions entre les états des nœuds sont stochastiques et impactent les transitions orientées entre les états des autres nœuds qui sont atteignables (Koski et Noble, 2009). Nous avons adapté ces réseaux à l'évaluation des états de chacune des entités que nous avons évoquée et nous y avons ajouté des traitements afin d'identifier les composants nécessitant une intervention de maintenance. Ces adaptations nous ont conduits aux développements de réseaux bayésiens orientés-objets nous permettant ainsi de considérer plusieurs classes de nœuds avec des attributs et méthodes différentes qui ont constitué une première phase dans cette évaluation. Cette méthode d'évaluation a fait l'objet de la communication [A4].

Toutefois, les réseaux bayésiens traitent de variables relatives à des probabilités alors que certains pronostics de composants peuvent fournir des informations comportant de l'incertitude épistémique (Yam *et al.*, 2001 ; Medjaher *et al.*, 2012 ; Sankararaman *et al.*, 2014 ; Liao et Köttig, 2014). Une seconde phase des développements pour l'évaluation de l'aptitude des STMC à accomplir les futures tâches de production a donc consisté à adapter les traitements à cette forme d'incertitude. Ces développements ont été réalisés dans le cadre de la thèse d'Esteban Le Maitre Gonzalez dirigée par Bernard Archimède et que j'ai co-dirigée. Pour cela, nous nous sommes intéressés à nouveau à la théorie de Dempster Shafer (*Dempster Shafer Theory* – DST) qui permet de manipuler à la fois l'incertitude aléatoire (probabiliste) et l'incertitude épistémique (Certa *et al.*, 2017). Selon Denœux et Ben Yaghlane (2002), la DST est acceptée comme un cadre riche et flexible pour représenter et raisonner avec de l'information imparfaite. En effet, elle combine des approches logiques et probabilistes de l'incertitude. Elle englobe les cadres d'appartenance et de probabilités comme cas particuliers. Elle permet également de représenter la faiblesse des connaissances et l'ignorance (Ramasso et Denœux, 2014).

Comme des éléments de la DST ont été présentés dans le paragraphe 3.1.3, nous ne reprenons ici que quelques éléments. Nous considérons un cadre de discernement  $\Omega$  pour chacune des entités du STMC constitué d'un nombre  $n$  d'états distincts et mutuellement exclusifs  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$  où  $\omega_i$  est un état particulier de  $\Omega$  dans lequel l'entité du STMC peut être. L'ensemble des parties  $\Omega$  noté  $2^\Omega$  est évidemment considéré. Il est constitué de tous les sous-ensembles possibles construits à partir  $\Omega$  tel que

$2^\Omega = \{\emptyset, \{\omega_1\}, \{\omega_2\}, \dots, \{\omega_n\}, \{\omega_1, \omega_2\}, \{\omega_1, \omega_3\}, \dots, \Omega\}$  où  $\emptyset$  est l'ensemble vide. Nous manipulons les masses de croyances, que nous notons ici *bba* (*basic belief assignment*), la croyance notée ici *Bel* (*belief*) et la plausibilité *Pl*. Nous avons également retenu ici l'hypothèse du monde fermé, donc  $bba(\emptyset) = 0$ . En effet, il est très difficile de prévoir ce qui n'est pas envisagé par les modèles. Toutefois, dans le cas de l'évaluation de l'état de santé futur des STMC, les sources sont les pronostics locaux. Ils sont mis en œuvre, dans le meilleur des cas, pour prévoir l'apparition d'un mode de défaillance d'un composant et plus souvent pour prévoir la défaillance d'un composant lorsqu'ils sont mis en œuvre. Sinon, les résultats des études de fiabilité visant à déterminer le MTTF ou le MTBF des composants sont à utiliser. Par conséquent, les pronostics locaux observent différentes situations et chaque pronostic local est considéré comme l'unique source d'observation d'une situation particulière. Par conséquent, leurs combinaisons doivent être faites différemment de celles envisagées dans le cas de fusion de l'information provenant de sources différentes observant une même situation.

Les inférences des réseaux bayésiens sont basées sur le théorème de Bayes. Le théorème de Bayes généralisé développé par Smets (1993) généralise le modèle de croyance transférable (TBM) qui est un développement de la DST (Smets et Kennes, 1994). Il rend ainsi possible la manipulation de l'incertitude aléatoire (probabiliste) et épistémique dans des réseaux de croyance en reliant des hypothèses supportées par des masses de croyance (Villeneuve *et al.*, 2017). Une mise en œuvre pour l'analyse de fiabilité de systèmes a également proposé dans (Simon *et al.*, 2007 ; Simon *et al.*, 2008). L'approche que nous avons adoptée pour les inférences est donc issue de ce théorème et introduit des développements par rapports à la méthode d'analyse présentée dans (Simon *et al.*, 2007 ; Simon *et al.*, 2008).

Les développements réalisés lors de cette seconde phase ont fait l'objet des communications [C14, A5].

Les deux phases de ces développements sont présentées simultanément puisque les développements réalisés lors de la seconde phase constituent une généralisation de ceux réalisés lors la première phase. Les développements ont porté sur l'établissement :

- d'une typologie des pronostics de composants pour lesquels nous avons établis des conversions des informations qu'ils produisent pour pouvoir les traiter à l'aide de la DST,
- l'identification de *patterns* (éléments types) constituant les STMC pour lesquels nous avons définis des états et des inférences.
- La proposition de traitement permettant d'identifier le composant à maintenir,
- La définition d'un algorithme permettant d'évaluer l'état de santé de chaque entité du STMC, basé sur sa modélisation et admettant les pronostics en entrée,
- des traitements sur les graphes de modélisation pour pouvoir effectuer l'algorithme,

#### 4.2.1 Typologie des pronostics de composants

Dans les situations présentées sur la Figure 43, la probabilité de défaillance donnée par un pronostic local, qu'est un pronostic de composant, avant la fin de l'exécution des tâches de production prévue à  $t_1$  et notée  $p_F(t_1)$  peut être déterminée en sachant que l'atteinte du niveau maximal de dégradation est considéré comme une défaillance. Dans la première phase de nos développements, tous les pronostics locaux sont supposés fournir une probabilité de l'atteinte du niveau maximal de dégradation avant  $t_1$ . Dans la seconde phase, nous avons considéré un cadre de discernement pour les pronostics locaux  $P = \{F, \bar{F}\}$  constitué de deux états :  $F$  défaillant et  $\bar{F}$  non défaillant. Pour un pronostic local fournissant une information probabiliste correspondant à l'une des situations de la Figure 43, la distribution des masses de croyances sur les éléments de  $2^P = \{\emptyset, \{F\}, \{\bar{F}\}, \{F, \bar{F}\}\}$  est dogmatique (pas d'incertitude épistémique) c'est-à-dire que :

$$bba_{\{F, \bar{F}\}}(t_1) = 0$$

et donc nous avons :

$$bba_{\{F\}}(t_1) = p_F(t_1),$$

$$bba_{\{\bar{F}\}}(t_1) = 1 - p_F(t_1).$$

Lorsque que toutes les masses de croyance dans une même relation sont considérées à un même instant  $t_1$ , nous les notons  $bba(\varepsilon)$ . Si des cadres de discernement différents sont considérés dans une même relation alors ceux-ci sont précisés en exposant :  $bba^\Omega(\varepsilon)$  avec  $\varepsilon \in 2^\Omega$ .

Toutefois, la probabilité de défaillance ne peut pas toujours être calculée pour une durée d'utilisation donnée à partir des données fournies par le pronostic local. En effet, le pronostic local peut fournir des données contenant de l'incertitude épistémique. D'après notre étude bibliographique, les pronostics de composants ou pronostics locaux peuvent fournir deux types de données contenant une incertitude épistémique.

Le premier type de données consiste en un intervalle variant avec la durée d'utilisation dans lequel la probabilité de défaillance se trouve avec une confiance  $\alpha$  comme c'est le cas, par exemple, pour les résultats présentés dans (Sankararaman *et al.*, 2014). Cet intervalle peut être défini par une cpdf supérieure et une cpdf inférieure où  $p_{lowF}(t_1)$  est la probabilité basse de défaillance avant  $t_1$  avec une probabilité d'erreur  $\frac{\alpha}{2}$  calculée par le pronostic local à  $t_0$  et  $p_{upF}(t_1)$  est la probabilité haute de défaillance avant  $t_1$  avec une probabilité d'erreur  $\frac{\alpha}{2}$  calculée aussi à  $t_0$  par le pronostic local. Par conséquent, la distribution de  $bba$  sur les éléments de  $2^P$  est la suivante :

$$bba_{\{F\}}(t_1) = p_{lowF}(t_1) - \frac{1-\alpha}{2}$$

$$bba_{\{\bar{F}\}}(t_1) = \frac{1+\alpha}{2} - p_{upF}(t_1)$$

$$bba_{\{F, \bar{F}\}}(t_1) = p_{upF}(t_1) - p_{lowF}(t_1) + 1 - \alpha.$$

Le second type de données consiste en un intervalle que le pronostic local évalue à  $t_0$  noté  $[RUL_{min}, RUL_{max}]$  dans lequel le RUL réel se trouve avec une confiance  $\alpha$ , comme c'est le cas, par exemple, pour les résultats présentés dans (Arnaiz *et al.*, 2010 ; Medjaher *et al.*, 2012). Sans autre indication sur la répartition de la RUL, trois cas sont à prendre en compte :

- Le premier cas est lorsque  $t_1 - t_0 < RUL_{min}$  pour lequel la distribution proposée des masses de croyance sur les éléments de  $2^P$  est :

$$bba_{\{F\}}(t_1) = 0$$

$$bba_{\{\bar{F}\}}(t_1) = \alpha$$

$$bba_{\{F, \bar{F}\}}(t_1) = 1 - \alpha.$$

En effet, comme la probabilité d'occurrence de la défaillance entre  $RUL_{min}$  et  $RUL_{max}$  est  $\alpha$ , la probabilité maximale de défaillance avant  $RUL_{min}$  est donc de  $1 - \alpha$  mais elle peut être moindre en raison du manque d'information sur la distribution du RUL (ceci est traduit par la  $bba$  attribuée à  $\{F, \bar{F}\}$ ) et donc la probabilité minimale de non occurrence de la défaillance avant  $RUL_{min}$  est  $\alpha$ .

- Le deuxième cas est lorsque pour  $t_1 - t_0 > RUL_{max}$  pour lequel la distribution proposée des masses de croyance sur les éléments du  $2^P$  est :

$$bba_{\{F\}}(t_1) = \alpha$$

$$bba_{\{\bar{F}\}}(t_1) = 0$$

$$bba_{\{F, \bar{F}\}}(t_1) = 1 - \alpha.$$

En effet, comme la probabilité d'occurrence de la défaillance entre  $RUL_{min}$  et  $RUL_{max}$  est  $\alpha$ , la probabilité minimale que la de défaillance se produise avant  $t_1 > RUL_{max} + t_0$  est  $\alpha$  mais elle peut être supérieure en raison du manque d'information sur la distribution du RUL (ceci est traduit par la  $bba$  attribuée à  $\{F, \bar{F}\}$ ) et donc la probabilité minimale de non occurrence de la défaillance avant  $RUL_{min}$  est  $\alpha$ .

- Le troisième cas est lorsque  $RUL_{min} \leq t_1 - t_0 \leq RUL_{max}$  pour lequel la distribution proposée des masses de croyance sur les éléments de  $2^P$  est :

$$bba_{\{F\}}(t_1) = 0$$

$$bba_{\{\bar{F}\}}(t_1) = 0$$

$$bba_{\{F, \bar{F}\}}(t_1) = 1.$$

En effet, la probabilité que la défaillance survienne entre  $RUL_{min}$  et  $RUL_{max}$  est  $\alpha$ . Ceci explique que la  $bba$  attribué à  $\{F, \bar{F}\}$  est au moins  $\alpha$ . Néanmoins, la probabilité que la défaillance survienne en dehors de l'intervalle  $[RUL_{min}, RUL_{max}]$  est  $1 - \alpha$  ; mais, en raison de l'absence d'information à propos de la distribution du RUL, on ne peut avoir une idée sur la façon de distribuer la  $bba$  restante entre les états  $F$  et  $\bar{F}$ . Cela correspond également à une incertitude épistémique entre les états  $F$  et  $\bar{F}$ . C'est pourquoi la masse de croyance restante de  $1 - \alpha$  est aussi assignée à  $\{F, \bar{F}\}$ .

Lors de la planification des tâches de production sur le STMC, la gestion de production doit identifier les durées d'utilisation (les  $t_1 - t_0$ ), les nombres de cycles et les sévérités afin que les fonctions dédiées à cela déterminent les pronostics des composants pour une date commune  $t_e$ . Cette date correspond à celle à laquelle elles doivent être terminées et donc à laquelle toutes les masses de croyance (ou probabilités pour la première phase) de tous les pronostics locaux se rapportent puisqu'un objectif est de savoir si le STMC est en mesure d'accomplir ces tâches. Cette date n'apparaît ensuite plus puisque que les masses de croyance (ou probabilités) associées aux pronostics locaux sont relatives à cette date  $t_e$ .

#### 4.2.2 Patterns et inférences

La modélisation proposée au paragraphe 4.1.1.4 fait apparaître sous forme de graphe les relations entre les composants et les fonctions de différents niveaux. Les *patterns* que nous avons identifiés correspondent aux différents types de nœuds de cette modélisation que sont : les composants, les fonctions et les redondances. Pour chaque type de nœuds, nous avons déterminé des états et les transitions entre ces états ainsi que les chances de se trouver dans l'un de ces états à la date  $t_e$  de fin des tâches de production à partir des informations de ces mêmes informations concernant les nœuds qui les précèdent dans le graphe orienté que constitue cette modélisation. Ces inférences sont bayésiennes pour la première phase des développements et relative la DST pour la seconde. Les inférences relatives à la DST sont présentées à l'aide de grilles reliant les hypothèses supportées par des masses de croyance.

Dans ces grilles on trouve les éléments de l'ensemble des parties de deux cadres de discernement ( $A$  et  $B$ ) dont les masses de croyance ( $bba$ ) servent aux calculs des  $bba$  des éléments de l'ensemble des parties d'un troisième cadre de discernement  $C$ . La grille généralisée d'inférence est présentée dans Tableau 3 où  $I_{ij}$  est un des éléments  $\varepsilon_k^C$  tel que  $\varepsilon_k^C \in 2^C$ . Un même élément  $\varepsilon_k^C$  peut être présent plusieurs fois dans la grille.

|                   |                   |                   |          |                   |
|-------------------|-------------------|-------------------|----------|-------------------|
| $2^B$             | $\varepsilon_1^B$ | $\varepsilon_2^B$ | ...      | $\varepsilon_n^B$ |
| $2^A$             |                   |                   |          |                   |
| $\varepsilon_1^A$ | $I_{11}$          | $I_{12}$          | ...      | $I_{1n}$          |
| $\varepsilon_2^A$ | $I_{21}$          | $I_{22}$          | ...      | $I_{2n}$          |
| $\vdots$          | $\vdots$          | $\vdots$          | $\ddots$ | $\vdots$          |
| $\varepsilon_m^A$ | $I_{m1}$          | $I_{m2}$          | ...      | $I_{mn}$          |

Tableau 3. Grille généralisée d'inférence

Les *bba* de chaque  $\varepsilon_k^C \in 2^C$  sont considérées comme des masses de croyance conditionnelles et sont calculées à l'aide de la relation

$$(28) \quad bba(\varepsilon_k^C) = \sum_{i=1}^{i=m} \sum_{j=1}^{j=n} \begin{cases} bba(\varepsilon_i^A) \cdot bba(\varepsilon_j^B), & I_{ij} = \varepsilon_k^C \\ 0, & I_{ij} \neq \varepsilon_k^C \end{cases}$$

La croyance (*Bel*), la plausibilité (*Pl*) et la probabilité pignistique (*BetP*) peuvent être calculées pour chaque  $\varepsilon_k^C \in 2^C$  par les relations :

$$(29) \quad Bel(\varepsilon_i^C) = \sum_{\varepsilon_k^C \subseteq \varepsilon_i^C} bba(\varepsilon_k^C)$$

$$(30) \quad Pl(\varepsilon_i^C) = \sum_{\varepsilon_k^C \cap \varepsilon_i^C \neq \emptyset} bba(\varepsilon_k^C)$$

$$(31) \quad BetP(\varepsilon_i^C) = \sum_{\varepsilon_k^C \in 2^C} bba(\varepsilon_k^C) \frac{|\varepsilon_i^C \cap \varepsilon_k^C|}{|\varepsilon_k^C|}$$

#### 4.2.2.1 Le pattern composant

En supposant que les composants n'ont pas de capacité d'autoréparation : une fois qu'ils sont défectueux, ils ne peuvent pas redevenir opérationnels sans maintenance. Selon les préconisations issues du CBM et du PHM, la maintenance des composants est effectuée avant leur défaillance. Le cas où la conséquence d'une défaillance d'un composant pourrait avoir une incidence sur l'intégrité physique d'autres composants, comme une fuite de liquide sur des dispositifs électriques ou une défaillance d'une structure mécanique éjectant des débris vers d'autres composants, n'a donc pas été considéré. Néanmoins, un composant devient inopérant si une autre entité, dont il dépend structurellement, devient inopérante ou tombe en panne. C'est pourquoi la distinction entre l'incapacité de fonctionner en raison d'une défaillance interne et celle d'une autre entité inopérante fournit une aide à la décision concernant les composants qui doivent être entretenus.

