

Formalisation du pronostic à base d'une approche processus

---

## Formalisation du pronostic à base d'une approche processus

**P. Cocheteux, A. Voisin, E. Levrat et B. Iung**

CRAN, UMR 7039 – Nancy-Université, CNRS

Faculté des Sciences et Techniques - BP239

54506 Vandœuvre-lès-Nancy (France)

{ *pierre.cocheteux, alexandre.voisin, eric.levrat, benoit.iung* }@cran.uhp-nancy.fr

---

*RÉSUMÉ. Cet article présente une modélisation, selon une approche processus issue de la norme ISO9000:2000, d'un des deux processus clés d'une stratégie de maintenance prévisionnelle, le processus de pronostic. L'intégration du processus de pronostic au sein d'un système intégré de maintenance prévisionnelle est présentée à travers la description de l'environnement du pronostic, son contexte, et d'une description des flux échangés entre les différents acteurs de cet environnement. Le processus de pronostic est ensuite décomposé en quatre sous processus génériques pour en proposer un modèle de référence particularisable à tous cas d'application de niveau composant ou de niveau fonctionnel.*

*ABSTRACT. The contribution developed in this paper aims at formalising the prognosis process which is one of the key processes of the predictive maintenance. The formalisation is based on the principles of the process approach as advocated in ISO9000:2000. Thus the integration of the prognosis process within the predictive maintenance is shown by means of the description of the prognosis context and of the flows exchanged between the actors interacting inside the context. Then the prognosis process is broken into four generic processes in order to lead to a prognosis reference model. This reference model can be particularised to all the applications dedicated at the component or functional levels.*

*MOTS-CLÉS: pronostic, maintenance prévisionnelle, approche processus.*

*KEYWORDS: prognosis, predictive maintenance, process approach*

---

## 1 Introduction

Dans l'industrie, la maintenance a été trop souvent perçue comme un centre de coût et non comme un levier, une force pouvant contribuer à la valeur ajoutée et au profit de l'entreprise. En effet la plupart des personnes pensent que le rôle de la maintenance est de réparer les biens lorsqu'ils sont en panne, alors que cette situation signifie logiquement que la maintenance a échoué.

De plus, cette vision trop restrictive de la maintenance tend aussi à évoluer dans une approche cycle de vie innovante du produit telle que préconisée actuellement par les orientations du développement durable. En effet, ce paradigme requiert de passer d'une production systématique de nouveaux produits ou systèmes, au maintien des fonctions et des services d'un bien et d'un produit le plus longtemps possible afin de retarder au maximum la création de nouveaux biens pour faire face, entre autres, à l'épuisement des matières premières. La finalité de la fonction maintenance doit donc être remise en cause pour se décliner sur l'ensemble du cycle de vie du produit ou système (Van Houten, et al., 1998) par le développement d'une chaîne de valeur de maintenance (Takata *et al.*, 2004) conférant à la maintenance un rôle primordial dans la contribution à l'éco-efficience (DeSimone *et al.*, 1997).

Cette évolution de la finalité maintenance a aussi un impact sur l'évolution des stratégies à mettre en œuvre. En effet, les stratégies classiques (Wang, 2002), telle que la maintenance préventive systématique, qui conduisent à des interventions trop précoces ou trop tardives relativement à l'état réel des défaillances, ne sont pas compatibles avec ce double besoin d'optimisation. Une stratégie prévisionnelle construite sur une anticipation de la dégradation semble plus adaptée pour éviter les situations de production non nominales qui pourraient avoir un impact négatif sur la qualité du produit (zero breakdown maintenance) et/ou les performances de productivité, de profit... Une telle stratégie de maintenance proactive est basée principalement sur des modules de surveillance, diagnostic, pronostic et d'aide à la décision.

Le développement, à l'échelle industrielle, de cette stratégie proactive manque encore cruellement de concepts, de méthodes, d'outils... « We simply do not know how to measure the performance degradation of components and machines, we lack the validated predictive models and tools that tell us what would happen when the process parameters decrease from values » (Lee, 1998). Ce constat scientifique est d'autant plus vrai pour le processus de pronostic considéré comme le processus clé par sa notion d'anticipation (Wang *et al.*, 1999), et identifié à cause de sa relative jeunesse, comme le moins avancé en terme de formalisation et d'intégration. Formaliser le processus de pronostic est ainsi un défi scientifique majeur pour l'émergence de ce type de stratégie comme mis en évidence par (Lee *et al.*, 2006):

*"In spite of the progress made, many fundamental issues still remain:*

- Most of the developed prognostics approaches are application or equipment specific. A generic and scalable prognostic methodology or toolbox does not exist.*
- Currently, methods are generally focused on solving the failure prediction problem. Tools for system performance assessment and degradation prediction have not been well addressed"*

Concernant la première problématique identifiée ci-dessus, (Jardine *et al.*, 2006) montrent que les méthodes de pronostic sont majoritairement centrées sur le développement d'outils sans chercher à établir une modélisation du processus. Des travaux comme OSA-CBM (Provan, 2003) et SIMP (Système Intégré de Maintenance Prévisionnelle) (Muller, 2005) sont des premières contributions à cette modélisation.

Relativement à la deuxième problématique soulevée, il s'agit de la prise en compte des différents niveaux d'un système : point de vue global (vue « système »), point de vue des composants ou point de vue « sous-système ou fonctionnel » se situant entre les deux niveaux d'abstraction précédemment cités.

Peu de travaux traitent simultanément de ces aspects même s'il existe quelques contributions comme celle de (Muller, 2005) pour le pronostic, mais aussi (Németh *et al.*, 2007) pour d'autres processus comme le diagnostic..

Face à double constat, la contribution principale de nos travaux présentés dans ce papier réside dans la proposition d'un modèle générique du processus « Pronostiquer la défaillance ». Cette modélisation, basée sur une approche processus, permet d'en expliciter l'environnement, d'en identifier et typer les flux et d'en formaliser les sous-processus.

La suite de cet article s'organise en 4 parties. La partie 2 rappelle les objectifs du pronostic. La partie 3 présente une étude bibliographique sur les formalisations existantes du pronostic et leurs limites actuelles, permettant en partie 4 de développer notre proposition de modèle. Enfin la dernière partie conclut sur nos propositions tout en proposant quelques perspectives.

