11e CONGRES INTERNATIONAL DE GENIE INDUSTRIEL – CIGI2015
Québec, Canada
26-28 octobre 2015

Définition d'une expression temporelle de la performance industrielle

LAMIA BERRAH, LAURENT FOULLOY, HAKAM HAMADMAD

LABORATOIRE D'INFORMATIQUE, SYSTEMES, TRAITEMENT DE L'INFORMATION ET DE LA CONNAISSANCE (LISTIC)
UNIVERSITE SAVOIE MONT BLANC, 5, CHEMIN DE BELLEVUE, 74944 ANNECY-LE-VIEUX, FRANCE
lamia.berrah@univ-smb.fr,
laurent.foulloy@univ-smb.fr
hakam.hamadmad@univ-smb.fr

Résumé - La performance se définit relativement à l'atteinte d'un objectif. La pratique industrielle actuelle repose essentiellement sur la définition de performances « instantanées ». Les performances sont exprimées à des instants fixés, notamment l'instant final de l'horizon temporel associé à l'objectif. Nous proposons d'enrichir cette manière de prendre en compte le temps dans la performance en associant à sa forme instantanée, deux formes supplémentaires, la forme tendancielle et la forme prédictive. La performance instantanée exprime le résultat de la comparaison de l'objectif avec sa mesure à un instant de l'horizon temporel. La performance prédictive véhicule, à un instant, l'expression de la performance qui serait atteinte à un instant futur de l'horizon. La performance tendancielle donne une indication, sur un intervalle de l'horizon, sur l'évolution de la mesure au regard de l'évolution de l'objectif. A l'issue d'un rappel de ce qu'est la performance instantanée, une définition formelle est proposée pour les performances prédictive et tendancielle, ainsi qu'une réflexion sur l'utilisation de ces performances. Cherchant à proposer des expressions quantitatives, qualitatives et agrégées de ces performances, nous aurons recours à une formalisation floue, conformément à des développements menés précédemment. Enfin, des exemples, extraits de l'étude en cours d'un cas industriel, illustrent nos propos.

Abstract - This study deals with the temporal performance. The performance notion can be seen as being related to the achievement of objectives. Industrial practice focuses nowadays on an instantaneous performance form, leading thus to the expression of performances at different milestones of the objective temporal horizon, notably the final instant. We look here to enrich the temporal instantaneous form of the performance by two additive temporal forms, the predictive form and the trend form. Instantaneous performance handles the comparison of the objective with the acquired measure, at a given instant of the considered horizon. The predictive performance gives, at an instant, the performance that would be reached at a future instant of the horizon. The trend performance gives an indication about the evolution of the measure with regards to the evolution of the objective, throughout an interval of the horizon. After a review of the instantaneous performance definition, we propose formal definitions of both predictive and trend performances, as well as a means for using these performances. According to previous works, fuzzy formalism is a support for the framework, for the handling of qualitative, quantitative and aggregated expressions. Examples that are extracted from an industrial study in progress, illustrate these ideas.

Mots clés - Performance temporelle, Performance instantanée, Performance tendancielle, Performance prédictive, Formalisme flou.
Keywords - Temporal Performance, Instantaneous Performance, Trend Performance, Predictive Performance, Fuzzy formalism.

1 INTRODUCTION

De façon générale, on peut considérer que le fonctionnement d'une entreprise consiste à se définir des objectifs et à chercher à les atteindre. Certains objectifs sont structurels et relèvent de la mission de l'entreprise. Les actions mises en œuvre pour les atteindre sont alors systématiques. D'autres objectifs sont plus conjoncturels, liés au renforcement des valeurs de l'entreprise, à l'évolution de son environnement... L'atteinte de tels objectifs nécessite la planification et le suivi de la mise en œuvre des actions associées, au-delà du fonctionnement structurel et routinier de l'entreprise. Dans ce cas, des dispositifs sont mis en place, tels que les démarches d'amélioration, pour les aspects exécutoires, ou les indicateurs et systèmes d'indicateurs de performance, pour les aspects d'aide à la décision. Les démarches d'amélioration regroupent les approches et outils dédiés à l'atteinte des objectifs. De telles démarches reposent philosophiquement sur la roue de Deming (Plan – Do – Check –

Act) [Deming, 1982]. Concernant l'activité industrielle des entreprises, parmi les démarches d'amélioration les plus utilisées et les plus globales, nous pouvons citer le Kaïzen [Imai, 1986] et le BPR (Business Process Reengineering) [Hammer et Champy, 1993], le TPS (Toyota Production System) [Ohno, 1988], le DMAIC (Define – Measure – Analyse – Improve – Control) [Pydzek et Keller, 2001]… ainsi que, sur un plan plus moderne, la philosophie construite autour du concept du Lean Manufacturing [Womack et al., 1990].