Le *pattern* d'un composant consiste en un nœud de graphe auquel au moins un pronostic local est connecté et qui peut dépendre structurellement d'une ou plusieurs entités. Quatre états distincts sont considérés comme cela est montré sur la Figure 44. Ils définissent le cadre de discernement d'un composant  $C = \{OK, F, OO, FOO\}$ .

- *OK* : Le composant sera en mesure d'exécuter les tâches prévues même si ses performances ne sont pas les meilleures en raison de dégradations naissantes ou de dégradations plus importantes.
- *F* : Le composant ne pourra pas fonctionner dans le respect des performances minimales requises pour exécuter les tâches prévues parce qu'au moins une défaillance interne s'est produite ou se produira. Le composant devra faire l'objet d'une intervention de maintenance pour fonctionner selon les attentes.

- *OO* : Le composant ne pourra pas fonctionner dans le respect des performances minimales requises pour exécuter les tâches prévues parce qu'au moins une entité dont il dépend structurellement est inopérante ou deviendra inopérante. L'entretien du composant n'est pas nécessaire.
- *FOO* : Le composant ne pourra pas fonctionner dans le respect des performances minimales requises pour exécuter les tâches prévues parce qu'au moins une défaillance interne s'est produite ou se produira et parce qu'au moins une entité dont il dépend structurellement est inopérante ou deviendra inopérante.

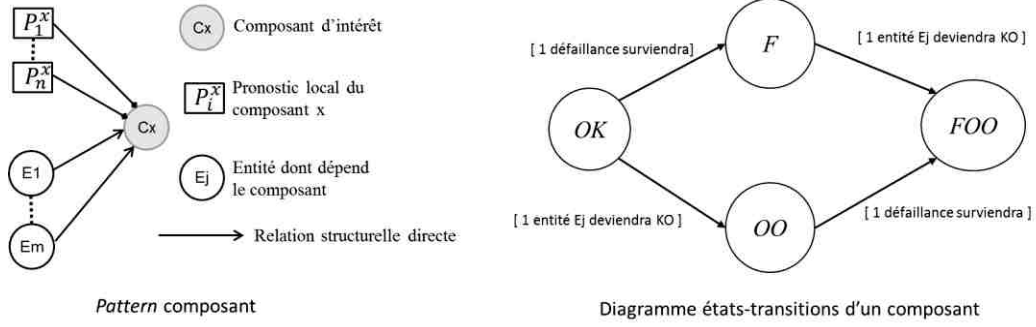


Figure 44. *Pattern* et diagramme états-transitions d'un composant

Un cinquième état,  $KO_r$ , est envisagé.  $KO_r$  est l'union des états  $F$ ,  $OO$  et  $FOO$  tels que  $KO_r = \{F, OO, FOO\}$ .  $KO_r$  signifie que le composant ne pourra pas dans le respect des performances minimales requises pour réaliser les tâches prévues, quelles qu'en soient les causes. Cet état est utilisé pour évaluer l'impact de l'incapacité du composant à exécuter les tâches prévues dans le STMC par propagation dans les graphes de modélisation. Pour cela, il faut réduire le cadre de discernement  $C$  au cadre de discernement  $C_r = \{\{OK\}, KO_r\}$ . La distribution des masses de croyance sur  $\varepsilon_j^{C_r} \in 2^{C_r} = \{\emptyset, \{OK\}, KO_r, \{\{OK\}, KO_r\}\}$  est calculée à partir de la distribution de bbas sur  $\varepsilon_i^C$  les éléments du  $2^C$  par la relation (32) dérivée de l'approximation bayésienne (Bauer, 1997). Sachant que les éléments fusionnés sont ici choisis a priori et non sélectionnés parmi les valeurs de leurs *bba*, ce n'est pas une approximation.

$$(32) \quad bba(\varepsilon_j^{C_r}) = \begin{cases} bba(\varepsilon_i^C | \varepsilon_i^C = \varepsilon_j^{C_r}), & \varepsilon_j^{C_r} \cap KO_r = \emptyset \\ \sum_{\varepsilon_i^C \subseteq KO_r} bba(\varepsilon_i^C), & \varepsilon_j^{C_r} = KO_r \\ \sum_{\varepsilon_i^C \cap KO_r \neq \emptyset, \varepsilon_i^C - KO_r = \varepsilon_j^{C_r} - KO_r} bba(\varepsilon_i^C), & \varepsilon_j^{C_r} - KO_r \neq \emptyset \end{cases}$$

La première étape consiste en une projection des *bba* des éléments de  $2^{P_1} = \{\emptyset, \{F\}_1, \{\bar{F}\}_1, \{F, \bar{F}\}_1\}$  ensemble des parties du cadre de discernement du premier pronostic local sur l'ensemble des parties du cadre de discernement  $2^C$  du composant en faisant en sorte que  $bba^{2^C}(\{OK\}) = bba^{2^{P_1}}(\{\bar{F}\}_1)$ ,  $bba^{2^C}(\{F\}) = bba^{2^{P_1}}(\{F\}_1)$  et  $bba^{2^C}(\{OK, F\}) = bba^{2^{P_1}}(\{F, \bar{F}\}_1)$ ; les autres *bba* des éléments de  $2^C$  sont mis à zéro. Si le composant a plus d'un pronostic local, la deuxième étape consiste à considérer l'impact des autres pronostics locaux un par un grâce à la grille d'inférence du Tableau 4 et à la relation (28). Dans le Tableau 4, l'indice  $i$  désigne le  $i$ ème pronostic local considéré, l'indice  $i-1$  est pour les éléments de  $2^C$  dont les valeurs de *bba* ne tiennent pas encore compte des *bba* du  $i$ ème pronostic local et l'indice  $i$  vaut aussi pour les éléments de  $2^C$  dont les valeurs de *bba* sont modifiées lorsque l'inférence

est effectuée pour le ième pronostic local considéré. Les valeurs des *bba* des éléments de  $2^C$  qui ne figurent pas dans le Tableau 4 ne sont pas modifiées.

| $2^C \backslash 2^{P_i}$ | $\{F\}_i$ | $\{\bar{F}\}_i$ | $\{F, \bar{F}\}_i$ |
|--------------------------|-----------|-----------------|--------------------|
| $\{F\}_{i-1}$            | $\{F\}_i$ | $\{F\}_i$       | $\{F\}_i$          |
| $\{OK\}_{i-1}$           | $\{F\}_i$ | $\{OK\}_i$      | $\{OK, F\}_i$      |
| $\{OK, F\}_{i-1}$        | $\{F\}_i$ | $\{OK, F\}_i$   | $\{OK, F\}_i$      |

Tableau 4. Grille d'inférence pour un composant ayant plus d'un pronostic local

Si le composant dépend aussi structurellement d'entités, la troisième étape consiste à considérer l'impact de ces entités une à une grâce à la grille d'inférence du Tableau 5 et à la relation (28). Pour la jième entité dont dépend le composant ( $E_j \in \Gamma^{-1}(Cx)$  où  $\Gamma^{-1}(X)$  désigne l'ensemble des entités qui précèdent  $X$  dans le graphe de modélisation), l'ensemble des parties du cadre de discernement est  $2^{E_j} = \{\emptyset, \{OK\}_j, \{KO\}_j, \{OK, KO\}_j\}$ . L'état  $KO$  signifie que l'entité ne sera pas en mesure d'opérer dans les performances minimales requises pour accomplir les tâches prévues, quelles qu'en soient les causes. Dans le Tableau 5, l'indice j-1 est pour les éléments de  $2^C$  dont les valeurs de *bba* ne prennent pas encore en compte les *bba* des éléments de  $2^{E_j}$  et l'indice j vaut aussi pour les éléments de  $2^C$  dont les valeurs de *bba* sont modifiées une fois l'inférence traitée pour la jième entité considérée.

| $2^C \backslash 2^{E_j}$   | $\{OK\}_j$             | $\{KO\}_j$      | $\{OK, KO\}_j$         |
|----------------------------|------------------------|-----------------|------------------------|
| $\{OK\}_{j-1}$             | $\{OK\}_j$             | $\{OO\}_j$      | $\{OK, OO\}_j$         |
| $\{F\}_{j-1}$              | $\{F\}_j$              | $\{FOO\}_j$     | $\{F, FOO\}_j$         |
| $\{OO\}_{j-1}$             | $\{OO\}_j$             | $\{OO\}_j$      | $\{OO\}_j$             |
| $\{FOO\}_{j-1}$            | $\{FOO\}_j$            | $\{FOO\}_j$     | $\{FOO\}_j$            |
| $\{OK, F\}_{j-1}$          | $\{OK, F\}_j$          | $\{OO, FOO\}_j$ | $\{OK, F, OO, FOO\}_j$ |
| $\{OK, OO\}_{j-1}$         | $\{OK, OO\}_j$         | $\{OO\}_j$      | $\{OK, OO\}_j$         |
| $\{OK, FOO\}_{j-1}$        | $\{OK, FOO\}_j$        | $\{OO, FOO\}_j$ | $\{OK, OO, FOO\}_j$    |
| $\{F, OO\}_{j-1}$          | $\{F, OO\}_j$          | $\{OO, FOO\}_j$ | $\{OO, FOO\}_j$        |
| $\{F, FOO\}_{j-1}$         | $\{F, FOO\}_j$         | $\{FOO\}_j$     | $\{F, FOO\}_j$         |
| $\{OO, FOO\}_{j-1}$        | $\{OO, FOO\}_j$        | $\{OO, FOO\}_j$ | $\{OO, FOO\}_j$        |
| $\{OK, F, OO\}_{j-1}$      | $\{OK, F, OO\}_j$      | $\{OO, FOO\}_j$ | $\{OK, F, OO, FOO\}_j$ |
| $\{OK, F, FOO\}_{j-1}$     | $\{OK, F, FOO\}_j$     | $\{OO, FOO\}_j$ | $\{OK, F, OO, FOO\}_j$ |
| $\{OK, OO, FOO\}_{j-1}$    | $\{OK, OO, FOO\}_j$    | $\{OO, FOO\}_j$ | $\{OK, OO, FOO\}_j$    |
| $\{F, OO, FOO\}_{j-1}$     | $\{F, OO, FOO\}_j$     | $\{OO, FOO\}_j$ | $\{F, OO, FOO\}_j$     |
| $\{OK, F, OO, FOO\}_{j-1}$ | $\{OK, F, OO, FOO\}_j$ | $\{OO, FOO\}_j$ | $\{OK, F, OO, FOO\}_j$ |

Tableau 5. Grille d'inférence pour considérer les entités dont le composant dépend

Une fois les *bba* des éléments de  $2^C$  calculées, les mesures de croyance et de plausibilité et de probabilité pignistique de chaque élément de  $C$  sont calculées à partir de (29), (30) et (31). Puis  $C$  est réduit à  $C_r$  par l'utilisation (32) pour la propagation dans les graphes de modélisation.

Dans la première phase de développement, les inférences bayésiennes sont :

$$(33) \quad \lambda_F^{Cx}(t_e) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i^x(t_e))$$

où  $\lambda_F^{Cx}(t_e)$  est à probabilité qu'un composant  $Cx$  subissent une défaillance interne lors de l'exécution des futures tâches devant s'achever à  $t_e$  et  $P_i^x(t_e)$  est la probabilité que le ième mode de défaillance survienne avant  $t_e$  donné par son pronostic local. Pour le passage à l'état  $OO$  on a la relation suivante :

$$(34) \quad \lambda_{OO}^{Cx}(t_e) = \begin{cases} 1 - \prod_{Ei \in \Gamma^{-1}(Cx)} (1 - \lambda_{KO}^{Ei}(t_e)), & \Gamma^{-1}(Cx) \neq \emptyset \\ 0, & \Gamma^{-1}(Cx) = \emptyset \end{cases}$$

avec  $\lambda_{OO}^{Cx}(t_e)$  la probabilité que le composant ne puisse plus fonctionner lors de l'exécution des tâches à cause d'entités dont il dépend structurellement.  $\lambda_{KO}^{Ei}(t_e)$  est la probabilité qu'une l'entité  $Ei$  deviennent inopérante lors l'exécution des futures tâches. Pour les inférences bayésiennes, l'état  $KO$  correspond à l'état  $KO_r$  des inférences supportées par la DST et donc on a

$$(35) \quad \lambda_{KO}^{Cx}(t) = 1 - (1 - \lambda_F^{Cx}(t))(1 - \lambda_{OO}^{Cx}(t))$$

#### 4.2.2.2 Le pattern redondance

Dans le cas des redondances, il nous a paru intéressant de distinguer un état de plus que les deux états correspondant à un service opérationnel ( $OK$ ) et à un service en panne ( $KO$ ). Cet état supplémentaire est celui pour lequel le service est certes opérationnel mais supporté par le nombre minimum d'entités. Dans une telle situation, souvent les systèmes ne sont pas solliciter pour de nouvelle tâche principalement pour des raisons de sécurité (Goupil, 2011). En effet, la perte d'une autre entité entraînera la perte du service. Ainsi, de la maintenance est souvent conduite avant cette perte de redondance si le critère de sécurité n'est pas satisfait.

Le *pattern* redondance est, comme cela est montré sur la Figure 45, constitué d'un sommet auquel appartiennent  $n$  entités. Les  $n$  entités exécutent le même service qui est opérationnel si au moins  $p$  entités sont opérationnelles ( $p < n$ ).

Trois états distincts sont considérés dont un est consacré à la perte de redondance ( $LR$ ). Ils définissent le cadre de discernement pour une redondance  $R^p = \{OK, LR, KO\}$ .

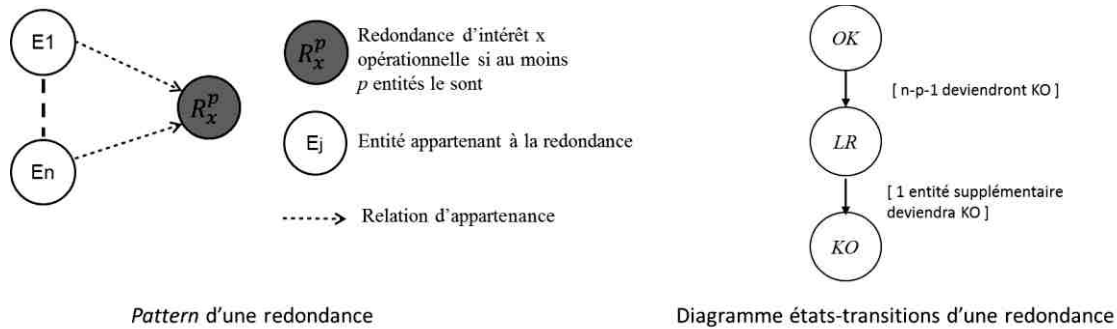


Figure 45. *Pattern* et diagramme états-transitions d'une redondance

Nous avons considéré que  $LR$  est un état dégradé de  $OK$ . Un état  $OK_r$  a été défini comme étant  $OK_r = \{OK, LR\}$ . Cet état est utilisé pour propager, dans les graphes de modélisation, la capacité de la structure redondante à fonctionner dans le respect des performances minimales nécessaires à l'exécutions des tâches de production prévues de s'achever à  $t_e$ . Pour cela, il faut réduire le cadre de discernement  $R^p$  au cadre de discernement  $R_r^p = \{OK_r, \{KO\}\}$ . La distribution de *bba* sur les éléments  $\varepsilon_j^{R_r^p} \in 2^{R_r^p} = \{\emptyset, OK_r, \{KO\}, \{OK_r, \{KO\}\}\}$  est calculée par la distribution des *bba* sur  $\varepsilon_i^{R^p}$  les éléments de  $2^{R^p}$  par la relation (36) obtenue par l'approximation bayésienne comme (32).



$$(36) \quad bba(\varepsilon_j^{R^p}) = \begin{cases} bba(\varepsilon_i^{R^p} | \varepsilon_i^{R^p} = \varepsilon_j^{R^p}), \varepsilon_j^{R^p} \cap OK_r = \emptyset \\ \sum_{\varepsilon_i^{R^p} \subseteq OK_r} bba(\varepsilon_i^{R^p}), \varepsilon_j^{R^p} = OK_r \\ \sum_{\varepsilon_i^{R^p} \cap OK_r \neq \emptyset, \varepsilon_i^{R^p} - OK_r = \varepsilon_j^{R^p} - OK_r} bba(\varepsilon_i^{R^p}), \varepsilon_j^{R^p} - OK_r \neq \emptyset \end{cases}$$

La distribution des masses de croyance sur les éléments de  $2^{R^p}$  est calculée pas à pas au moyen de grilles d'inférence et la relation (28) en considérant successivement les entités qui appartiennent à la redondance. Les grilles d'inférence sont définies à partir des transitions décrites dans le diagramme états-transitions de la Figure 45.