## **2 Qu'est ce que le pronostic ?**

Le terme *pronostic* provient du grec *progignôskein* qui signifie "connaître à l'avance". Ce processus est associé à la maintenance prévisionnelle et a pour but de prévoir l'état futur d'un système ou d'un composant. Plusieurs définitions sont proposées pour en préciser la finalité.

Pour (Byington *et al.*, 2002) : « *Prognostic is the ability to predict the future condition of a machine based on the current diagnostic state of the machinery and its available operating and failure history data.* » Cette définition met en évidence

P. Cochetoux, A. Voisin, E. Levrat et B. Iung

la nécessité pour le pronostic de s'intégrer dans son environnement informationnel, pour obtenir les données (passées ou courantes) nécessaires à sa réalisation. Pour (Lebold *et al.*, 2001) : « *The primary function of the prognostic is to project the current health state of equipment into the future taking into account estimates of future usage profiles.* » Cette définition indique qu'il faut prendre en compte l'état courant du système mais également les données futures appliquées au système.

En synthèse, de manière à anticiper au mieux et tirer tous les bénéfices d'une maintenance prévisionnelle, le pronostic de l'état futur du système doit intégrer le maximum d'informations disponibles pour se rapprocher au plus près de la réalité, intégrer des événements réels et pas uniquement statistiques. Ainsi, un des aspects majeurs du pronostic est de prendre en compte les connaissances à l'instant du pronostic sur les scénarios connus de fonctionnement et d'interaction du système avec son environnement. Pour un système industriel, ces scénarios sont principalement représentés par :

- les conditions de fonctionnement, c'est-à-dire les prévisions d'utilisation du système,
- les conditions environnementales et les informations futures sur les facteurs d'influence de l'environnement,
- le scénario de maintenance futur car les opérations de maintenance effectuées influent sur l'état du système.

Depuis 2004, la norme ISO 13381-1 décrit de façon standard ce que devrait être le processus de pronostic (sans en proposer de modélisation). Le pronostic y est défini par : « *Estimation de la durée de fonctionnement avant défaillance et du risque d'existence ou d'apparition ultérieure d'un ou de plusieurs modes de défaillance.* » Si cette définition ne prend pas en compte la nécessité d'inclure un scénario tel qu'expliqué ci-dessus, elle apporte deux aspects importants complémentaires au pronostic. Tout d'abord elle précise que le résultat du pronostic doit être formulé sous la forme d'une durée de vie résiduelle (Remaining Useful Life : RUL). Cette définition intègre également la notion de mode de défaillance courant et de modes de défaillance potentiels (qui n'auraient de réalité physique que dans le futur).

Sur la base des définitions et principes recensés précédemment, le pronostic est considéré dans cet article comme le processus qui doit prévoir l'état futur du système et donner l'ensemble des durées de vie résiduelles (du système, de ses sous systèmes et de ses composants) pour les modes de défaillances détectés et induits, à partir de connaissances sur le système (structure, composition, technologie...) et d'informations passées (historique des modes de fonctionnement passés), présentes (état courant) et futures (scénario de production et de maintenance).

### 3 Les approches existantes de modélisation du pronostic

Le pronostic est un processus issu des principes de la maintenance prévisionnelle, il est donc principalement développé dans des travaux qui sont relatifs aux architectures supportant ces types de maintenance. Le pronostic est considéré dans ces architectures comme interagissant avec d'autres processus avec lesquels il échange des flux informationnels (les processus de surveillance, diagnostic et d'aide à la décision,...).

#### 3.1 Contexte du processus de pronostic

Avec la volonté de standardiser une architecture « type » en maintenance conditionnelle, un regroupement de scientifiques et d'industriels américains ont proposé le cadre OSA-CBM (Open Systems Architecture for Condition-Based Maintenance) (Lebold *et al.*, 2001). Cette architecture présentée dans la Figure 1, est structurée en 6 couches, créant une succession linéaire des sous-processus nécessaires pour mener à bien cette maintenance. Le pronostic se situe après le processus « Health assessment » permettant de définir l'état du système. Bien que cela ne soit pas dit explicitement, ce processus intègre la fonction de diagnostic permettant de connaître le ou les modes de défaillance/dégradation courants. Le pronostic se situe en amont du processus « Decision support » qui permet de choisir les opérations de maintenance à programmer pour rétablir le système dans un état et des performances donnés.

L'architecture précédente couvre le domaine de l'acquisition de données jusqu'à la décision avec une identification des données majeures échangées entre sous processus et modélisées à travers les travaux de l'association MIMOSA (<http://www.mimosa.org>).

P. Cochetoux, A. Voisin, E. Levrat et B. Iung

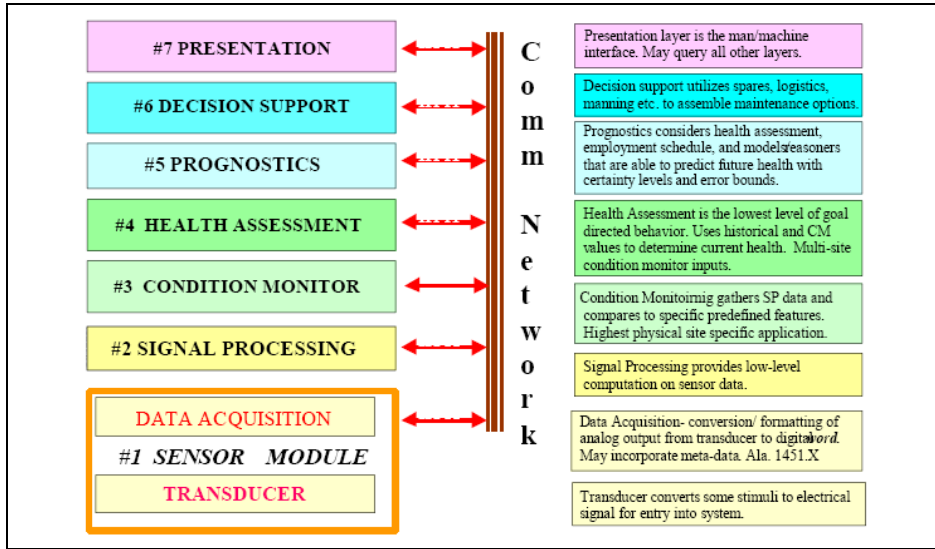


Figure 1 : L'architecture OSA-CBM (Lebold *et al.*, 2001)