Nous ne donnons ici que les inférences pour des redondances où  $p = 1$ . Cependant nous avons donné des exemples de construction pour les inférences pour des redondances  $p/n$  avec  $p > 1$  dans [A5].

Pour les redondances où  $p = 1$ , la première étape consiste en une projection des  $bba$  des éléments l'ensemble des parties du cadre de discernement réduit  $2^{E_1} = \{\emptyset, \{OK\}_1, \{KO\}_1, \{OK, KO\}_1\}$  de la première entité sur les  $bba$  des éléments de l'ensemble des parties du cadre de discernement  $2^{R^1}$  de la redondance par les relations  $bba^{2^{R^1}}(\{OK\}) = bba^{2^{E_1}}(\{OK\}_1)$ ,  $bba^{2^{R^1}}(\{KO\}) = bba^{2^{E_1}}(\{KO\}_1)$  et  $bba^{2^{R^1}}(\{OK, KO\}) = bba^{2^{E_1}}(\{OK, KO\}_1)$ ; les  $bba$  des autres éléments de  $2^{R^p}$  sont mis à zéro. La deuxième étape consiste à considérer l'impact des états des autres entités une à une grâce aux grilles d'inférence du Tableau 6 et du Tableau 7 et à la relation (28). Dans le Tableau 6 et le Tableau 7, l'indice  $k$  désigne la  $k$ ème entité considérée, l'indice  $k-1$  est relatifs aux éléments de  $2^{R^1}$  dont les valeurs de  $bba$  ne tiennent pas encore compte des  $bba$  de la  $k$ ème entité considérée et l'indice  $k$  vaut aussi pour les éléments de  $2^{R^1}$  dont les valeurs des  $bba$  sont modifiées lorsque l'inférence est traitée pour la  $k$ ème entité considérée. L'inférence du Tableau 6 est utilisée pour la deuxième entité de la redondance. Ensuite, l'inférence du Tableau 7 est utilisée pour toutes les autres entités de la redondance. Les valeurs des  $bba$  des éléments de  $2^{R^1}$  non listés dans le Tableau 6 ou le Tableau 7 ne sont pas modifiées.

| $2^{E_2}$      | $2^{R^1}$      |                |                    |
|----------------|----------------|----------------|--------------------|
|                | $\{OK\}_2$     | $\{KO\}_2$     | $\{OK, KO\}_2$     |
| $\{OK\}_1$     | $\{OK\}_2$     | $\{LR\}_2$     | $\{OK, LR\}_2$     |
| $\{KO\}_1$     | $\{LR\}_2$     | $\{KO\}_2$     | $\{LR, KO\}_2$     |
| $\{OK, KO\}_1$ | $\{OK, LR\}_2$ | $\{LR, KO\}_2$ | $\{OK, LR, KO\}_2$ |

Tableau 6. Grille d'inférence pour considérer la deuxième entité d'une redondance dont  $p = 1$

Une fois les masses de croyance des éléments de  $2^{R^p}$  calculées, les mesures de croyance, de plausibilité et de probabilité pignistique de chaque élément de  $R^p$  sont calculées à partir de (29), (30) et (31). Puis,  $R^p$  est réduit à  $R_r^p$  par l'utilisation de (36) à des fins de propagation dans les graphes de modélisation.

Dans la première phase de développement, les inférences bayésiennes sont pour une redondance dont  $p = 1$ :

$$(37) \quad \lambda_{KO}^{R_x^1}(t_e) = \prod_{Ei \in \Gamma^{-1}(R_x^1)} \lambda_{KO}^{Ei}(t_e)$$

$$(38) \quad \lambda_{LR}^{R_x^1}(t_e) = \lambda_{KO}^{R_x^1}(t_e) + \sum_{Ei \in \Gamma^{-1}(R_x^1)} \left\{ (1 - \lambda_{KO}^{Ei}(t_e)) \cdot \prod_{Ej \in \Gamma^{-1}(R_x^1), j \neq i} \lambda_{KO}^{Ej}(t_e) \right\}$$

Dans le cas des redondances passives, les inférences proposées sont pessimistes. En effet, elles considèrent que toutes les entités assurant le service fonctionneront ensemble pendant les tâches planifiées alors qu'une seule (ou  $p$  si  $p > 1$ ) sera sollicitée avec l'hypothèse optimiste. Toutefois, les

entités assurant des redondances passives sont principalement sollicitées lorsque toutes les autres entités assurant le service sont défaillantes. Dans cette situation, la redondance est en état *LR*. Une telle situation est souvent critique en termes de sécurité et nécessite une maintenance urgente qui peut requérir l'arrêt de la tâche productive le plus rapidement possible ne permettant pas de remplir tous les objectifs de production. C'est pourquoi les valeurs de (*LR*),  $Pl(LR)$ ,  $BetP(LR)$  ou encore  $\lambda_{LR}^{R^p}(t_e)$  pour une redondance sont au moins aussi importantes que les valeurs de  $Bel(KO)$ ,  $Pl(KO)$ ,  $BetP(KO)$  ou encore  $\lambda_{KO}^{R^p}(t_e)$  pour une aide à la décision pour la planification de la production et de la maintenance.

| $2^{E_k}$              | $\{OK\}_k$     | $\{KO\}_k$         | $\{OK, KO\}_k$     |
|------------------------|----------------|--------------------|--------------------|
| $2^{R^1}$              |                |                    |                    |
| $\{OK\}_{k-1}$         | $\{OK\}_k$     | $\{OK\}_k$         | $\{OK\}_k$         |
| $\{LR\}_{k-1}$         | $\{OK\}_k$     | $\{LR\}_k$         | $\{OK, LR\}_k$     |
| $\{KO\}_{k-1}$         | $\{LR\}_k$     | $\{KO\}_k$         | $\{LR, KO\}_k$     |
| $\{OK, LR\}_{k-1}$     | $\{OK\}_k$     | $\{OK, LR\}_k$     | $\{OK, LR\}_k$     |
| $\{OK, KO\}_{k-1}$     | $\{OK, LR\}_k$ | $\{OK, KO\}_k$     | $\{OK, LR, KO\}_k$ |
| $\{LR, KO\}_{k-1}$     | $\{OK, LR\}_k$ | $\{LR, KO\}_k$     | $\{OK, LR, KO\}_k$ |
| $\{OK, LR, KO\}_{k-1}$ | $\{OK, LR\}_k$ | $\{OK, LR, KO\}_k$ | $\{OK, LR, KO\}_k$ |

Tableau 7. Grille d'inférence pour considérer la troisième entité et plus d'une redondance dont  $p = 1$

#### 4.2.2.3 Le pattern fonction

Les fonctions sont mises en œuvre par plusieurs entités, qui peuvent être des composants, des sous-fonctions, ou des services mis en œuvre par des entités redondantes ; mais elles peuvent également être mises en œuvre par une entité unique. Une fonction deviendra inopérante dans l'accomplissement des tâches planifiées dès qu'une des entités qui concourent à sa mise en œuvre deviendra inopérante. Par conséquent, le *pattern* d'une fonction est constitué d'un sommet auquel  $n$  entités contribuent à sa mise en œuvre, comme cela est illustré sur la Figure 46.

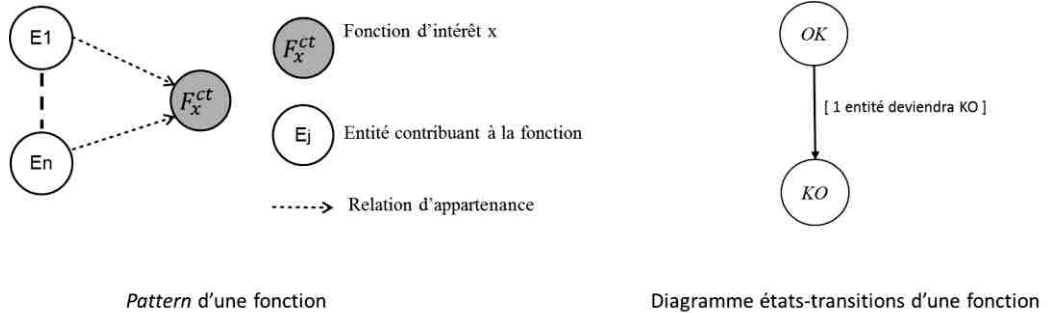


Figure 46. *Pattern* et diagramme états-transitions d'une fonction

La distribution des masses de croyance sur les éléments de  $2^{F^{ct}}$  est calculée pas à pas au moyen d'une grille d'inférence et la relation (28) en considérant successivement les entités qui appartiennent à fonction. La grille d'inférence est définie à partir de la transition décrite dans le diagramme état-machine de la Figure 46.

La première étape consiste en une projection des *bba* des éléments de l'ensemble des parties du cadre de discernement de la première entité contribuant à la fonction  $2^{E_1} = \{\emptyset, \{OK\}_1, \{KO\}_1, \{OK, KO\}_1\}$  sur les éléments de l'ensemble des parties du cadre de discernement de la fonction  $2^{F^{ct}}$  en leur donnant les valeurs

$$bba^{2^{F^{ct}}}(\{OK\}) = bba^{2^{E_1}}(\{OK\}_1), \quad bba^{2^{F^{ct}}}(\{KO\}) = bba^{2^{E_1}}(\{KO\}_1) \quad \text{et}$$

$bba^{2^{F^{ct}}}(\{OK, KO\}) = bba^{2^{E_1}}(\{OK, KO\}_1)$ . Si plus d'une entité contribue à la fonction, la deuxième étape consiste à considérer l'impact des états des autres entités une à une grâce à la grille d'inférence du Tableau 8 et la relation (28). L'indice  $i$  désigne la  $i$ ème entité considérée, l'indice  $i-1$  est relatifs aux éléments de  $2^{F^{ct}}$  dont les valeurs de  $bba$  ne tiennent pas encore compte des  $bba$  de la  $i$ ème entité considérée et l'indice  $i$  est aussi relatif aux éléments de  $2^{F^{ct}}$  dont les valeurs de  $bba$  sont modifiées une fois la déduction est traitée pour la  $i$ ème entité considérée.

| $2^{F^{ct}} \backslash 2^{E_i}$ | $\{OK\}_i$     | $\{KO\}_i$ | $\{OK, KO\}_i$ |
|---------------------------------|----------------|------------|----------------|
| $\{OK\}_{i-1}$                  | $\{OK\}_i$     | $\{KO\}_i$ | $\{OK, KO\}_i$ |
| $\{KO\}_{i-1}$                  | $\{KO\}_i$     | $\{KO\}_i$ | $\{KO\}_i$     |
| $\{OK, KO\}_{i-1}$              | $\{OK, KO\}_i$ | $\{KO\}_i$ | $\{OK, KO\}_i$ |

Tableau 8. Grille d'inférence pour considérer les entités au contribuant à une fonction

Une fois les  $bba$  des éléments de  $2^{F^{ct}}$  calculées, les mesures de croyance, de plausibilité, de probabilité pignistique de chaque élément de  $F^{ct}$  sont calculées à partir de (29), (30) et (31).

Dans la première phase de développement, l'inférence bayésienne pour les fonctions est :

$$(39) \quad \lambda_{KO}^{F_x^{ct}}(t_e) = 1 - \prod_{E_i \in \Gamma^{-1}(F_x^{ct})} (1 - \lambda_{KO}^{E_i}(t_e))$$

### 4.2.3 Traitements

#### 4.2.3.1 Traitements des graphes de modélisation

Les graphes de modélisation peuvent être en partie obtenus à partir de modèles de conception du STMC. Cependant, ces modèles peuvent ne pas correspondre aux besoins des traitements. Le premier besoin consiste à obtenir des graphes de modélisation acyclique. En effet, les traitements reposent sur des processus issus des réseaux qui sont des graphes acycliques (Koski et Noble, 2009). Ces cycles peuvent être identifiés grâce à l'algorithme de Tarjan (1972).

Il faut supprimer le cycle en opérant une transformation qui consiste en l'introduction d'une fonction (qui sera traité comme un nœud correspondant au *pattern* fonction) que nous appelons fonction d'interdépendance. Cette transformation revient à remplacer les relations structurelles par des relations d'appartenance et *vice versa*. Mais comme les arcs du graphe de modélisation du STMC ne font que diriger les déplacements dans le graphe sans apporter d'information, cela n'a pas d'impact sur le calcul des différents attributs des nœuds. Trois étapes conduisent à la transformation d'un cycle dans un graphe de modélisation :

1. La fonction d'interdépendance regroupe tous les composants inclus dans le cycle ainsi que les composants de fonctions incluses dans le cycle.
2. La fonction d'interdépendance devient l'unique entité de chaque fonction contenant au moins un composant appartenant inclus dans le cycle.
3. Les composants qui étaient la destination d'arcs de relations structurelles partant de composants qui appartiennent maintenant à la fonction d'interdépendance sont alors reliés à la fonction d'interdépendance, qui devient le départ des nouveaux arcs de relations structurelles pour lesquels ces composants sont les destinations.

Un exemple de cette transformation est illustré sur la Figure 47 où Fid est la fonction d'interdépendance introduite et où Cx sont des composants et des Fy des fonctions.

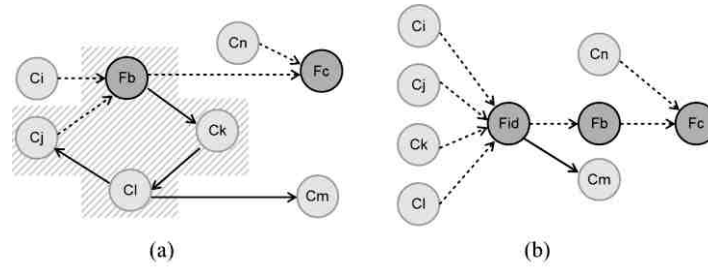


Figure 47. Exemple de transformation d'un cycle (a) et fonction d'interdépendance (b)

L'autre point consiste à ne pas comptabiliser plusieurs fois des structures de croyance ou la probabilité d'occurrence d'un même évènement. Ceci peut être le cas si un nœud A est atteignable à partir d'un nœud B par plusieurs chemins. Ceci est pris en considération dans les outils commercialisés permettant de modéliser et effectuer des calculs de probabilités conditionnelles par des réseaux bayésiens. Cependant cela doit être considéré si des plateformes autres sont utilisées. Pour éviter cela, nous avons proposé de générer plusieurs graphes de modélisation d'un STMC. Le traitement ne sera pas effectué si un des deux chemins passe par une redondance. Ce traitement est illustré par l'exemple de la Figure 48 et est détaillé dans [A4].