Dans (Léger et Morel, 2001) puis (Muller, 2005) les auteurs proposent (Figure 2) une architecture d'un système intégré de maintenance prévisionnelle (SIMP). Cette architecture est constituée uniquement de trois processus : un processus de surveillance et diagnostic, un processus de pronostic et un processus d'aide à la décision. La spécificité de cette architecture réside dans le bouclage explicite entre les processus de pronostic et d'aide à la décision. Ainsi le processus de pronostic est, pour l'aide à la décision, le support d'évaluation des alternatives de maintenance ou de conduite, permettant de prévenir la défaillance.

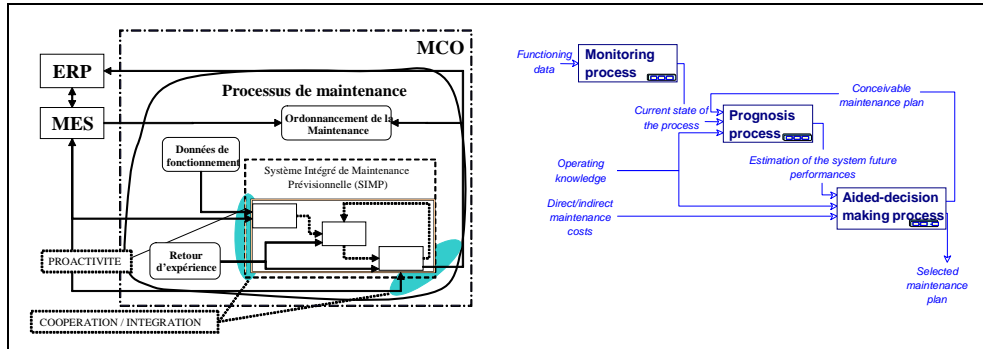


Figure 2 : Système intégré de maintenance prévisionnelle (Muller *et al.*, 2007)

### 3.2 Les flux en relation avec le pronostic

Dans le modèle OSA-CBM, on peut identifier 5 grandes classes de flux informationnels « d'entrées » relatives :

- aux connaissances sur le fonctionnement passé,
- au système,
- aux conditions opérationnelles futures,
- à l'état courant du système
- au contrôle.

Ce modèle permet aussi de définir les classes de sortie de la couche « Prognostics » :

- le résultat du pronostic : il s'agit directement de ce qu'OSA-CBM appelle PLData (différentes informations sur le résultat du pronostic sous la forme de RUL, de distribution de probabilité de RUL, les performances futures du système).
- les identifiants du résultat du pronostic : cette classe de sortie est composée de deux sorties, PL Configuration et PL Control Vector. Ces sorties permettent d'identifier un résultat de pronostic en lui associant les données du contrôle (PL Control Vector), l'algorithme choisi et la définition de l'intervalle de pronostic (PL Configuration).
- l'explication du résultat du pronostic : elle est donnée par PL Explanation.
- l'actualisation de l'historique du pronostic (PR History).

Néanmoins la provenance de tous les flux n'est pas précisée, il est donc difficile de les attribuer à l'une ou l'autre des différentes autres couches du modèle OSA-CBM.

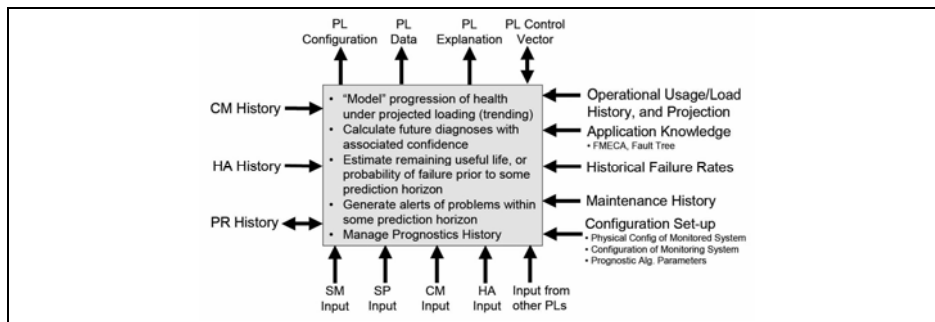


Figure 3 : Entrées / sorties de la couche « Prognostics Layer » du modèle OSA-CBM

P. Cochetoux, A. Voisin, E. Levrat et B. Iung

Dans (Muller *et al.*, 2007) les auteurs définissent globalement dans leur modèle la nature des données échangées entre le SIMP et ses sous-processus avec l'environnement (Figure 2).

En synthèse, les travaux sur la modélisation du processus de pronostic restent très généraux vis-à-vis des flux entrants et sortants. De plus, ils n'identifient pas les sous-processus génériques conduisant au déploiement de ce processus. Notre travail a donc pour objet de proposer la formalisation d'un processus intégré générique de pronostic, basée sur une approche processus permettant à la fois de modéliser les sous-processus du processus mais aussi les flux échangés en interne et en externe à ces sous-processus.

#### **4 Formalisation générique du processus « Pronostiquer la défaillance »**

Cette formalisation est basée sur la description de l'environnement du processus « Pronostiquer la défaillance », l'identification des flux d'entrées/sorties et la décomposition en sous-processus en accord avec les propositions normatives d'intégration préconisées par l'IEC 62264.

##### **4.1 La démarche de formalisation choisie**

La démarche de formalisation adoptée ici est une approche processus supportée par l'outil MEGA (<http://www.mega.com>). L'approche processus utilisé dans cet article est celle préconisée dans la norme qualité (ISO 9000:2000) qui propose une méthode de décomposition des processus des systèmes de management de la qualité. Cette méthode permet de garantir l'obtention d'un résultat cohérent respectant un cadre de modélisation reconnu. La démarche définit les sous-processus du pronostic et leurs flux d'E/S, ce qui segmente le domaine d'étude et donc le développement du pronostic en développement de plusieurs sous-processus clairement identifiés et modélisés.

De plus, nous couplons l'approche processus avec la typologie des flux présentés dans (Mayer, 1995) et issue des principes de la systémique. Ainsi Mayer propose une classification des flux en quatre classes :

- DF (Devoir Faire) : c'est un flux porteur des objets finalisants ou finalisés du Système de nature informationnelle, matérielle ou énergétique.
- PF (Pouvoir Faire) : c'est un flux porteur des objets ressources du Système. Il est de nature matérielle, énergétique, humaine ou logicielle.
- SF (Savoir Faire) : c'est un flux porteur des objets informant le Système. Ce sont des informations transactionnelles.
- VF (Vouloir Faire) : c'est un flux porteur des objets stimulant un événement sur le système. Ce sont des informations événementielles.

## Formalisation du pronostic à base d'une approche processus

Ces classes peuvent caractériser des flux entrant ou sortant d'un processus considéré.

### 4.2 Le processus « Pronostiquer la défaillance »

#### 4.2.1 L'environnement du processus « Pronostiquer la défaillance »

Nos travaux sur le pronostic sont basés sur les résultats de (Muller et al., 2007). En ce sens la figure 4 présente une extension formalisée de la figure 2 pour modéliser précisément l'environnement du SIMP constitué des trois processus principaux de surveillance et de diagnostic, de pronostic et d'aide à la décision. A cela s'ajoute plusieurs processus situés à différents niveaux de modélisation de l'entreprise. Au niveau système/process (opérationnel), on retrouve le processus « Acquérir et pré-traiter » qui permet d'obtenir des données directement issues du système, puis de les traiter et de les rendre disponibles. Au niveau tactique et opérationnel, les processus « Ordonnancer la production » et « Gérer la maintenance » sont supportés par des outils de type MES, GMAO. Enfin le processus « Gérer l'entreprise » se situe au niveau stratégique (ERP).

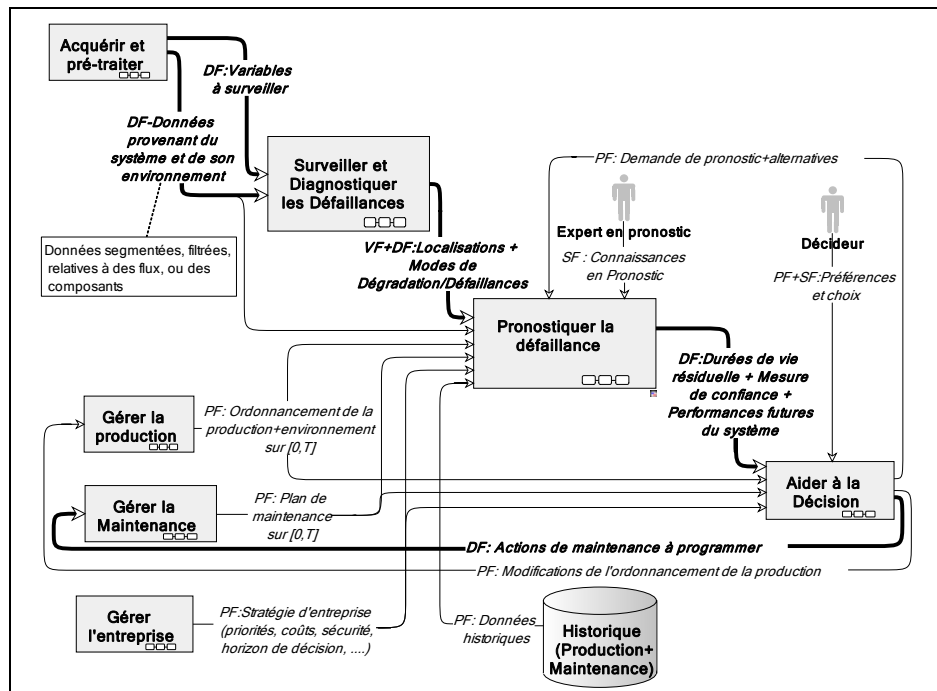


Figure 4 : Environnement du processus « Pronostiquer la défaillance »

P. Cochetoux, A. Voisin, E. Levrat et B. Iung

Les processus du SIMP trouvent leur correspondance dans l'architecture d'OSA-CBM. Ainsi, le processus « Surveiller et diagnostiquer » correspond à la couche « Condition Monitoring » et une partie de la couche « Health Assessment ». Le processus « Pronostiquer la défaillance » correspond à la seconde partie de la couche « Health Assessment » et à la couche « Prognostics ». Enfin, le processus « Aider à la décision » correspond à la couche « Decision support ». Les autres couches d'OSA-CBM correspondent à des processus de l'environnement du SIMP.

#### 4.2.2 La finalité de « Pronostiquer la défaillance »

D'après la norme ISO 13381-1, la finalité du processus de pronostic est de fournir des durées de vie résiduelle (RUL, i.e. Remaining Useful Life) pour le système ainsi que pour chaque composant. La détermination des RUL est réalisée sur une fenêtre temporelle  $[0, T]$  (0 est l'instant de référence du pronostic et T est le temps définissant l'horizon de pronostic).

D'un point de vue composant, une RUL est définie comme le temps restant avant la défaillance. La présence simultanée de plusieurs modes de dégradation/défaillance sur le composant conduit à fournir une RUL pour chaque mode de dégradation/défaillance. En effet, pour l'aide à la décision, la connaissance des RUL pour tous les modes de défaillance/dégradation permet de proposer des tâches de maintenance en groupant éventuellement les interventions dans le cadre d'une maintenance opportuniste (Thomas *et al.*, 2006). Les modes de dégradation/défaillance sont de deux types: les modes avérés, i.e. les modes existants à l'instant 0 du pronostic qui ont été détectés par le diagnostic, et les modes potentiels dont le pronostic prévoit l'apparition potentielle et l'évolution. Les modes avérés sont localisés uniquement sur ces composants dégradés de façon avérée, et les modes potentiels sont localisés soit sur des composants dégradés soit sur d'autres composants non encore dégradés à l'instant  $t=0$ .