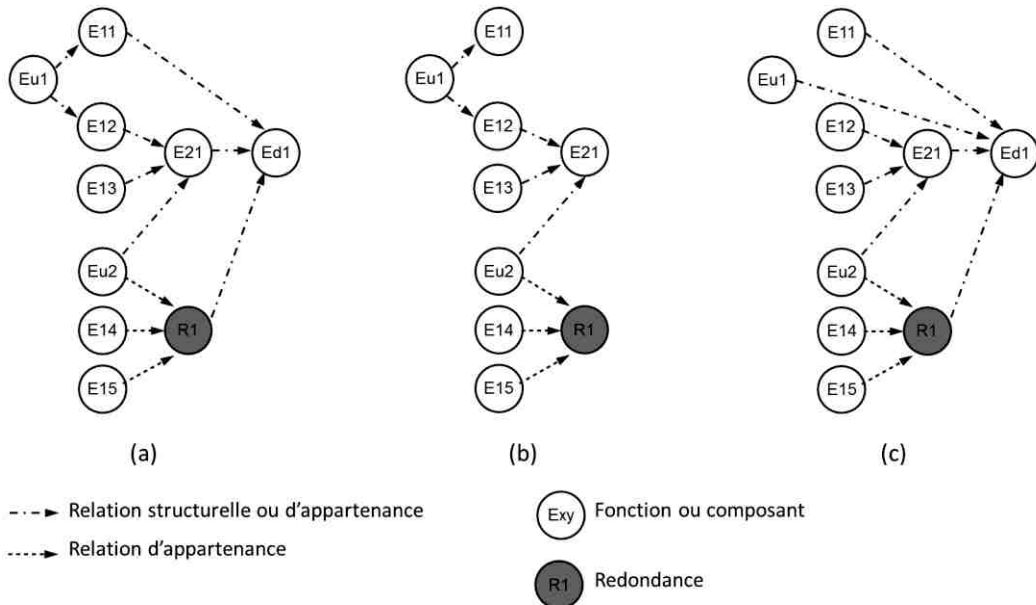


Figure 48. Exemples de génération de graphes pour les chemins multiples

Sur le graphe (a) de la Figure 48, deux chemins permettent d'atteindre le nœud Ed1 à partir du nœud Eu1 mais aussi à partir du nœud Eu2. Cette multiplicité de chemin à partir du nœud Eu2 ne fait pas l'objet de traitement car l'un des deux chemins passe par la redondance R1. Cependant la multiplicité de chemins à partir du nœud Eu1 est à traiter. Ce traitement conduit à la construction de deux graphes (b) et (c). Le graphe (b) est utilisé pour calculer les structures de croyance de tous les nœuds de ce graphe ou les probabilités des états des nœuds de ce graphe. Le graphe (c) est un second graphe pour lequel toutes les structures de croyance des nœuds de ce graphe, ou les probabilités des états des nœuds sont recalculées mais seuls celles du nœud Ed1 sont conservées comme indicateurs pour l'aide à la décision.

#### 4.2.3.2 Identification des composants à maintenir

Les indicateurs que nous avons présentés permettent de déterminer l'aptitude d'accomplir les futures tâches de production pour chacune des entités d'un STMC. Cependant, dans un STMC comportant un

très grand nombre d'entités, il est difficile pour décideur de consulter l'ensemble de ces indicateurs. Nous pensons que, d'un point de vue production, les indicateurs d'intérêt sont ceux relatifs à l'aptitude des fonctions, services ou sous-systèmes indispensables au bon déroulement des tâches de production à les accomplir. Néanmoins, lorsque ces aptitudes sont insuffisantes, il est intéressant de savoir quels sont les composants devant subir une intervention de maintenance pour améliorer ces aptitudes au mieux.

Pour cela, nous avons ajouté deux valeurs qui sont calculées pour chaque nœud  $Ek$  des graphes de modélisation d'un STMC :  $id^{Ek}(t_e)$  qui représente l'identifiant du composant devant subir une maintenance pour améliorer au mieux l'aptitude de l'entité à accomplir les futures tâches de production devant s'achever à  $t_e$  et  $bp_{Fmax}^{Ek}(t_e)$  qui est introduit afin d'éviter des parcours inverses dans le graphe et contient la valeur de  $\lambda_F^{Cx}(t_e)$ ,  $BetP^{Cx}(F)$  considérée à  $t_e$  ou encore  $Pl^{Cx}(F)$  considérée à  $t_e$  et où  $Cx$  est le composant ayant la plus grande de ces valeurs à partir duquel le nœud  $Ek$  peut être atteint.

Dans les développements de la première phase, tous les pronostics locaux étant probabilistes  $bp_{Fmax}^{Ek}(t_e)$  correspond donc à la plus grande des valeurs des  $\lambda_F^{Cx}(t_e)$  où  $Cx \in A^{-1}(Ek)$  où  $A^{-1}(Ek)$  désigne l'ensemble des nœuds à partir desquels le nœud  $Ek$  est atteignable.

Dans les développements de la première phase, nous avons proposé que  $bp_{Fmax}^{Ek}(t_e)$  corresponde à la plus grande des valeurs des  $BetP^{Cx}(F)$  où  $Cx \in A^{-1}(Ek)$ . Cette proposition est ainsi proche de celle faite en première phase. Cependant, nous pensons que pour certaines catégories de STMC dont les défaillances de services ou fonctions (comme un système de freinage sur un moyen de transport en commun) peuvent avoir des conséquences importantes qu'il est préférable de considérer les mesures de plausibilité qui peuvent être considérées comme la limite supérieure de la probabilité et donc que  $bp_{Fmax}^{Ek}(t_e)$  corresponde à la plus grande des valeurs des  $Pl^{Cx}(F)$  où  $Cx \in A^{-1}(Ek)$ .

Nous avons alors proposé deux traitements pour déterminer  $id^{Ek}(t_e)$  et  $bp_{Fmax}^{Ek}(t_e)$  qui sont :

- pour un nœud  $Ex$  qui est un composant :

Si  $bp_{Fmax}^{Ek}(t_e) > bp_F^{Ex}(t_e)$  où  $Ek$  est tel que

$$bp_{Fmax}^{Ek}(t_e) = \max_{Ei \in \Gamma^{-1}(Ex)} \left\{ \max_{Ei \notin \mathbf{R}} (bp_{Fmax}^{Ei}(t_e)), \max_{Ei \in \mathbf{R}} (bp_{KO}^{Ei}(t_e)) \right\} \text{ alors}$$

$$id^{Ex}(t_e) \leftarrow id^{Ek}(t_e)$$

$$(40) \quad bp_{Fmax}^{Ex}(t_e) \leftarrow bp_{Fmax}^{Ek}(t_e)$$

Sinon

$$id^{Ex}(t_e) \leftarrow Ex$$

$$bp_{Fmax}^{Ex}(t_e) \leftarrow bp_F^{Ex}(t_e)$$

Finsi

- pour un nœud  $Ex$  qui est une fonction ou une redondance :

$$id^{Ex}(t_e) \leftarrow id^{Ek}(t_e)$$

$$(41) \quad bp_{Fmax}^{Ex}(t_e) \leftarrow bp_{Fmax}^{Ek}(t_e)$$

$$\text{où } Ek \text{ est tel que } bp_{Fmax}^{Ek}(t_e) = \max_{Ei \in \Gamma^{-1}(Ex)} \left\{ \max_{Ei \notin \mathbf{R}} (bp_{Fmax}^{Ei}(t_e)), \max_{Ei \in \mathbf{R}} (bp_{KO}^{Ei}(t_e)) \right\}$$

avec  $bp_{\varepsilon}^{Ez}(t_e)$  qui est soit  $\lambda_{\varepsilon}^{Ez}(t_e)$ , soit  $BetP^{Ez}(\varepsilon)$  ou soit  $Pl^{Ez}(\varepsilon)$  et avec  $\mathbf{R}$  représentant l'ensemble des nœuds du graphe qui sont des redondances.

#### 4.2.3.3 Détermination des indicateurs

La détermination des indicateurs d'aide à la décision consiste en un parcours de graphe dans lequel les attributs des nœuds sont calculés à partir des attributs des nœuds qui appartiennent aux ensembles de leurs prédécesseurs. Cette détermination est effectuée en cinq étapes principales :

1. Les graphes de modélisation sont instanciés.
2. Les attributs calculés de tous les nœuds sont mis à zéro et leur attribut  $id^{Ex}(t_e)$  est mis à une valeur par défaut indiquant que le processus d'évaluation n'a pas été lancé.
3. Les pronostics locaux sont évalués. Cela peut nécessiter de connaître leur durée d'utilisation effective, la durée et, éventuellement, la sévérité de leurs futurs engagements sur les tâches de production prévues.
4. Pour chaque pronostic local, les valeurs des probabilités ou des *bba*, croyances, plausibilités et probabilités pignistiques sont déterminées pour le composant auquel il correspond ainsi que ses champs  $id^{Ex}(t_e)$  et  $bp_{Fmax}^{Ex}(t_e)$ . Puis sur chacun des graphes de modélisation.
  - 4.1. Si au moins une valeur de probabilité ou de *bba*, est modifiée alors pour chaque successeur du nœud les probabilités ou les *bba*, croyances, plausibilités et probabilités pignistiques sont déterminées ainsi que ses champs  $id^{Ex}(t_e)$  et  $bp_{Fmax}^{Ex}(t_e)$  selon les inférences correspondant à son type (composant fonction ou redondance).
  - 4.2. Puis 4.1
5. Puis, les indicateurs d'aide à la décision des nœuds sont affichés ou transmis à la gestion de production et de maintenance selon le graphe de modélisation comme indiqué au paragraphe 4.2.3.1.

Dans la première phase de développement nous avons réalisé une plateforme permettant d'effectuer ces traitements que nous avons validée à l'aide du logiciel Netica pour les probabilités des états. Dans la deuxième phase nous avons utilisé le logiciel de simulation Arena et vérifié les résultats obtenus pour des systèmes tests, un pont et un système de Kamat-Riley (Simon *et al.*, 2007 ; Simon *et al.*, 2008), mais avec un seul pronostic par composant. La vérification des composants à maintenir ayant été faite à partir des résultats de simulations réalisées lors de la première phase mais en utilisant uniquement des pronostics fournissant une information probabiliste.

Plusieurs scénarios ont été testés dans les deux phases de développement, principalement pour montrer comment les indicateurs d'aide à la décision fournis peuvent être utilisés pour décider des tâches de productions et des interventions de maintenance [A4, A5]. Un scénario a été simulé pour montrer comment à partir de défaillances de composant (pouvant provenir des diagnostics) on peut avoir une idée de l'état opérationnel du STMC d'un point de vue fonctionnalité et services.

### 4.3 Conclusion et Axes de développement

Au cours de ces travaux portant sur l'évaluation de la santé de STMC nous avons proposé lors des travaux réalisés dans le cadre du projet Archistic et la thèse de Mickaël Diévert une modélisation des connaissances relatives aux STMC pour le déploiement de leurs fonctions de diagnostic et de pronostic dont les buts respectifs sont l'identification des composants défaillants à partir de symptômes et l'évaluation de l'aptitude du STMC à accomplir les tâches futures à partir des RUL des composants. Une architecture distribuée basée sur les systèmes multi-agents a également été proposées pour la mise en œuvre de ces fonctions [ThDiévert, C10-C13].

Lors de ces premiers travaux portant sur une fonction de pronostic, les RUL ont été considérés comme des valeurs scalaires. Un état de l'art plus fouillé sur les pronostics de composants a montré que les informations issues des pronostics de composants comportent de l'incertitude, qui selon l'état de l'art, peut être de nature purement probabiliste ou comporte une part d'ignorance assimilée à de l'incertitude épistémique.

Une première phase de développement à consister à établir un pronostic de STMC à partir des pronostics locaux de ses composants ayant une incertitude considérée comme probabiliste. Nous avons pu exploiter la modélisation développée dans [ThDiévar] et y adapter des inférences bayésiennes nécessitant des transformations des graphes de modélisation. Nous y avons joint des traitements permettant d'identifier les composants à maintenir pour améliorer au mieux l'aptitude d'un STMC à accomplir ses tâches futures [A4]. Dans une seconde phase de développement, objet de la thèse d'Esteban Le Maitre Gonzalez, nous avons considéré, en plus de l'incertitude probabiliste, l'incertitude épistémique dans l'information produite par les pronostics de composants donnant lieu à une typologie des pronostics locaux qui sont, avec les graphes de modélisation, les entrées de la fonction de pronostic du STMC pour laquelle des inférences ont été proposées afin de tenir compte de ces incertitudes épistémiques tant dans la détermination de l'aptitude du STMC à accomplir des tâches futures que dans l'identification des composants à maintenir pour améliorer au mieux cette aptitude [ThLeMaitre, A5, C14].

Ces travaux peuvent contribuer pleinement à la génération d'informations sur la santé des systèmes de production de bien ou de services dans le cadre de PSS (*Product-Service Systems*) où le cœur de métier consiste à fournir aux clients de la disponibilité des ressources plutôt qu'un produit devant être maintenu (Silva Teixeira *et al.*, 2012). Ainsi notre proposition d'évaluation doit permettre d'éviter des arrêts imprévus ou trop longs et donc des pénalités contractuelles par le déploiement de services d'évaluation de la santé des systèmes et la transmission de l'état des systèmes aux entreprises assurant le service de maintenance dans le cas où cette maintenance est externalisée mais aussi service de maintenance de l'entreprise même en permettant une meilleure gestion des pièces de rechange et des ressources [A6].

Plusieurs axes de développement peuvent être envisagés à partir de ces travaux. Parmi eux, nous pensons à l'intégration des diagnostics qui comportent également une part d'incertitude souvent inhérente aux perturbations sur les mesures et aux tests générant les symptômes comme les tests de Wald ou de Neyman Pearson. L'idée serait alors d'anticiper les effets des fautes détectées et de vérifier l'apparition sur de ces effets sur le reste du système pour confirmer les défaillances et, si ces effets n'ont pas lieu, les infirmer comme c'est le cas dans les processus de diagnostic par « cohérence » (*consistency based diagnosis*) (Biteus *et al.*, 2008).

Un autre développement serait, à partir des modèles d'ingénierie des systèmes utilisés en phase de conception, d'extraire un modèle de fiabilité de fonctions, de services, de sous-systèmes voire du système à partir d'analyses d'experts sur la fiabilité de composants ou de retour d'expérience dont les modélisations et les traitements pourraient être inspirés des développements exposés dans la partie 3 de mon parcours recherche.

Ces travaux permettent, grâce aux indicateurs proposés, d'envisager les tâches de production et de maintenance en fonction de l'état de santé prévu du STMC autorisant ainsi une forme proactivité vis-à-vis de défaillances prévues. Un autre axe de développement consiste donc à définir un outil permettant de planifier conjointement la production et la maintenance en fonction de ces indicateurs. Ces travaux sont actuellement en cours et font l'objet des travaux de thèse de Ghita Bencheikh.

## 5 Planification conjointe de la production et de la maintenance basée sur l'évaluation de la santé des ressources techniques

Les développements exposés dans la partie 4 de mon parcours recherche permettent de fournir des indications sur l'état des systèmes techniques et leur aptitude à accomplir des futures tâches de production de biens ou de services. Les scénarios simulés et dont les résultats sont présentés dans [A4, A5] ont servi à illustrer quelques possibilités d'utilisation des indicateurs fournis afin de permettre une planification proactive vis-à-vis de l'état de santé des ressources techniques de la production mais aussi des opérations de maintenance. Ces quelques situations ne permettent cependant pas de définir une méthode de planification conjointe des activités de production et de maintenance en fonction de l'état de santé des ressources. C'est alors qu'Agnès Letouzey, qui a déjà travaillé sur des problématiques de planification, et moi avons fait une demande d'allocation de recherche du Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation afin de permettre dans le cadre d'une thèse d'effectuer des développements sur ce thème qui a été acceptée par l'Ecole Doctorale Systèmes. Depuis octobre 2016, Ghita Bencheikh effectue sa thèse sur le sujet : « Planification conjointe des activités de production et de maintenance en fonction de l'état de santé des ressources » qu'Agnès Letouzey codirige avec moi et pour laquelle je bénéficie d'une dérogation pour sa direction sans Habilitation à Diriger les Recherches accordée par l'Institut National Polytechnique de Toulouse. Dans ces travaux, nous visons la définition d'une méthode générique de planification/replanification conjointe des activités de production de biens ou de service et des activités de maintenance préventive conditionnelle en fonction de l'état de santé des ressources. Cette méthode doit évidemment satisfaire au mieux les intérêts de la production et de la maintenance. Elle doit aussi pouvoir être distribuée dans le cas où la maintenance et la production ne sont pas effectuées sur un seul site ou dans le cas de parties prenantes indépendantes (maintenance externalisée, PSS)

Le problème de l'ordonnancement est l'une des activités les plus importantes de l'industrie, ce qui explique la diversité des études portant sur les problèmes d'ordonnancement. Le problème de l'ordonnancement englobe, dans son abstraction, un grand nombre de cas particuliers. Par ailleurs, il peut exister plusieurs contraintes à respecter dans la planification afin que chaque cas particulier puisse faire l'objet d'une nouvelle étude par rapport à la littérature existante. C'est le cas de la présente étude.