Pour l'ensemble des composants du système et des modes de dégradation/défaillance, la sortie du processus de pronostic s'écrit comme l'union de trois ensembles de RUL :

$$Sortie = \{RUL_{C_i MD_k}\} \cup \{RUL_{C_i MD_l}\} \cup \{RUL_{C_j MD_m}\} \quad [1]$$

avec :

- $RUL_{CMD}$  la durée de vie résiduelle du composant  $C$  soumis au mode de dégradation  $MD$
- $C_i \in \check{A}$ ,  $\check{A}$  l'ensemble des composants pour lesquels le diagnostic a détecté un mode de dégradation/défaillance, i.e. les composants en cours de dégradation,
- $C_j \in \check{O}$ ,  $\check{O}$  l'ensemble des composants pour lesquels le diagnostic n'a pas détecté de mode de dégradation/défaillance mais pour lesquels le pronostic a

## Formalisation du pronostic à base d'une approche processus

projeté l'apparition de modes de dégradation/défaillance potentiels, i.e. composants non encore dégradés à l'instant  $t=0$ ,

- $k \in \{1, \dots, K_i\}$ ,  $K_i$  étant le nombre de modes de dégradation/défaillance avérés sur le composant  $i$ ,
- $l \in \{1, \dots, L_i\}$ ,  $L_i$  étant le nombre de modes de dégradation/défaillance potentiels sur le composant  $i$ ,
- $m \in \{1, \dots, M_j\}$ ,  $M_j$  étant le nombre de modes de dégradation/défaillance potentiels sur le composant  $j$ .

Cependant on peut distinguer deux types de composants, les composants non réparables, i.e. on remplace le composant après l'occurrence d'une défaillance et les composants réparables. Dans le premier cas, seule une RUL composant est nécessaire puisqu'il est changé à l'issue de ce temps, la RUL est donnée par la plus petite des RUL associées à celui-ci :

$$RUL_{C_i} = \begin{cases} \min\left(\{RUL_{C_i MD_k}\} \cup \{RUL_{C_j MD_m}\}\right) & \text{si } C_i \in \check{A} \\ \min\left(\{RUL_{C_i MD_l}\}\right) & \text{si } C_i \in \check{O} \end{cases} \quad [2]$$

D'un point de vue système, la RUL est définie comme le temps restant avant la perte de la finalité. La finalité du système est caractérisée par les exigences portant sur le produit et son flux et par celles sur le système de production. Les exigences sur le produit et sur son flux concernent les paramètres de la production, e.g. qualité produit, cadence... Les exigences sur le système de production concernent l'efficacité des moyens vis-à-vis du résultat. A titre d'exemple, il peut y avoir une dérive du système de production sans effet sur sa finalité, car compensée par une boucle de régulation. La finalité du système étant caractérisée par différents indicateurs, on peut calculer différentes  $RUL_{Ind_i}$ . Il convient ensuite d'agréger ces RUL pour obtenir une seule RUL système. On peut écrire pour un système caractérisé par  $n$  indicateurs :

$$RUL_{\text{Système}} = \min(RUL_{Ind_i}) \quad \text{avec } i \in \{1, \dots, n\} \quad [3]$$

De plus le pronostic doit fournir un niveau de confiance associé à chaque RUL système et composants (ISO 13381-1). D'après la norme : « *Un niveau de confiance est un chiffre (pourcentage) indiquant le degré de certitude que le diagnostic/pronostic est correct. Ce chiffre représente essentiellement l'effet cumulé des sources d'erreur sur la certitude finale ou la confiance dans l'exactitude du résultat* ». Dans la pratique, cette définition paraît restrictive puisque le plus souvent la confiance est représentée soit par un intervalle de confiance de niveau  $\alpha$ , soit par une distribution de probabilité sur la variable RUL. Nous proposons de compléter la norme en fournissant également les performances systèmes. En effet la connaissance composée uniquement des RUL ne permet pas à l'aide à la décision de travailler avec un critère portant sur la *performance*, en plus d'autres critères de type coût,

P. Cochetoux, A. Voisin, E. Levrat et B. Iung

sécurité... En effet, ce critère doit être évalué pour chaque alternative de scénario de manière à pouvoir les ordonner.

#### 4.2.3 Les flux entrants du processus « Pronostiquer de défaillance »

Pour atteindre sa finalité, le processus de pronostic doit interagir avec non seulement les processus du SIMP mais également avec d'autres processus d'entreprise (Figure 4). Les informations nécessaires au bon déroulement du processus concernent :

- *Les modes de dégradation/défaillance et leur localisation (VF+PF)* : issues du processus « Surveiller et diagnostiquer les défaillances », ces informations renseignent sur les modes de dégradation/défaillance courants aux niveaux composant et fonctionnel. Elles constituent un Vouloir Faire (VF) puisqu'en cas d'apparition d'un nouveau mode de dégradation/défaillance, un nouveau pronostic sera réalisé (modification de l'origine des temps et projection). Ce flux est également un Pouvoir Faire (PF) puisque la connaissance des modes de dégradation/défaillance permet au pronostic de sélectionner les modèles pertinents.
- *Les Données provenant du système et de son environnement (DF)* : fournies par le processus « Acquérir et pré-traiter », ces données sont prélevées sur le système. Elles portent à l'instant considéré, l'état et les performances du système et des composants. Ces données filtrées sont segmentées pour ne contenir que les parties représentatives de l'état du système (par exemple les données mesurées lors d'un arrêt du système sont éliminées).
- *La stratégie d'entreprise (priorités, coûts, sécurité, horizon de décision...)* (PF) : provient du processus « Gérer l'entreprise ». Elle précise l'horizon de pronostic défini par la fenêtre temporelle  $[0, T]$ . L'horizon dépend des choix stratégiques de l'entreprise, ainsi la possession d'un stock de pièces de rechange ou l'externalisation des interventions réduisent l'horizon de décision de maintenance et de pronostic. L'instant courant est pris comme instant de référence et comme origine ( $t=0$ ) du pronostic. Puisqu'il existe un bouclage avec l'aide à la décision pour évaluer et comparer différentes alternatives d'actions de maintenance, il est nécessaire qu'elles soient pronostiquées à partir d'une référence commune. Ce flux est également à destination du processus « Aider à la décision » pour lequel il précise les choix économique, écologique, sécuritaire... sur lesquels la décision doit se fonder.
- *Les données de l'historique (PF)* : ces données permettent d'établir et d'ajuster le processus « Pronostiquer la défaillance » puisqu'elles contiennent une partie de la connaissance sur le système. Elles sont utilisées généralement pour identifier les paramètres des modèles du pronostic et pour leur validation (courbes de dégradation, ...). Pour être exploitables, elles doivent contenir l'ensemble des informations décrites par les flux Pouvoir Faire et Devoir Faire (DF) du pronostic.

## Formalisation du pronostic à base d'une approche processus

- *Les connaissances en pronostic (SF)* : lors de la phase d'ingénierie, un expert apporte son savoir faire pour établir le processus « Pronostiquer la défaillance ». Ce Savoir Faire (SF) est composé par : le choix des modèles propres à chaque mode de défaillance/dégradation de chaque composant, l'identification des paramètres de chacun des modèles, la coordination de ces modèles lors de modes de dégradation/défaillance multiples, la modélisation de l'impact de ces modes de dégradation/défaillance sur les performances composants et système, la modélisation de l'impact des actions de maintenance et de changement de conditions opérationnelles...

Le pronostic doit connaître le scénario de production et de maintenance futur sur l'horizon de pronostic  $[0, T]$ . Ce scénario se construit à partir de:

- *L'ordonnement de la production + environnement sur  $[0, T]$  (PF)* : provenant du processus « Gérer la production », les informations d'ordonnement sont composées des charges de production et de leur durée imposées au système. De plus, la dégradation du système est influencée par les conditions environnementales prévues sur  $[0, T]$  (température extérieure, hygrométrie, les systèmes à proximité créant des vibrations, des ondes électromagnétiques, ...).
- *Le plan de maintenance sur  $[0, T]$  (PF)* : délivré par le processus « Gérer la maintenance », il s'agit du plan de maintenance systématique initialement prévu. Pour le pronostic, cette connaissance permet de prendre en compte les améliorations apportées par les opérations de maintenance pour évaluer les RUL.
- *La demande de pronostic et Alternatives (VF+PF)* : cette entrée constitue le bouclage avec le processus « Aider à la décision ». Ce bouclage permet à l'aide à la décision d'évaluer différentes alternatives d'actions de maintenance et/ou de reconfiguration de la production. Pour prévenir la défaillance, chacune de ces alternatives enrichit (action de maintenance ou reconfiguration de la production) le scénario formé du plan de maintenance systématique ou de l'ordonnement de production. Le pronostic permet d'évaluer chaque configuration en fournissant de nouvelles RUL à l'aide à la décision. Ainsi les informations provenant du processus « Aider à la décision » sont de deux types, un Vouloir Faire représenté par une demande de pronostic et un Pouvoir Faire constitué par les alternatives.

### 4.3 Décomposition du pronostic en sous processus

Le processus de pronostic se décompose en quatre sous-processus présentés Figure 5. Le sous-processus « Piloter le pronostic » contrôle l'activité des trois autres sous-processus : « Initialiser l'état et les performances », « Projeter dans le futur » et « Calculer les durées de vie résiduelle ». Ces trois sous-processus enchaînés constituent les étapes nécessaires pour obtenir un pronostic.

### 4.3.1 Piloter le pronostic

Le sous-processus « Piloter le pronostic » a pour rôle de contrôler l'activité des trois autres sous-processus. Contrôler signifie d'une part coordonner l'activité des autres sous-processus et d'autre part leur fournir les modèles appropriés à la situation courante (Savoir Faire), i.e. la localisation des fautes et les modes de dégradation/défaillance courants (résultat du processus de diagnostic).

Ainsi, « Piloter le pronostic » possède 2 types de sortie :

- Des demandes d'action aux autres sous-processus,
- Les modèles nécessaires à leur activité.

Pour obtenir ces sorties, le processus de pilotage nécessite en entrée :

- Les Modes de dégradation/défaillance courants et leur localisation (VF + PF) : cf § 4.2.3

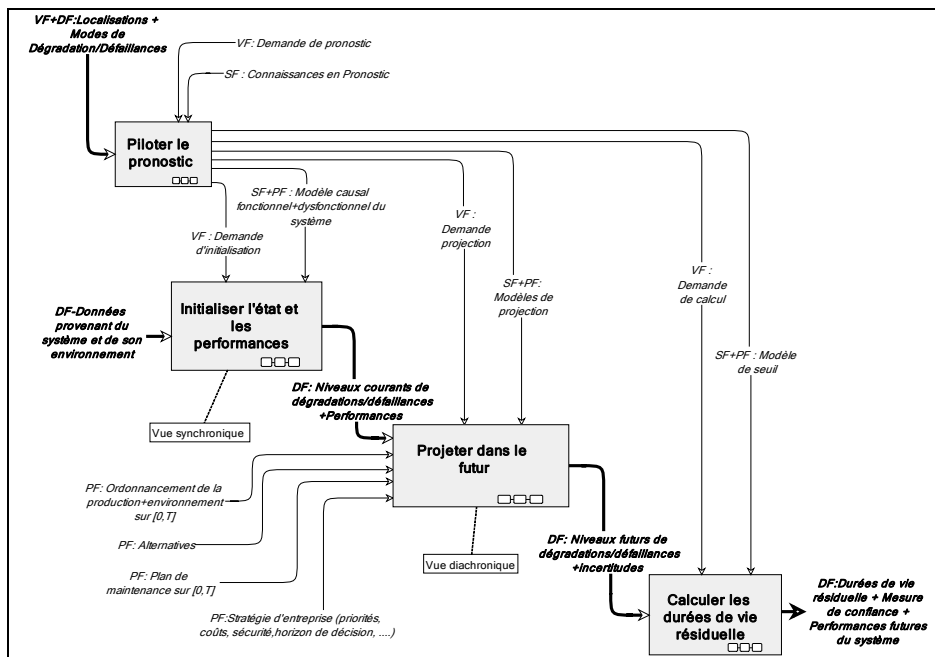


Figure 5 : Décomposition du processus « Pronostiquer la défaillance »