Toutefois, les systèmes de production sont généralement confrontés à des situations conflictuelles entre les services de production et les services de maintenance, car leurs activités sont considérées comme une source de perturbation mutuelle, puisqu'elles sont exécutées sur les mêmes ressources, dans un cas, pour la production de biens ou de services et, dans l'autre cas, pour maintenir ou remettre ces mêmes ressources dans un état opérationnel satisfaisant. Pourtant, la planification de la production et la planification de la maintenance sont presque toujours traitées séparément alors que la planification conjointe de la production et de la maintenance peut très certainement contribuer à l'amélioration des performances des systèmes de production et accroître la satisfaction des clients (Sanmarti *et al.*, 1997 ; Coudert *et al.*, 2002 ; Chaouqui *et al.*, 2012). Cependant, les méthodes développées de planification conjointe de la production et de la maintenance considèrent toutes des politiques de maintenance préventive systématique alors que les préconisations tant du CBM que du PHM suggèrent de prévoir les interventions de maintenance des ressources techniques de production en fonction et leur état réel et de la capacité à réaliser les futures tâches de production. C'est cette prise en compte qui est développée dans ces travaux dont l'objectif est de proposer une méthode générique avec un modèle prenant en



compte l'état présent des ressources de production et leur capacité à réaliser les futures tâches de production.

Parmi les problèmes d'ordonnancement existants, nous considérons le problème de l'atelier de type *job shop*, qui est un problème NP difficile dont la résolution en une durée raisonnable est presque impossible avec des méthodes exactes (Kumar et Rajotia, 2006). Mais avant de traiter d'une méthode permettant d'obtenir une planification des opérations de production et de maintenance, une première phase a consisté à modéliser les données du problème, une deuxième phase a consisté en la détermination d'une méthode heuristique permettant de définir un ordonnancement des tâches. Cette méthode est basée sur un système multi-agent. Enfin une troisième phase, toujours en cours de développement, vise à déterminer des règles mises en œuvre par les agents en fonction d'indicateurs de performance à privilégier.

## 5.1 Modélisation des données à traiter

Cette modélisation des données porte sur plusieurs éléments : les tâches de production, les ressources de production, les tâches de maintenance et les ressources de maintenance.

### 5.1.1 Les tâches de production

L'ordonnancement des activités de fabrication dans les ateliers manufacturiers de type *job shop* sont parmi les problèmes d'ordonnancement les plus difficile à résoudre. Ceci est principalement dû à la grande variété des produits qu'ils peuvent réaliser. Beaucoup de ces ateliers réalisent des pièces élémentaires pour des réalisations d'assemblage. L'assemblage étant lui aussi planifié, toutes les pièces, dont la réalisation des séquences d'opérations conduisant à leur achèvement, doivent être terminées avant l'assemblage. En *job shop*, toutes ces pièces élémentaires réalisées, ne subissent pas les mêmes séquences d'opérations et dans le même ordre et toutes les opérations ne peuvent pas être réalisées par toutes les ressources techniques qui sont des machines-outils.

Chaque pièce ou groupe de pièces d'une même référence appelé « lot » fait l'objet d'un ordre de fabrication. Le but est de planifier ou plutôt d'ordonner les opérations de fabrication sur les machines-outils pour un ensemble d'ordres de fabrication  $OF = \{OF_1, OF_2, \dots, OF_n\}$ . Chaque ordre de fabrication  $OF_i$  est caractérisé par une séquence de phases de fabrication  $S_i = \{PF_{i,1}, PF_{i,2}, \dots, PF_{i,n_i}\}$  chaque opération de fabrication  $PF_{i,j}$  à une durée d'exécution  $d_{i,j}$  et une liste d'opérations (ou de procédé de transformation) à réaliser sur une machine  $OP_{i,j} = \{OP_{i,j,1}, OP_{i,j,2}, \dots, OP_{i,j,n_{ij}}\}$  sollicitant des services ou des fonctionnalités de la machine pouvant être aussi considérés comme une liste de services que la machine doit pouvoir effectuer pour cette phase de transformation de la pièce ou du lot de pièces.

En donnant la date de lancement  $R_i$  et la date de livraison (ou de mise à disposition au plus tard)  $L_i$  pour chaque  $OF_i$  la date de lancement  $r_{i,j}$  et la date de mise à disposition au plus tard  $l_{i,j}$  de chaque  $PF_{i,j}$  est déterminée par :

$$(42) \quad r_{i,j} = r_{i,j-1} + d_{i,j-1} \quad \forall j = 2, \dots, n_i$$

$$(43) \quad l_{i,j} = l_{i,j+1} - d_{i,j-1} \quad \forall j = n_{i-1}, \dots, 1$$

avec, pour  $j = 1$ ,  $r_{i,j} = R_i$  et, pour  $j = n_i$ ,  $l_{i,j} = L_i$  et  $l_{i,1} - d_{i,1} \geq R_i$  et  $r_{i,n_i} + d_{i,n_i} \leq L_i$

### 5.1.2 Les ressources techniques de production

Le système de production est composé d'un ensemble  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$  de  $m$  ressources techniques (machines). Chaque machine est capable d'assurer des opérations  $OP_k =$

$\{OP_{k,1}, OP_{k,2}, \dots, OP_{k,n_k}\}$  supportées par des services, fonctionnalités et composants de la machine. Pour qu'une machine  $M_k$  puisse être sélectionnée pour exécuter une  $PF_{i,j}$  elle doit pouvoir disposer de l'ensemble des opérations nécessaires c'est-à-dire que  $PF_{i,j} \subseteq OP_k$ . Cependant, il faut déterminer les chances que  $M_k$  ne puisse pas mener à bien la phase  $PF_{i,j}$ . En effet, ces composants peuvent être défaillants ou peuvent devenir défaillants lors de l'exécution des  $PF_{i,j}$  qui sollicitent les services et fonctionnalités auxquels ils contribuent à la mise en œuvre. Pour cela, les composants font l'objet de pronostics locaux comme indiqué dans le paragraphe 4.2.1. Puis les inférences et modélisations comme celles proposées dans les paragraphes 4.2.2 et 4.2.3 permettent de définir l'aptitude de la machine à accomplir l'opération  $PF_{i,j}$ .

Lorsque la machine  $M_k$  n'a pas l'aptitude nécessaire pour réaliser  $PF_{i,j}$ , des maintenances des composants identifiés par les traitements proposés dans le paragraphe 4.2.3.2 peuvent être décidées et  $PF_{i,j}$  être planifiée après les interventions de maintenance. Pour cela, il convient donc de considérer qu'une machine  $M_k$  est constituée d'un ensemble de composants  $C_k = \{C_{k,1}, C_{k,2}, \dots, C_{k,n_{c_k}}\}$ . La maintenance d'un composant  $C_{k,l}$  nécessite une durée d'intervention  $dC_{k,l}$  et des besoins  $BsC_{k,l} = \{BsC_{k,l,1}, BsC_{k,l,2}, \dots, BsC_{k,l,n_{c_{k,l}}}\}$ . Ces besoins peuvent être des compétences d'opérateurs, des outillages...

### 5.1.3 Les ressources de maintenance

Le système de maintenance est composé, pour nos premières considérations, d'un ensemble d'agents de maintenance  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_p\}$  où chaque agent  $A_q$  a une liste de ressources  $RSA_q = \{RSA_{q,1}, RSA_{q,2}, \dots, RSA_{q,n}\}$ . Ces ressources peuvent correspondre à des compétences, des outillages... Pour intervenir, un agent est doit vérifier que ses  $RSA_q \supseteq BsC_{k,l}$ .

Le but de la planification conjointe est de définir les affectations des  $PF_{i,j}$  de chaque  $OF_i \in OF$  sur les  $M_k \in M$  et si des maintenances sont nécessaires de définir les  $C_{k,l} \in M_k$  et d'y affecter les  $A_q \in A$ .

## 5.2 Heuristique de planification conjointe

Parmi les méthodes de planification conjointe de la production et de la maintenance trouvée dans la littérature, nous sommes intéressés aux approches multi-agents, En effet, les systèmes multi-agents ont démontré leur efficacité à résoudre des problèmes d'ordonnancement ayant plusieurs objectifs. Leur but est de résoudre des problèmes complexes, généralement en situation de conflit, en faisant coopérer plusieurs agents autonomes. Un agent peut être considéré comme une entité ayant des objectifs, des actions et des connaissances du domaine (Jennings et Wooldridge, 1995).

### 5.2.1 Le modèle SCEP

Dans ces approches multi-agents, nous nous sommes intéressés au modèle SCEP (Superviseur, Clients, Environnement, Producteurs) qui est une méthode multi-agent fonctionnant selon le principe d'un place de marché (Archimède et Coudert 2001 ; Coudert *et al.*, 2002, Archimède, 2007). Ce modèle conçu dans un souci de généricité s'avère très flexible et a été développé et testé pour de nombreuses stratégies de planification dans différents domaines d'application (Ishak *et al.*, 2008 ; Xu *et al.*, 2012 ; Memon, 2014). En effet, le principe de fonctionnement est le suivant : les agents Clients inscrivent leurs besoins sur un tableau noir (l'Environnement) ; les agents Producteurs sélectionnent les besoins auxquels ils peuvent répondre et formulent leurs offres en les déposant dans l'Environnement ; les agents Clients sélectionnent les offres qui leur conviennent le mieux ; les besoins qui leur correspondent sont effacés de l'Environnement. L'agent Superviseur gère les accès à l'Environnement des agents Clients et des

agents Producteurs et peut contraindre, sous certaines conditions, les agents Clients à accepter des offres notamment pour assurer la convergence de la méthode.

### 5.2.2 Proposition du modèle SCEMP

La proposition que nous sommes en train de développer dans le cadre de la thèse de Ghita Bencheikh est dérivée du modèle SCEP auquel des agents Mainteneurs sont ajoutés pour aboutir au modèle SCEMP (Superviseur, Clients, Environnement, Mainteneurs, Producteurs) présenté sur la Figure 49.

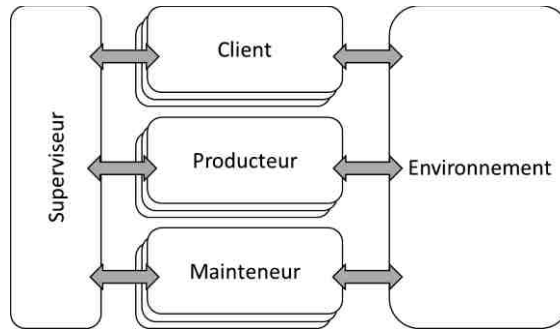


Figure 49. Modèle SCEMP

Dans le modèle SCEMP, comme dans le modèle SCEP, les agents disposent d'une grande autonomie dans l'élaboration de leurs décisions ce qui rend ces modèles hautement configurables. En effet, les agents au sein d'un même groupe ou d'une même classe (notamment Producteurs et Mainteneurs) bien qu'ayant un rôle similaire peuvent agir en fonction d'objectifs différents ceci peut être traduit par des mises de œuvre de différentes méthodes de planification de leurs activités de production ou de maintenance et dont la performance des ordonnancements est mesurée par des critères différents.

#### 5.2.2.1 Rôles des agents du modèle SCEMP

Les rôles des agents dans le modèle SCEMP sont les suivants :

- Les agents Clients gèrent chacun un  $OF_i$  composé d'une séquence  $S_i$  de phases de fabrication. Chaque agent Client vérifie qu'aucune phase de fabrication  $PF_{i,j}$  ne commence avant que la phase  $PF_{i,j-1}$  ne soit terminée et contrôle les dates de mise à disposition au plus tard  $l_{i,j}$ .
- Les agents Producteurs gèrent chacun une machine  $M_k$ . Chaque agent Producteur sélectionne les  $PF_{i,j}$  pour lesquelles il peut effectuer toutes les opérations. On note qu'il n'y a pas de  $PF_{i,j}$  ne pouvant pas être assuré par une machine. Comme chaque agent Producteur a des objectifs propres (minimisation du retard total des  $PF_{i,j}$ , minimisation des coûts...), il met en œuvre la méthode d'ordonnancement des  $PF_{i,j}$  qu'il lui convient (FIFO, SPT, LPT...). Chaque agent producteur évalue sa capacité à effectuer les  $PF_{i,j}$  qu'il a sélectionnées et effectue les demandes de maintenance sur les composants  $C_{k,l}$  qu'il juge nécessaires.
- Les agents Mainteneurs gèrent chacun un agent de maintenance  $A_q$ . Chaque agent Mainteneur sélectionne les  $C_{k,l}$  pour lesquels il dispose de toutes les ressources  $RsA_{q,r}$  nécessaires. Comme chaque agent Mainteneur a des objectifs propres (minimisation des déplacements, minimisation des coûts...), il met en œuvre la méthode d'ordonnancement qui lui convient.
- L'agent Superviseur gère les accès à l'Environnement des autres agents.

### 5.2.2.2 Séquencement des activités entre les agents

La planification des phases de fabrication  $PF_{i,j}$  sur les machines  $M_k$  et des interventions des agents de maintenance  $A_q$  sur les composants  $C_{k,l}$  par une succession de cycles sollicitant les activités des différents agents.

A chaque début de cycle, l'agent Superviseur invite les agents Client à inscrire leurs  $PF_{i,j}$  avec leurs dates  $r_{i,j}$  et  $l_{i,j}$  sur l'Environnement. Puis, l'agent Superviseur donne aux agents Producteur l'accès à l'Environnement de sorte que chacun d'eux sélectionne les  $PF_{i,j}$  qu'il peut réaliser en termes d'opérations.

Puis chaque agent Producteur effectue un ordonnancement des  $PF_{i,j}$  qu'il a sélectionné en fonction de ces propres règles et de sa capacité à les réaliser. Ces règles peuvent varier en fonction des caractéristiques de l'agent Producteur, dont des caractéristiques de la ressource, et de ses critères d'optimisation pour répondre à ses objectifs. Avant de finaliser toute position de  $PF_{i,j}$ , l'agent Producteur certifie que l'état de sa ressource (sa machine) lui permettant de l'exécuter entièrement. En fonction de l'ordonnancement qu'il a établi, l'agent Producteur définit deux positions (une position comprend une date de début et une date de fin) pour une  $PF_{i,j}$  la position effective, notée PE, et la position potentielle, notée PP. La PE est le placement de la  $PF_{i,j}$  lorsque l'agent producteur a placé toutes les phases de fabrication du cycle pour lesquelles il certifie l'exécution. La PP est la position la phase  $PF_{i,j}$  si elle est la seule phase assurée par l'agent Producteur sélectionnée par les agents Clients pour le cycle. PP correspond à la meilleure position que peut offrir un agent producteur pour une phase et PE à la pire. Si l'agent Producteur constate qu'il ne peut pas exécuter entièrement une phase qu'il a sélectionnée par l'exécution de sa fonction d'évaluation de sa santé, il dépose sur l'environnement des demandes de maintenance pour les composants  $C_{k,l}$  qu'il juge nécessaires. Il poursuit cependant l'ordonnancement des phases qu'il a sélectionnées ne sollicitant pas les opérations qu'il ne peut plus assurer. S'il arrive que l'agent Producteur ne puisse plus planifier de phase à cause au moins d'un composant qui doit être maintenu alors son processus d'ordonnancement est interrompu jusqu'à ce qu'il obtienne un retour des agents Mainteneurs.

Lorsque l'agent Superviseur reçoit l'information que tous les processus d'ordonnancement des agents Producteurs sont arrêtés (toutes les phases sont placées ou certaines requièrent des maintenances), il donne aux agents Mainteneurs accès à l'Environnement afin qu'ils planifient leurs interventions et proposent aussi pour leurs interventions une PE et une PP. Puis chaque agent Producteur ayant déposé des demandes de maintenance accepte les meilleures propositions faites par les agents Mainteneurs.

Les agents Producteurs reprennent ensuite l'ordonnancement des phases qu'ils n'avaient pas pu placées en raison de leur état qui, sans maintenance, n'auraient pas pu être menées à bien. Lorsque, ces ordonnancements sont terminés, les agents Producteurs sont invités à par l'agent Superviseur à déposer leurs propositions sur l'Environnement.

L'agent Superviseur demande aux agents Clients de sélectionner les offres de positions de leurs phases qui leur conviennent. Cependant, une proposition de phase par un agent Producteur pour laquelle PP est identique à PE est forcément sélectionnée par l'agent Client. Si l'agent Client en a plusieurs dans ce cas pour la même phase il peut choisir l'offre de l'agent Producteur qui lui convient le plus. Une phase est ainsi planifiée sur une machine lorsqu'elle a été validée par l'agent Client et ceci assure qu'elle ne sera faite que sur une seule machine.

A la fin de chaque cycle, les agents Clients remettent à jour leurs  $PF_{i,j}$  et leurs dates  $r_{i,j}$  et  $l_{i,j}$  pour celles qui n'ont pas fait l'objet de validation d'offre en fonction de celles qui ont été validées pour les

resoumettre au prochain cycle. Nous notons ici qu'il est possible d'introduire de nouvelles phases de fabrication. Si aucune phase n'a été validée sur une machine, il est inutile d'y effectuer les maintenances. Une offre de maintenance est donc finalement acceptée si au moins une phase est réalisée sur la machine. Une description de ce cycle est présentée par le diagramme de séquence de la Figure 50 issue de [C16] où TF représente les phases de fabrication et TM les demandes et propositions d'intervention de maintenance sur les composants des machines.