- Une Demande de projection (VF) : en provenance de l'aide à la décision, cette demande permet de calculer de nouvelles RUL à partir des alternatives proposées par l'aide à la décision. La demande venant de l'aide à la décision ne

## Formalisation du pronostic à base d'une approche processus

doit déclencher que les sous-processus « Projeter dans le futur » et « Calculer les durées de vie résiduelle »,

- *Des Connaissances en pronostic (SF)* : cf § 4.2.3

### 4.3.2 Initialiser l'état et les performances

La finalité du sous-processus « Initialiser l'état et les performances » est de fournir un point de départ au processus « Projeter dans le futur ». Il permet d'actualiser la situation courante du système et de ses composants avec les dernières données disponibles. Il fournit une vision synchronique du système et de ses composants. La sortie est constituée de l'état courant des composants et des performances actuelles du système et des composants :

- L'état courant des composants est donné par le niveau de chaque mode de dégradation/défaillance avéré.
- Les performances, composant ou système, sont données par des indicateurs permettant de quantifier l'activité du système ou du composant vis-à-vis de sa finalité.

Pour atteindre cet objectif, le processus a besoin en entrée de :

- *Données provenant du système et de son environnement (DF)* : cf § 4.2.3
- *La demande d'initialisation (PF)* : Elle est nécessaire dans deux situations : soit un nouveau mode de défaillance/dégradation est apparu, soit la dernière initialisation est périmée et l'aide à la décision fait une demande de pronostic,
- *Les modèles causaux de fonctionnement et dysfonctionnement (PF)* : Ces modèles sont établis à partir d'une analyse fonctionnelle basée sur une approche processus et d'une analyse dysfonctionnelle, AMDEC couplée à une HAZOP (Léger, 99), (Muller *et al.*, 2006). Le comportement d'un processus est décrit par des relations causales liant ses entrées, son support et ses sorties.

### 4.3.3 Projeter dans le futur

Le sous-processus « Projeter dans le futur » permet de déterminer l'évolution future des dégradations/défaillances et des performances composants et système afin d'avoir une vue diachronique du système. La projection tient compte de l'influence des conditions opérationnelles et environnementales, ainsi que de l'impact des différentes actions du plan de maintenance (scénario et alternatives). La projection est réalisée à partir des informations suivantes :

- *Demande de projection (VF)* : cette demande est issue du processus « Piloter le pronostic » et déclenche une projection,
- *Niveaux courants de dégradation/défaillance et performances (DF)* : issus du sous-processus « Initialiser l'état et les performances », ces informations servent de point de départ de la projection,

P. Cocheteux, A. Voisin, E. Levrat et B. Iung

- *Modèles de projection (SF+PF)* : fournis par le processus de pilotage du pronostic, les modèles de projection doivent répondre à trois points clés du processus de projection. Le premier concerne la modélisation de l'impact du scénario et des alternatives sur les niveaux des modes de dégradation/défaillance en cours ou sur les performances. La deuxième difficulté est de se projeter dans le temps en tenant compte de ces impacts, i.e. les modèles font évoluer le temps en boucle ouverte vis-à-vis du système, il n'y a pas de données de référence système pour l'intervalle  $[0,T]$ . La troisième difficulté porte sur la capacité à prévoir l'apparition de modes de dégradation/défaillance secondaires (potentiels) engendrés par l'évolution de modes avérés.
- *L'ordonnancement de la production et environnement sur  $[0,T]$  (PF)* : cf § 4.2.3
- *Le plan de maintenance sur  $[0,T]$  (PF)* : cf § 4.2.3
- *Les alternatives (PF)* : Le scénario est complété par le processus « Aider à la décision » qui propose des alternatives sur  $[0,T]$  au plan de maintenance et à l'ordonnancement de production prévus.

#### 4.3.4 Calculer les durées de vie résiduelle

Ce dernier sous-processus permet de calculer les RUL, finalité du processus de pronostic. Une RUL est définie par la date, dans l'intervalle  $[0,T]$  à laquelle la valeur de la projection franchit un seuil. Suivant la valeur projetée le seuil n'est pas défini de la même manière. Il existe deux types de seuil, les seuils composants, qui correspondent à des pannes composants, et les seuils fonctionnels, qui correspondent à une perte de finalité. Pour un composant, les valeurs projetées sont les niveaux des modes de dégradation/défaillance et les performances. Les seuils correspondent à la mise à zéro de la norme ISO 13381-1, i.e. une panne composant. Au niveau fonctionnel, le seuil est défini par rapport à la finalité d'une fonction et correspond à la limite de performance pour laquelle on considère que la finalité n'est plus atteinte (seuil critique). La Figure 6 résume ces deux notions.

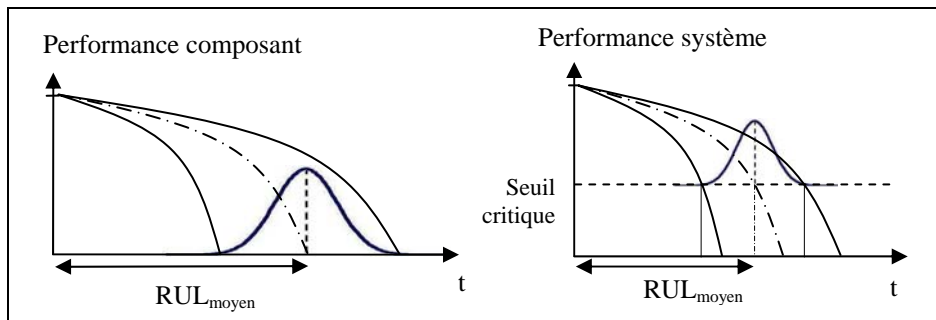
Le processus de calcul des RUL nécessite trois types d'informations :

- *La demande de calcul (VF)* : cette demande, issue du sous-processus « Piloter le pronostic », déclenche un calcul de RUL,
- *Les niveaux futurs de dégradation/défaillance et performances futures (DF)* : les informations concernent les niveaux de dégradation/défaillance futurs et les performances futures système et composants, provenant directement du processus de projection,
- *Les modèles de seuils (SF+PF)* : issus du processus « Piloter le pronostic », ils sont définis suivant le type de grandeur à laquelle ils sont associés, i.e. niveau de mode de dégradation/défaillance, performance composant ou système. Nous parlons de modèles de seuils car ils doivent tenir compte de l'incertitude que

## Formalisation du pronostic à base d'une approche processus

l'on peut avoir sur ce dernier comme par exemple de la variabilité inter composant. Ils peuvent donc se présenter sous la forme de distribution et à ce titre sont des modèles.