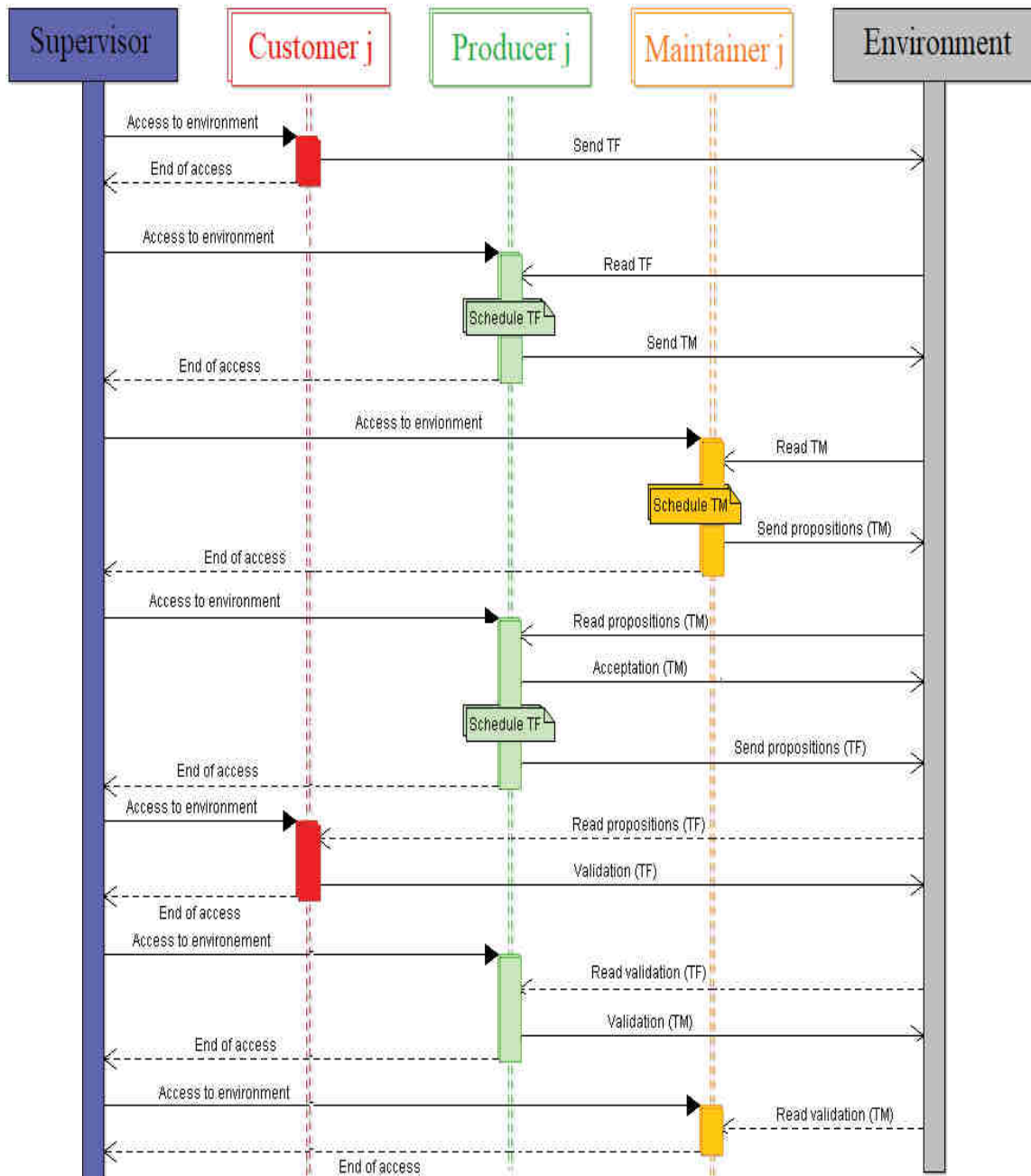


Figure 50. Diagramme de séquence d'un cycle de coopération des agents du modèle SCEMP [C16]

La convergence de cette méthode a été démontrée dans les communications [C15, C16]. Des résultats obtenus pour des cas simples y ont également été présentés.

### 5.3 Suite des travaux

D'autres développements restent à effectuer dans le cadre de ces travaux sur la planification conjointe de la production et de la maintenance en fonction des pronostics des composants des ressources de production.

L'un des premiers développements consiste à montrer le gain de l'approche proposée par rapport à la mise en œuvre d'une politique de maintenance préventive systématique. Pour cela, il est nécessaire d'effectuer des séries de simulations à partir de ressources fictives constituées de différents composants organisés en fonctions et/ou redondances assurant les opérations. Pour cela, nous pensons déterminer les RUL des composants de façon pseudo-aléatoire selon, par exemple des lois normales, et comparer le nombre d'interventions pour leur maintenance par rapport à leur maintenance à intervalle d'utilisation régulier déterminé à partir des mêmes lois normales et pour une probabilité de défaillance prédéfinie.

La stratégie actuellement retenue pour la validation par les agents Producteurs des interventions de maintenance, si elle permet la convergence, n'est peut-être pas la plus appropriée. D'autres façons de les valider sont testées, contraignant un peu moins les agents Producteurs dans la validation des interventions de maintenance.

La généralité de la méthode étant recherchée, les autres développements portent sur les règles et critères de planification des agents Producteurs et Mainteneurs qui doivent être considérées pour différentes situations. Parmi les situations que nous avons identifiées, il y a :

- le cas de maintenance externalisée faisant l'objet de contrat de type PSS (Silva Teixeira *et al.*, 2012), dans laquelle l'agent Mainteneur peut chercher à regrouper les interventions de maintenance se trouvant sur un même site et, également, à minimiser ces trajets ;
- le cas où les agents Producteurs cherchent à réduire le nombre de périodes d'immobilisation pour maintenance. Dans ce cas, il faut grouper, lors d'un arrêt, les interventions de maintenance sur les composants dont les pronostics indiquent qu'ils ne pourront pas réaliser les tâches sélectionnées mais aussi ceux dont les pronostics indiquent qu'ils ne pourront bientôt plus assurer les futures tâches de production notamment pour éviter des situations identifiées dans les scénarios présentés dans [A5] où une intervention de maintenance succède à une tâche de production de façon quasi systématique ;
- le cas de ressources de production, notamment lorsqu'il s'agit de systèmes de transport, pour lesquels il peut être intéressant de planifier une tâche ou une séquence tâches de transport leur permettant de rejoindre un centre de maintenance au juste moment.
- ...

Les évaluations sont basées sur des exemples issus de simulations de cas non-réels (très peu de systèmes réels mettent en œuvre des fonctions de pronostic sur un nombre conséquent de composants). Il est donc difficile d'utiliser des critères de coût pour évaluer les performances de nos propositions. Toutefois d'autres critères comme, le retard moyen de tâches de production, des durées d'immobilisation en attente des maintenances, ou des taux d'engagement des agents Producteurs et Mainteneurs peuvent être utilisés à des fins de comparaison.

Ces développements font l'objet de l'écriture d'un article devant être soumis au comité de lecture d'une revue internationale.

## Conclusion

Mon parcours recherche a fait l'objet des paragraphes précédents dans lesquels mes travaux y ont été exposés en cinq parties où les contributions à la réactivité et la proactivité des systèmes et des organisations sont organisées en une approche ascendante.

La première partie a retracé mes travaux de thèse portant sur la surveillance en fabrication mécanique où j'ai présenté l'intérêt de la surveillance des machines-outils supportant les processus de transformation des pièces ainsi que les apports d'une mise en œuvre de cette surveillance répondant au concept de capteur intelligent. Ces travaux ont permis de proposer une méthode pour la mise en œuvre de surveillances basées sur le concept de capteur intelligent consistant en l'identification des grandeurs pertinentes pour la surveillance mais aussi le diagnostic et la recherche de méthodes pour obtenir ces grandeurs, pour détecter les défauts mais aussi pour valider ces grandeurs en considérant les contraintes et opportunités relatives à l'exploitation du système : la machine-outil. Enfin une architecture fonctionnelle pour ce type de surveillance a été proposée.

La deuxième partie a été dédiée à mes contributions sur des travaux traitant de la conduite et la surveillance distribuées des machines-outils et de l'usinage par la mise en œuvre de capteurs et actionneurs intelligents. Ces travaux ont été basés sur l'exploitation des capacités de traitement au plus proche des procédés offertes par les instruments intelligents pour la distribution, si ce n'est de l'intelligence, au moins des traitements. Le projet CAID a montré qu'en aménageant des degrés de liberté et en les gérant par une approche multi-agent au niveau des capteurs la réactivité quant à la conduite d'un procédé d'usinage est améliorée. Puis, dans le cadre du réseau d'excellence I\*PROMS, nous avons développé une architecture multi-agent, mettant en œuvre les fonctionnalités des capteurs et actionneurs intelligents, de conduite et de surveillance de procédés d'usinage et des machines-outils. Cette architecture a montré qu'en surveillant la machine et le procédé et en gérant, au niveau des capteurs et actionneurs, certains degrés de liberté, que la productivité était accrue tout en garantissant la qualité grâce à la réactivité apportée par un nouveau niveau décisionnel mis en œuvre par une coopération entre capteurs et actionneurs. Nous avons également proposé un cadre de conception pour les architectures fonctionnelles et matérielles permettant d'adapter la structure multi-agent développée à une grande variété de machines-outils et procédés d'usinage.

La troisième partie a porté sur une autre forme de réactivité, celle des organisations sociotechniques, qui peut être apportée par la mise en œuvre de système de retour d'expérience. Ces travaux ont été développés dans la thèse de Cédric Béler effectuée dans le cadre du projet SUP. Au cours de ces travaux, il s'est avéré nécessaire de considérer les aspects imparfaits d'informations décrivant des situations ou contextes capitalisées par des opérateurs humains ainsi que les analyses effectuées par des experts. Ces travaux ont mené à des développements sur l'ensemble du processus de retour d'expérience. Pour le processus de capitalisation, une modélisation de l'expérience a été définie associant descriptions de situation et analyses d'experts selon un formalisme hybridant la modélisation orientée objet et les structures de croyance issues de la théorie des fonctions de croyances. Pour le processus d'exploitation, un fonctionnement basé sur le raisonnement à partir de cas a été adopté faisant appel à une recherche d'expériences contenu dans la base par une recherche par similarité à une situation courante. Pour cela des mesures de similarité ont été définies pour une modélisation d'expériences effectuée selon le formalisme hybride défini. Une forme d'explicitation de la connaissance contenue dans la base de retours d'expérience a été proposée sous la forme d'un indicateur de risque relatif à des activités en montagne correspondant au cadre du projet SUP.

La quatrième partie a traité de l'évaluation de la santé des systèmes techniques. Les développements réalisés ont consisté, dans une première phase conduite dans le cadre du projet Archistic et de la thèse de Mickaël Diévert, en la définition d'une architecture pour le diagnostic et le pronostic de systèmes techniques, en une modélisation des Systèmes Techniques Multi-Composants (STMC) et une formalisation des fonctions de diagnostic et de pronostic. L'activité de pronostic permet d'introduire une forme de proactivité vis-à-vis des occurrences prévues de défaillances permettant de planifier des interventions de maintenance nécessaires avant la survenue de ces défaillances. Une deuxième phase a porté plus spécifiquement sur le développement de la fonction de pronostic des STMC par la prise en compte, dans un premier temps, des incertitudes aléatoires des informations fournies par les pronostics locaux des composants, puis, dans un second temps dans le cadre de la thèse d'Esteban Le Maitre Gonzalez, la prise en compte également des incertitudes épistémiques que peuvent contenir ces mêmes informations. Des « patterns » de modélisation des STMC ont été identifiés pour lesquels des inférences ont été définies afin d'évaluer, une fois modélisé, la capacité d'un STMC à accomplir de futures tâches de production et ainsi de produire des indicateurs d'aide à la décision pour la planification conjointe et proactive vis-à-vis de défaillances de la production et de la maintenance.

La cinquième partie a fait état de l'avancement des travaux en cours, dans le cadre de la thèse de Ghita Bencheikh, sur la définition de méthodes pour la planification conjointe des activités de production et de maintenance en fonction de l'état de santé des ressources production. Pour cela, une modélisation des données concernant les tâches de production à réaliser, les ressources techniques de production ainsi que les ressources de maintenance a été définie. Une méthode heuristique de planification inspirée du système multi-agent SCEP (Superviseur, Clients, Environnement, Producteurs) a également été développée assurant la convergence vers un ordonnancement des tâches de production et de maintenance. Les développements en cours portent sur la démonstration de l'intérêt de l'approche par rapport à une politique de maintenance préventive systématique, mais aussi, parce que nous visons une certaine genericité de la méthode, sur les règles de planification des agents en fonction de divers critères correspondant à différentes situations.

## Projet de recherche

Ce paragraphe est dédié à la présentation des activités de recherche que je souhaite conduire à court et moyen terme.

Ces activités sont évidemment pour partie en relation avec les perspectives évoquées dans les conclusions des parties exposant mon parcours recherche.

Les travaux menés dans le cadre de la conduite et surveillance distribuées des machines-outils et de l'usinage constituaient des développements énoncés en perspectives de mes travaux de thèse. Les travaux pouvant être menés dans le cadre des développements que nous avons réalisés sur ce thème consistent à intégrer dans l'architecture multi-agent proposée d'autres traitements à des fins de surveillance, de diagnostic, de pronostic et/ou d'accommodation à l'état de la machine et/ou du procédé qui peut être autre que l'usinage comme, par exemple un procédé de fabrication additive.

Dans le cadre des développements exposés dans la partie portant sur l'évaluation de la santé des systèmes techniques, de développements futurs porteront sur l'intégration des diagnostics à la modélisation proposée des systèmes multi-composants pour l'évaluation de leur aptitude à accomplir de futures tâches de production. En effet, une part d'incertitude inhérente aux perturbations sur les mesures et aux tests générant les symptômes comme les tests basés sur le maximum de vraisemblance (test de Wald). L'idée est alors d'anticiper les effets des fautes détectées et de vérifier l'apparition de ces effets



sur le reste du système pour confirmer les défaillances et, si ces effets n'ont pas lieu, les infirmer comme c'est le cas dans les processus de diagnostic par « cohérence » (*consistency based diagnosis*) (Biteus *et al.*, 2008).

Pour la planification conjointe de la production de la maintenance, les travaux de thèse Ghita Bencheikh ne peuvent pas couvrir l'ensemble des contextes. Des travaux porteront donc sur l'établissement de règles ayant trait à l'émission des besoins de maintenance par les agents Producteurs en fonction des besoins de production et de la santé de la ressource technique associée et à l'acceptation des propositions de maintenance et aux règles d'ordonnancement des activités de maintenance par les agents mainteneurs. Ces règles doivent permettre selon l'organisation du système industriel et de son domaine d'activité d'en favoriser les indicateurs de performance en conservant l'objectif d'une amélioration rendue possible par une planification conjointe des activités de production et de maintenance dont la maintenance prédictive. Ces trois exemples forment des perspectives de recherche dont le terme peut correspondre à l'horizon d'un travail de thèse.

Lors de mon parcours recherche, j'ai été amené à développer mais aussi utiliser des méthodes, outils et techniques relatifs :

- à la modélisation des systèmes techniques,
- à la modélisation des connaissances dont l'imperfection de l'information,
- à la surveillance, à la supervision et au pilotage,
- aux systèmes multi-agents,
- à la simulation.

En m'appuyant sur ces connaissances et compétences, le projet recherche, que je porterai, doit contribuer à deux domaines d'application que sont l'ingénierie des systèmes et « l'industrie 4.0 ».

L'ingénierie des systèmes est définie par l'INCOSE<sup>3</sup> (*International Council on Systems Engineering*) comme une approche interdisciplinaire et un moyen de réaliser des systèmes. Cette approche consiste en un processus interdisciplinaire dont le but est de formaliser la conception de systèmes complexes constitués par un ensemble organisé et interagissant de matériels, de logiciels mais aussi d'humains devant répondre à un besoin. D'autres objectifs y sont souvent associés comme l'acceptabilité des points de vue économique et environnemental de la solution dans toutes les phases de développement et de la vie du système pouvant ainsi inclure les contraintes relatives au PLM (*Product Lifecycle Management*).

### Contributions à l'ingénierie des systèmes

Mes contributions à l'ingénierie des systèmes porteront essentiellement sur la phase de conception des systèmes.

Des contributions viseront la réduction de la durée de la phase de développement de systèmes et une aide à l'évaluation des risques et des coûts de développement de systèmes. Il s'agira de développer approche analogue à celle mise en œuvre dans le retour d'expérience. En effet, l'aboutissement d'un projet de développement de systèmes peut être assimilé à une forme d'expérience. Les systèmes sont conçus de sorte à répondre à un besoin. Ce besoin est décliné en termes de services, performances, contraintes, ... regroupés sous le vocable « exigences ». Ces exigences constituent le contexte. L'idée est donc que suite à une étape de recueil des exigences satisfaisant le juste besoin, des éléments de conception capitalisés (modèles d'architectures fonctionnelles ou physiques, dessins de définition

---

<sup>3</sup> <http://www.incose.org>

métiers, éléments de code informatique) puissent être extraits d'une base par la similarité des exigences auxquels ils répondent avec les exigences relatives au nouveau besoin. Les éléments de conception extraits par similarité d'exigences peuvent alors être classés en réutilisables, adaptables et, pour les exigences ne trouvant pas de correspondances ou des correspondances trop éloignées, en nouvelles conceptions. Cette dernière classe induit une part plus importante de risque relative au développement et un coût supplémentaire relatif au besoin de créativité dans la recherche de solutions ou encore de besoin de compromis ne satisfaisant pas pleinement le besoin. Dans ce contexte les travaux porteront sur la modélisation des exigences, la mesure de similarité entre exigences, l'analyse du risque relatif au développement du nouveau système. Pour cela il sera nécessaire d'assurer la persistance des associations entre modèles de conception et les exigences qu'ils satisfont et de considérer les différents niveaux d'abstraction en jeu conduisant au développement d'un système.

D'autres contributions envisagées sont relatives à l'évaluation des architectures, ces évaluations ont pour objectifs de vérifier les choix de conception tant que ceux-ci n'entraînent pas de réalisation matérielle. En effet, plus les nécessités de modification des conceptions sont découvertes à des stades tardifs du cycle de développement, plus elles coûtent chères et plus elles sont longues à effectuer (Solhenius, 1992 ; Angeniol, 2006).

Parmi ces contributions, une est énoncée dans la conclusion sur la quatrième partie de mon parcours recherche. Elle consiste à extrapoler la méthode qui y est proposée afin d'évaluer la fiabilité de fonctions, de services, de sous-systèmes voire du système à partir d'analyses d'experts ou de retours d'expérience sur la fiabilité de composants ou d'éléments de structures. Ces analyses ou retours d'expérience viennent remplacer les pronostics locaux. Les traitements peuvent alors nécessiter l'introduction de conflits entre les sources induisant des modifications dans les inférences proposées et les indicateurs à fournir. L'aide peut, comme dans le cadre du pronostic, permettre d'identifier les entités ne satisfaisant pas les critères de fiabilité et devant être repensées.

Dans un cadre plus large, des contributions porteront sur la simulation afin de vérifier et/ou valider les architectures fonctionnelles (ou logiques) et les architectures physiques (ou organiques) candidates de façon précoce. La vérification des architectures fonctionnelles et physiques par simulation fait intervenir des dynamiques de composants et de phénomènes physiques très variables en termes, par exemple, de constantes de temps. Les flux échangés entre éléments physiques et/ou fonctionnelles peuvent être continus, échantillonnés, à fréquences différentes et/ou événementiels. L'idée est alors de recourir à des simulations assurées par une architecture d'objets distribués chargés des simulations de la physique de composants, de l'environnement du futur système, des différentes fonctions, du scénario... Pour un système donné, une partie de ces architectures d'objets pourraient constituer des éléments de base du jumeau numérique du système réalisé. Ce jumeau fait partie des cibles dans le domaine de « l'industrie 4.0 ». Il permet notamment de tester des actions face à certaines situations sans risquer des dommages sur le système réel ou son environnement.

Un point complémentaire consiste à proposer des modélisations de conception permettant de générer automatiquement les objets simulables. Ceci permettra de ne pas à avoir à changer de « langage » à des fins de vérification et de limiter ainsi les risques dus à la perte ou la modification d'information.

A l'international, les développements dans l'ingénierie des systèmes sont supportés et/ou valorisés par l'INCOSE. En France, l'AFIS<sup>4</sup> (Association Française d'Ingénierie Système) qui est affiliée à l'INCOSE, est organisée en chapitres régionaux. Les développements proposés dans le cadre de l'analyse de fiabilité font partie des préoccupations du chapitre Nord-Est mais aussi du groupe de travail

---

<sup>4</sup> [www.afis.fr](http://www.afis.fr)

S<sup>3</sup> (Sûreté, Surveillance, Supervision) du GdR MACS (Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes Dynamiques) tandis que des aspects liés à la capitalisation des conceptions font plus partie des préoccupations du chapitre Occitanie de l'AFIS. Enfin les développements relatifs aux simulations s'inscrivent dans le cadre des travaux du groupe de travail MOME (Méthodes et Outils pour la Modélisation et l'Évaluation) du GdR MACS.

### Contributions à "l'industrie 4.0"

« L'industrie 4.0 », le « 4.0 » étant associé à la quatrième révolution industrielle, est caractérisée par la mise en œuvre des opportunités offertes par la convergence des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) comme l'Internet des objets (*Internet of Things* – IoT), le *cloud computing*, les architectures orientées services (*Service-Oriented Architectures* - SOA) et des technologies de production, dont certaines sont nouvelles comme l'impression 3D. Cette convergence doit contribuer, entre autres objectifs, à répondre aux demandes personnalisées des clients avec une grande réactivité des sites de production pour un impact sur l'environnement respectant les contraintes de développement durable. Dans cette architecture, l'ensemble des acteurs (clients, producteurs, fournisseurs, prestataires de services...) est intégré au processus impliquant la collaboration d'un grand nombre d'objets intelligents interconnectés pour la laquelle la notion de système cyber-physique est prépondérante. Dans le pôle de compétitivité mondial Aerospace Valley<sup>5</sup>, le domaine d'activités stratégiques USER supporte des développements sur les moyens de production et de maintenance notamment par l'intégration de moyens intelligents et modulaires mais aussi sur les capacités d'anticipation (la proactivité) du système industriel.

Dans le domaine « l'industrie 4.0 », mon projet de recherche portera sur deux points principaux.

Un premier point visera le développement d'architectures fonctionnelles des ressources techniques de production voire de services leur permettant d'être réactives face aux aléas des procédés de transformation, donc associés à de la valeur ajoutée, qu'elles mettent en œuvre ; mais aussi face à leur propre état de santé (diagnostic et pronostic). Pour cela, il conviendra d'identifier les aléas des procédés et les défauts et dégradations pouvant affecter les machines ainsi que de prévoir leurs évolutions. Puis, il faudra déterminer les degrés de libertés et définir leur gestion au niveau des machines afin qu'elles puissent au moins achever la tâche de production en cours dans des conditions acceptables des points de vue économique et environnemental. Il s'agira également de qualifier les aléas pour les transmettre, à la maintenance afin que celle-ci puisse organiser la juste logistique nécessaire à l'intervention devant remettre la machine dans un état conforme et pour une reprise des opérations de production dans des conditions attendues dans des délais maîtrisés. Ces architectures peuvent faire appel à une structuration multi-niveau, de type système cyber-physique, d'objets intelligents connectés comme des capteurs, des actionneurs, des machines et ensemble de machines (comme des cellules de production) mais aussi de services à l'instar des *frameworks* SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). Dans de telles architectures les objets peuvent être chargés d'appliquer au mieux les consignes et de remonter leurs informations (mesures, états de santé, consommations énergétiques, informations de suivi de production...) pouvant aussi être stockées dans des *clouds*. Ces informations peuvent faire l'objet de traitements par des services pour améliorer les performances de fonctionnalités comme, par exemple, le diagnostic et le pronostic. Dans ce contexte, ces traitements pourraient être réalisés au moyen de techniques de *data mining* ou d'intelligence artificielle. Ces travaux s'inscrivent pleinement dans les actions des groupes de travail S<sup>3</sup> mais aussi H2M (Health Management and Maintenance) du GdR

---

<sup>5</sup> [www.aerospace-valley.com](http://www.aerospace-valley.com)

MACS ou encore de la PHM Society<sup>6</sup> à une échelle internationale pour les points de ces développements contribuant plus particulièrement au PHM.

Un second point concernera le développement de méthodes réactives de (re)planification des activités de production et de support à la production (maintenance, logistique,...) permettant de tenir compte de l'état ou de l'aptitude des ressources techniques à accomplir les activités à planifier pour des organisations très différentes comme des entreprises très intégrées disposant en propre de l'ensemble de ces ressources sur un même site ou pour un écosystème d'entreprises réparties dans lequel les unes coréaliment les produits et d'autres assurent les services de maintenance et de logistiques. Pour être réalisées, les activités ont besoin de fonctionnalités ou services assurés par les ressources. Les ressources techniques réalisent les fonctionnalités ou services avec des performances différentes et dépendantes de l'état des composants qui les implémentent. Pour cela, il est besoin de modéliser les activités et les ressources. Les méthodes de planification internes des activités (par exemple, internes aux agents dans le modèle SCEMP présenté dans la cinquième partie de mon parcours de recherche) doivent être adaptées à l'organisation tout comme les critères de performance permettant de sélectionner un planning d'activités plutôt qu'un autre, ou d'accepter une mission de production, de transport ou de maintenance. D'autres développements pourront être effectués pour des domaines d'applications différents en fonction des perspectives ouvertes par les travaux menés et les connaissances et compétences qui en découleront.

---

<sup>6</sup> [www.phmsociety.org](http://www.phmsociety.org)

## Bibliographie

- Aamodt A., E. Plaza : "Case-based reasoning : foundational issues, methodological variations, and system approaches." *AI Communications*, vol. 7, pp. 39-59, 1994.
- Altintas Y. : "Prediction of cutting forces and tool breakage in milling from feed drive current measurements". *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, vol. 114, pp. 387-392, 1992.
- Altintas Y., N. Newell, M. Ito : "Modular CNC design for intelligent machining, part 1: design of a hierarchical motion control module for CNC machine tools". *Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 118, pp. 506-513, 1996.
- Altintas Y., W.K. Munasinghe : "Modular CNC design for intelligent machining, part 2: modular integration of sensor based milling process monitoring and control tasks". *Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 118, pp. 514-521, 1996.
- Angeniol S. : "Maîtrise et intégration des coûts dans les projets de conception aéronautiques". Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, 2006.
- Archimède B., T. Coudert : "Reactive scheduling using a multiagent model: the SCEP framework". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 14, pp. 667-683, 2001.
- Archimède B. : "Méthodes et outils de simulations pour l'aide à la décision distribuée". Mémoire d'habilitation à Diriger des Recherches, Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.
- Arnaiz A., S. Ferreiro, M. Buderath : "New decision support system based on operational risk assessment to improve aircraft operability". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, vol. 224, pp.137-147, 2010.
- Asté J.P. : "Géomatique et gestion des risques urbains : vers des progrès attendus". Dans "Gestion spatiale des risques" sous la direction de G. Brugnot, Ed. Hermes Lavoisier, pp. 249-283, 2001
- Barbier F., P. Jaulent : "Techniques orientées objet et C.I.M ". Ed. Eyrolles, 1992.
- Bauer M. : "Algorithms and decision making in the Dempster-Shafer theory of evidence – an empirical study". *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 17, pp. 217-237, 1997.
- Bergmann R. : "Experience Management". Ed. Springer-Verlag, 2002.
- Biteus J., M. Nyberg, E. Frisk : "An algorithm for computing the diagnoses with minimal cardinality in a distributed system". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 21, pp. 269–276, 2008.
- Blahá M., J. Rumbaugh : "Object oriented modeling and design with UML, 2<sup>nd</sup> edition". Ed. Prentice-Hall, 2005.
- Bouazdi S. : "Systèmes de contrôle-commande et de supervision". Service Commandes Electroniques Industrielles, CETIM, 1990.
- Bourouni K. : "Availability assessment of a reverse osmosis plant: comparison between reliability block diagram and fault tree analysis methods". *Desalination*, vol. 313, pp. 66–76, 2013.
- Brachman R.J., J.G. Schmolze : "An overview of the KL-ONE knowledge representation system". *Cognitive Science*, vol. 9, pp. 171-216, 1985.
- Carrillo F.J., F. Rotella : "A robust adaptive controller for constant turning force regulation". *Control Engineering Practice*, vol. 5, pp. 1673–1682, 1997.
- Certa A., F. Hopps, R. Inghilleri, C.M. La Fata : "A Dempster-Shafer theory-based approach to the failure mode, effects and criticality analysis (fmeca) under epistemic uncertainty: application to the propulsion system of a fishing vessel". *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 159, pp. 69-79, 2017.

- Chaouqi M., J. Benhra, A. Zakari : "Agile approach for joint scheduling of production and maintenance in flow shop". *International Journal of Computer Applications*, vol. 59, pp. 29-36, 2012.
- Charbonnaud P., F.J. Carrillo, S. Medar : "Robust control reconfiguration of a thermal process with multiple operating modes". *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 11, pp. 529-538, 2003.
- Chittaro L., G. Guida, C. Tasso et E. Toppano : "Functional and teleological knowledge in the multimodeling approach for reasoning about physical systems: a case study in diagnosis". *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 23, pp. 1718-1751, 1993.
- CIAME : "Livre blanc : les capteurs intelligents - réflexions des utilisateurs". Ed. CIAME-AFCET, 1987.
- Coirault P. : "Moments temporels partiels et détection de défaut des systèmes à temps continu. Application à la maintenance prédictive d'une machine à courant continu". Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 1992.
- Coirault P., J.D. Gabano, J.C. Trigeassou : "Maintenance prédictive d'un entraînement électrique par identification paramétrique". *Revue Européenne Diagnostic et Sûreté de Fonctionnement*, vol. 3, pp. 69-95, 1993.
- Coudert T., B. Grabot, B. Archimède : "Production/maintenance co-operative scheduling using multi-agents and fuzzy logic". *International Journal of Production Research*, vol. 40, pp. 4611-4632, 2002.
- Cranefield S., M. Purvis : "UML as an ontology modeling language". *The IJCAI-99 Workshop on Intelligent Information Integration*, Stockholm, Suède, 1999
- Dan L., J. Mathew : "Tool wear and failure monitoring techniques for turning - A review". *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, vol. 30, pp. 579-598, 1990.
- Dekker L. : "FROME : Représentation multiple et classification d'objets avec points de vue". Thèse de doctorat, Université de Lille 1 Sciences et Technologies, 1994.
- Denoeux T., A. Ben Yaghlane : "Approximating the combination of belief functions using the fast Möbius transform in a coarsened frame". *International Journal of Approximate Reasoning*, vol.31, pp. 77-101, 2002.
- Dubois D., H. Prade : "Théorie des possibilités". 2nde édition, Ed. Masson, 1988.
- Dubois D., H. Prade, P. Smets : "A definition of subjective possibility". *Operations Research and Decisions*, vol. 4, pp. 7-22, 2003.
- Fériani M. : "Surveillance en temps réel du processus de fraisage. Réalisation d'un moniteur de suivi de l'usure des outils". Thèse de doctorat, Faculté des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté, 1993.
- Ferreiro S., A. Arnaiz, B. Sierra, I. Irigoien : "Application of Bayesian networks in prognostics for a new Integrated Vehicle Health Management concept". *Expert Systems with Applications*, vol. 39, pp. 6402-6418, 2012.
- Flambard C. : "Surveillance des machines et des structures mécaniques. Une boîte noire intelligente.". *CETIM Informations*, n°111, pp. 35-46, 1989.
- Flyn D., S. McLoone, G.W. Irwin, E. Swidenbank, B.W. Hogg : "Neural modelling and control of a synchronous generator". *Proceedings of the 4th IFAC Workshop on Algorithms and Architectures for Real-Time Control, AARTC'97, Vilamoura, Portugal, 9-11 avril 1997*, pp.376-381.
- Frazier W.E. : "Metal additive manufacturing: a review". *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 23, pp. 1917-1927, 2014.
- Friedenthal S., A. Moore, R. Steiner : "A practical guide to SysML, the systems modeling language". Ed. Morgan Kaufmann OMG Press; 2009.