Chaque composant est susceptible d'être affecté par plusieurs modes de dégradation/défaillance. La connaissance du futur de chaque mode de dégradation/défaillance pour chaque composant est fournie par la projection des niveaux de dégradation/défaillance futurs. Ainsi, pour un composant, connaissant le seuil pour chaque projection, il est possible de déterminer une RUL pour chaque mode de dégradation/défaillance. De même la connaissance des performances futures du composant permet de calculer une RUL pour chacune d'entre elles. Pour obtenir la RUL du composant, il suffit de prendre le minimum de chacune des RUL, qu'elles proviennent des niveaux de dégradation/défaillance ou des performances composant.



**Figure 6 : Seuils composants et système**

De la même manière il est possible de déterminer une RUL à partir de la projection des performances système. Cette RUL est une RUL système, une durée après laquelle une des finalités du système ne sera plus respectée, nécessitant donc une action de maintenance.

## 5 Conclusion

L'objectif de notre travail est de proposer un modèle générique du processus « Pronostiquer la défaillance ». Au travers d'une approche processus, nous avons montré l'intégration de ce processus au sein du Système Intégré de Maintenance Prévisionnelle et des autres processus de l'entreprise. Nous avons également identifié et décrit les flux échangés avec son environnement. Enfin, nous en avons proposé une décomposition en sous-processus. Cette proposition sera appliquée sur la plate forme TELMA (Muller *et al.*, 2007) pour en évaluer d'une part la faisabilité mais aussi la valeur ajoutée.

P. Cochetoux, A. Voisin, E. Levrat et B. Iung

La poursuite de ce travail consiste à définir pour chaque sous-processus les besoins en données et traitements, puis d'étudier l'interopérabilité de ce processus avec les processus connexes à travers la standardisation des informations pour la définition de service dans une architecture moderne de e-maintenance. Ces travaux constituent une contribution au projet européen IP DYNAMITE ainsi qu'au projet « Pronostic » du Pôle de compétitivité Mer de la région PACA, qui nous offrent un cadre réel d'application au travers de partenaires tels que VOLVO, FIAT ou DCN. Enfin, nous avons focalisé notre attention sur une vision fonctionnelle produit/production dans cette étude, mais d'autres analyses fonctionnelles peuvent être envisagées vis-à-vis des fonctions assurer la sécurité, respecter l'écologie...

### **Bibliographie**

- Byington CS., Roemer MJ., Galie T., Prognostic Enhancements to Diagnostic Systems for Improved Condition-Based Maintenance, *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, septembre, 2002.
- DeSimone, L. D., Popoff, F. with The WBCSD, *Eco-Efficiency*, MIT Press, 1997.
- Lebold M., Thurston M., Open Standards for Condition-Based Maintenance and prognostic systems, *5th Annual Maintenance and Reliability Conference (MARCÓN 2001)*, Gatlinburg, USA.
- Lee J., Teleservice engineering in manufacturing: challenges and opportunities, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(8), p. 901-910, 1998.
- Lee J., Ni J., Djurdjanovic D., Qiu H., Liao H., Intelligent prognostics tools and e-maintenance, *Computers in Industry*, vol. 57, n° 6, 2006, p. 476-489.
- Léger J.B., Contribution méthodologique à la maintenance prévisionnelle des systèmes de production : Proposition d'un cadre Formel de Modélisation. Doctorat de l'Université Nancy 1, 1999.
- Léger J.B., Morel G., Integration of maintenance in the enterprise : towards an enterprise modeling-based framework compliant with proactive maintenance strategy, *Production Planning and Control*, 12(2), p. 176-187, 2001.
- Jardine A., Lin D., Banjevic D., A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), p. 1483-1510, 2006.
- Mayer F., Contribution au Génie Productique : application à l'Ingénierie pédagogique en Atelier Inter-Etablissements de Productique Lorrain, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 1995.
- 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 1, 2005.

## Formalisation du pronostic à base d'une approche processus

- Muller, A., Suhner, M. C. and Iung, B. Formalisation of a new prognosis model for supporting proactive maintenance implementation on industrial system. *Reliability Engineering and System Safety*, doi:10.1016/j.ress.2006.12.004, 2007.
- Németh E., Lakner R., Hangos KM., Cameron IT., Prediction-based diagnosis and loss prevention using qualitative multi-scale models, *Information Sciences*, vol. 177, n° 8, 2007, p. 1916-1930.
- Provan G., Prognosis and Condition-Based Monitoring : an open systems architecture. In 5<sup>th</sup> IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, p. 57-62, Washington USA, 2003.
- Takata, S., Kimura, F., Van Houten, F.J.A.M., Westkämper, E., Shpitalni, M., Ceglarek, D., Lee, J., Maintenance: Changing Role in Life Cycle Management, *Annals of the CIRP*, **53/2**, p. 643–656, 2004.
- Thomas, E., Levrat, E., Iung, B. and Monnin, M., 'Odds algorithm'-based opportunity-triggered preventive maintenance with production policy, 6th IFAC Symposium Safeprocess'06, China, p. 835–840, 2006.
- Van Houten, F.J.A.M., Tomiyama, T. and Salomons, O.W., Product modelling for model-based maintenance, *Annals of the CIRP*, 47/1, p. 123–129, 1998.
- Wang, H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, 139, p. 469-489, 2002.
- Wang P., Vachtsevanos G., Fault prognosis using dynamic wavelet neural networks, *Maintenance And Reliability Conference (MARCON 99)*, Gatlinburg, USA, 10-12 mai 1999.