- Geneste L., F. Soler, A. Habbadi : "CAID : capteurs/actionneurs intelligents distribués". *Journal of Decision Systems*, vol. 8, pp. 257-279, 1999.
- Goupil P. : "AIRBUS state of the art and practices on FDI and FTC in flight control system ". *Control Engineering Practice*, vol. 19, pp. 524–539, 2011.
- Gouriveau R. : "Analyse des risques, formalisation des connaissances et structuration des données pour l'intégration des outils d'étude et de décision". Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.
- Grabot B., L. Geneste : "Management of imprecision and uncertainty for production activity control". *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 9, pp. 431-446, 1998.
- Harris C.G., J.H. Williams, A. Davies : "Condition monitoring of machine-tools". *International Journal of Production Research*, vol. 27, pp. 1445–1464, 1989.
- He W., N. Williard, M. Osterman, M. Pecht M : "Prognostics of lithium-ion batteries based on Dempster-Shafer theory and the Bayesian Monte Carlo method". *Journal of Power Sources*, vol. 196, pp. 10314-10321, 2011.
- Heng A., A.C.C. Tan, J. Mathew, N. Montgomery, D. Banjevic, A.K.S. Jardine : "Intelligent condition-based prediction of machinery reliability". *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, pp. 1600–1614, 2009.
- Hong-Feng W. : "Prognostics and Health Management for complex system based on fusion of model-based approach and data-driven approach". *Physics Procedia*, vol. 24, pp. 828–831, 2012.
- Hsu P.L., W.R. Fann : "Fuzzy adaptive control of machining processes with a self-learning algorithm". *Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 118, pp. 522-530, 1996.
- Huang S.N., K.K. Tan, Y.S. Wong, C.W. de Silva, H.L. Goh, W.W. Tan. "Tool wear detection and fault diagnosis based on cutting force monitoring". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, pp. 444-451, 2007.
- Isermann R. : "Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing". *IFAC Conference on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Baden-Baden, Allemagne*, pp. 43-55, 1991.
- Isermann R. : "Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing - Tutorial paper". *Automatica*, vol. 29, pp. 815-835, 1993.
- Isermann R. : "Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods-an introduction". *Control Engineering Practice*, vol. 5, pp. 639-652, 1997.
- Ishak K., B. Archimède, P. Charbonnaud : "SCEP-SOA: An applicative architecture to enhance interoperability in multi-site planning". *OTM Confederated International Conferences On the Move to Meaningful Internet Systems, Lecture Notes in Computer Science*, vol 5333, Ed. Springer, pp. 313-322, 2008,
- Iung B., M. Monnin, A. Voisin, P. Cochetoux, E. Levrat : "Degradation state model-based prognosis for proactively maintaining product performance". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57, pp. 49–52, 2008.
- Ivanov V.I., M.D. Brojboiu, S.S. Ivanov : "Experimental system for monitoring and diagnosis of a static power converter". *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 13, pp. 113-120, 2013.
- Jardine A.K.S., D. Lin, D. Banjevic : "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance". *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, pp. 1483-1510, 2006.

- Jin G., D.E. Matthews, Z. Zhou : "A Bayesian framework for on-line degradation assessment and residual life prediction of secondary batteries in spacecraft". *Reliability Engineering and Systems Safety*, vol. 113, pp. 7–20, 2013.
- Jee S., Y. Koren. "Adaptive fuzzy logic controller for feed drives of a CNC machine tool". *Mechatronics*, vol. 14, pp. 299–326, 2004.
- Jennings N.R., M. Wooldridge : "Applying agent technology". *Applied Artificial Intelligence*, vol. 9, pp. 357–369, 1995.
- Jousselme A.L., D. Grenier, E. Bosse : "A new distance between two bodies of evidence". *Information Fusion*, vol. 2, pp. 91-101, 2001.
- Kong D.D., Y.J. Chen, N. Li : "Force-based tool wear estimation for milling process using Gaussian mixture hidden Markov models". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, pp. 2853-2865, 2017.
- Koren Y., T.R. Ko, A.G. Ulsoy, K. Danai : "Flank wear estimation under varying cutting conditions". *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 113, pp.303-307, 1991.
- Koski T., J.M. Noble : "Bayesian Networks: an Introduction". Ed. John Wiley & Sons Inc., 2009.
- Kossiakoff A., W.N. Sweet, S. Seymour, S.M. Biemer: "Systems Engineering Principles and Practice". 2nd ed., Ed. John Wiley & Sons Inc., 2011.
- Kothamasu R., S.H. Huang, W.H. Verduin : "System health monitoring and prognostics – a review for current paradigms and practices". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 28, pp. 1012–1024, 2006.
- Kraus S. : "Negotiation and cooperation in multi-agent environments". *Artificial Intelligence*, vol. 94, pp. 79–97, 1997.
- Knublauch H. : "An agile development methodology for knowledge-based systems including a Java framework for knowledge modeling and appropriate tool support", *Dissertationsschrift (thèse de doctorat)*, University of Ulm, 2002.
- Kumar M., S. Rajotia : "Integration of process planning and scheduling in a job shop environment". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 28, pp. 109-116, 2006.
- Landau I.D. : "Identification et commande des systèmes – 2ème édition revue et augmentée". Ed. Hermès, 1993.
- Lewandowski J.J., M. Seifi : "Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties". *Annual Review of Materials Research*, vol. 46, pp. 151–86, 2016.
- Li N., DD. Kong, YJ. Chen : "Force-based tool condition monitoring for turning process using v-support vector regression". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 91, pp. 351-361, 2017.
- Liao L., K. Köttig : "Review of hybrid prognostics approaches for remaining useful life prediction of engineered systems, an application to battery life prediction". *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 63, pp. 191-207, 2014.
- Liu Y., T. Cheng, L. Zuo : "Adaptive control constraint of machining process". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 17, pp. 720–726, 2001.
- Martin P. : "Commande adaptative de machines-outils. Etude d'un système d'optimisation de l'opération de tournage avec mesure de l'usure de l'outil". *Thèse de doctorat ès-sciences*, Université de Nancy I. 1980.
- Medjaher K., D.A. Tobon-Mejia, N. Zerhouni : "Remaining useful life estimation of critical components with application to bearings". *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 61, pp. 292-302, 2012.



- Memon M.A. : "Transportation interoperable planning in the context of food supply chain". Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Ecole Doctorale Systèmes, spécialité : Systèmes Industriels, 2014.
- Miles R., K. Hamilton : "Learning UML2.0". Ed. O'Reilly, 2006.
- Minsky M. : "A framework for representing knowledge". Dans P. Winston : "The Psychology of Computer Vision". pp. 211-277, Ed. Mc Graw-Hill, 1975.
- Molina A., C.A. Rodriguez, H. Ahuett, J.A. Cortes, M. Ramirez, G. Jimenez, S. Martinez : "Next-generation manufacturing systems: key research issues in developing and integrating reconfigurable and intelligent machines". International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 18, pp. 525-536, 2005.
- Moore R.C. : "The role of logic in knowledge representation and common sense reasoning". National Conference on Artificial Intelligence, Pittsburgh, USA, 18-30 août, pp. 428-433, 1982.
- Morel J. : "Vibrations des machines et diagnostic de leur état mécanique". Ed. Eyrolles, 1992.
- Motro A., P. Smets : "Uncertainty management in information systems from needs to solutions". Ed. Kluwer Academic Publishers, 1997.
- Mulder P.C., J.A.J. Oosterling, A.C.H. Van Der Wolf : "A modal study of a feeddrive for a numerically controlled lathe". Annals of the CIRP, vol. 31, pp. 293-298, 1982.
- Muller A. : "Contribution à la maintenance prévisionnelle des systèmes de production par la formalisation d'un processus de pronostic". Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2005.
- Norgaard M., P.H. Sorensen, N.K. Poulsen, O. Ravn, L.K. Hansen : "Intelligent predictive control of non linear processes using neural networks". IEEE International Symposium on Intelligent Control, Dearborn, MI, 15-18 septembre 1996, pp. 301-306.
- Pan G., H. Xu, C.M. Kwan, C. Liang, L. Haynes, Z. Geng : "Modeling and intelligent chatter control strategies for a lathe machine". IEEE International Conference on Control Applications, Dearborn, MI, USA, 15-18 septembre 1996, pp. 235-240.
- Peuget R., S. Courtine, J.P. Rognon : "Fault detection and isolation on a PWM inverter by knowledge-based model". Annual meeting of the IEEE Industry Applications Society, New Orleans, USA, 05-09 octobre 1997.
- Pfeifer T., H. Thurm, B. Fussel : "Autonomous production cells and the integration of measurement systems, sensors and actuators". Proceedings of the 5th IMEKO symposium on dimensional metrology in production and quality control, ISMQC'95, Saragosse, Espagne, 25-27 octobre 1995.
- Pfeifer T., M. Ayoubi : "Application of a hybrid neuro-fuzzy system to the fault diagnosis of an automotive electromechanical actuator". Fuzzy Sets and Systems, n°89, pp. 351-360, 1997.
- Podsedkowski L. : "Une méthode de mesures des jeux mécaniques sur les articulations de robots". Journal Européen des Systèmes Automatisés, vol. 31, pp. 45-56, 1997.
- Prakash O., A.K. Samantaray, R. Bhattacharyya : "Model-based multi-component adaptive prognosis for hybrid dynamical systems". Control Engineering Practice, vol. 72, pp. 1-18, 2018.
- Provan G. : "An open systems architecture for prognostic inference during condition-based monitoring". IEEE Aerospace Conference, Big Sky USA, 8-15 mars 2003, vol. 7, pp. 3157-3164.
- Quillian M.R. : "Semantic Memory". PhD thesis, Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, PA, USA, 1966.
- Ragot J., D. Maquin, M. Darouach, G. Bloch : "Validation de données et diagnostic". Ed. Hermès, 1990.
- Rakoto H., J. Hermosillo Worley, M. Ruet : "Integration of experience based decision support in industrial processes". International Conference on Systems, Man and Cybernetics, IEEE SMC 02, In

- A. El Kamel, K. Mellouli, et P. Borne (Eds.), Bridging the Digital Divide, Cyber-development, Human Progress, Peace and Prosperity, Hammamet, Tunisie, 6-9 Octobre 2002.
- H. Rakoto : "Intégration du Retour d'Expérience dans les processus industriels - Application à Alstom Transport". Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- Ramasso E., T. Denoeux : "Making use of partial knowledge about hidden states in HMMs: an approach based on belief functions". IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 22, pp. 395-405, 2014.
- Ratava J., M. Lohtander, J. Varis : "Tool condition monitoring in interrupted cutting with acceleration sensors". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 47, pp. 70-75, 2017.
- Ravindra H.V., Y.G. Srinivasa, R. Krishnamurthy : "Modelling of tool wear based on cutting forces in turning". Wear, n°169, pp. 25-32, 1993.
- Reiter R. : "A theory of diagnosis from first principles". Dans "Readings in model-based diagnosis", pp. 29-48, Ed. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1992
- Remy L., A. Alam, N. Haddar, A. Köste, N. Marchal : "Growth of small cracks and prediction of lifetime in high-temperature alloys". Material Science Engineering, vol. 468-470, pp. 40-50, 2007.
- Richalet J. : "Pratique de l'identification". Ed. Hermès, 1991.
- Robert M., M. Marchandiaux, M. Porte : "Capteurs intelligents et méthodologie d'évaluation". Ed. Hermès, 1993.
- Rotella F., F.J. Carrillo : "Flatness approach for the numerical control of a turning process", Proceedings of ECC'99 European Control Conference, Karlsruhe, Allemagne, 31 août – 3 septembre 1999.
- Sankararaman S., Y. Ling, S. Mahadevan : " Uncertainty quantification and model validation of fatigue crack growth prediction". Engineering Fracture Mechanics, vol. 78, pp. 1487–1504, 2011.
- Sankararaman S., M.J. Daigle, K. Goebel : "Uncertainty quantification in remaining useful life prediction using first-order reliability methods". IEEE Transactions on Reliability, vol. 63, pp. 603-619, 2014.
- Sanmarti E., A. Espuña, L. Puigjaner : "Batch production and preventive maintenance scheduling under equipment failure uncertainty". Computers and Chemical Engineering, vol. 21, pp. 1157-1158, 1997.
- Scarf P. : "A Framework for condition monitoring and condition based maintenance". Quality Technology and Quantitative Management, vol. 4, pp. 301-312, 2007.
- Schofield S., P. Wright : "Open architecture controllers for machine tools. Part 1: Design principles". Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 120, pp. 417-424, 1998.
- Séguy S., T. Insperger, L. Arnaud, G. Desein, G. Peigné : "Suppression of period doubling chatter in high-speed milling by spindle speed variation". Machining Science and Technology, vol. 15, pp. 153–171, 2011.
- Shafer G. : "A mathematical theory of evidence". Ed. Princeton University Press, 1976.
- Sick B. : "On-line and indirect tool wear monitoring in turning with artificial neural networks: a review of more than a decade of research". Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 16, pp. 487–546, 2002.
- Silva Teixeira E.L., B. Tjahjono, S.C. Absi Alfaró : "A novel framework to link Prognostics and Health Management and Product–Service Systems using online simulation". Computers in Industry, vol. 63, pp. 669-679, 2012.
- Simon C., P. Weber, E. Levrat : "Bayesian networks and evidence theory to model complex systems reliability". Journal of Computers, vol. 2, pp. 33-43, 2007.
- Simon C., P. Weber, A. Evsukoff : "Bayesian networks inference algorithm to implement Dempster Shafer theory in reliability analysis". Reliability Engineering and System Safety, vol. 93, pp. 950-963, 2008.

- Smets P. : "Belief functions: the disjunctive rule of combination and the generalized Bayesian theorem". *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 9, pp. 1-35, 1993.
- Smets P., R. Kennes : "The transferable belief model". *Artificial Intelligence*, vol. 66, pp. 191-234, 1994.
- Soderstrom T., H. Fan, B. Carlsson, S. Bigi : "Least squares parameter estimation of continuous-time ARX models from discrete time data". *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 42, pp. 659-673, 1997.
- Solhenius G. : "Concurrent Engineering". *Annals of the CIRP*, vol. 41, pp. 645-655, 1992.
- Staroswiecki M., M. Bayart : "Actionneurs intelligents". Ed. Hermès, 1994.
- Stein J.L., D. Colvin, G. Clever, C.H. Wang : "Evaluation of DC servo machine-tool feed drives as force sensors". *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, vol. 108, pp. 279-288, 1986.
- Stein J.L., K.C. Shin : "Current monitoring of field controlled spindle drives". *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 108, pp. 289-295, 1986.
- Strangas E.G., S. Aviyente, J.D. Neely, S.S.H. Zaidi : "The effect of failure prognosis and mitigation on the reliability of permanent-magnet AC motor drives". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, pp. 3519-3528, 2013.
- Tarjan R.E. : "Depth-first search and linear graph algorithms". *SIAM Journal on Computing*, vol. 1, pp. 146-160, 1972.
- Tobon-Mejia D.A., K. Medjaher, N. Zerhouni, G. Tripot : "A data-driven failure prognostics method based on mixture of Gaussians hidden Markov models". *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 61, pp. 491-503, 2012.
- Trigeassou J.C. : "Contribution à l'extension de la méthode des moments en automatique. Application à l'identification des systèmes linéaires". Thèse de doctorat ès sciences physiques, Université de Poitiers, 1987.
- Vachtsevanos G., F.L. Lewis, M. Roemer, A. Hess, B. Wu : "Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering system". Ed. John Wiley & Sons Inc., 2006.
- Villeneuve E., C. Béler, F. Pérès, L. Geneste, E. Reubrez : "Decision-support methodology to assess risk in end-of-life management of complex systems". *IEEE Systems Journal*, vol. 11, pp. 1579-1588, 2017.
- Wang P. : "Rigid Flexibility, The Logic of Intelligence". Ed. Springer, 2006.
- Xu J., B. Archimède, A. Letouzey : "A distributed multi-agent framework for shared resources scheduling". *14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Information Control Problems in Manufacturing, IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, pp. 775-780, 2012.
- Yam R.C.M., P.W. Tse, L. Li, P. Tu : "Intelligent predictive decision support system for condition-based maintenance". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 17, pp. 383-391, 2001.
- Zadeh L.A. : "Fuzzy Sets as a basis for a theory of possibility". *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 1, pp. 3-28, 1978.
- Zadshakoyan M. : "Optimisation en conduite d'usinage et gestion d'usure d'outils par la commande adaptative". Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 1998.
- Zaidan M.A., R.F. Harrison, A.R. Mills, P.J. Fleming : "Bayesian hierarchical models for aerospace gas turbine engine prognostics". *Expert Systems with Applications*, vol. 42, pp. 539-553, 2015.
- Zhao F., Z. Tian, Y. Zeng : "Uncertainty quantification in gear remaining useful life prediction through an integrated prognostics method". *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 62, pp. 146-159, 2013.

Zwingelstein G. : "Diagnostic des défaillances théorie et pratiques pour les systèmes industriels". Ed. Hermès, 1995.