Pour leur part, les indicateurs de performance et les systèmes d'indicateurs de performance devenus, sur cette dernière décennie, les systèmes de management de la performance [Pinheiro de Lima et al., 2013] [Vernadat et al., 2013] ont eu pour vocation de retourner des expressions de performance, ces expressions renseignant de l'atteinte des objectifs assignés. Les entreprises étant initialement dans une logique taylorienne de rentabilité, les indicateurs de performance étaient purement rattachés aux coûts de production [Taylor, 1911] [Johnson, 1975], productivité étant synonyme de profit. Ils étaient définis conformément au dispositif du contrôle de gestion et retournaient, en fin de périodes comptables, des expressions de performance financières [Anthony, 1965]. L'enjeu relevant de l'optimisation de la productivité, les expressions de performance avaient une sémantique simple à interpréter, relative à une satisfaction catégoriquement totale ou pas. C'est avec l'évolution du contexte, de la relation de l'offre à la demande, de l'émergence des nouvelles technologies et des principes d'automation, que la performance a évolué de monocritère à multicritère et multi-niveau, ce qui a donné lieu à la naissance des problématiques de pilotage et de complexité bien connues aujourd'hui dans le milieu industriel [Pujo et Kieffer, 2002] [Wiseman, 1988]. Les indicateurs de performance financiers ont alors évolué vers des indicateurs à la fois financiers et techniques [Hronec, 1995], à même de retourner des expressions de performance associés cette fois à des critères diversifiés. Le triptyque « coût – qualité – délai » a ainsi été représentatif de la performance industrielle, enrichi aujourd'hui de critères tels que l'innovation, le développement durable [Wholey, 1996] [Comoglio et Botta, 2012]…

Dans la logique monocritère, l'on était en présence d'une sémantique de *succès absolu*, au regard de l'atteinte de l'objectif de maximisation des rendements attaché à l'expression de performance taylorienne. Dans la logique multicritère de la performance, cette sémantique a laissé place à celle de *degré d'atteinte* d'un objectif. En effet, les besoins en termes de pilotage réactif ont imposé la nécessité de définir des informations plus riches que des expressions de performance « tout-ou-rien », suffisantes dans une logique de contrôle. Un degré d'atteinte intermédiaire permet d'avoir une vision plus fine de la réalité de l'atteinte de l'objectif, et de définir de ce fait les actions adéquates à la correction, l'anticipation, l'amélioration.

La conscience de définir des expressions de performance multicritère, répondant aux exigences du pilotage, a eu un large écho dans la littérature, et a pris forme, dans les années 1990, dans les Systèmes d'Indicateurs de Performance (SIP), plus connus sous le vocable de Performance Measurement Systems (PMSs) [Bititci, 1995] [Neely et al., 2000] [Ducq et al., 2001] [Clivillé et al., 2007] [Nudurupati et al., 2011]. Expressions quantifiées, globales, élémentaires, multicritère ont été proposées pour la performance. Des modèles mathématiques ainsi que des méthodologies de mise en place sont aujourd'hui disponibles pour prendre en compte la diversité de l'expression de la performance et son lien avec un pilotage réactif.

Toutefois, si les aspects multicritère et multi-niveau de la performance ont été analysés et traités, il n'en est pas de même pour son aspect temporel. En effet, si nous considérons que l'expression de la performance identifie le degré d'atteinte d'un objectif, celle-ci reste exprimée à la fin de l'horizon temporel associé à l'atteinte de l'objectif. La performance exprimée est en cela taylorienne, véhiculant une sémantique de contrôle et vérification de cette atteinte. La mise en place d'indicateurs de processus, fournissant des expressions de performance le long du processus en charge d'atteindre l'objectif [Imai, 1986] ; la décomposition structurelle d'un objectif en sous-objectifs et l'association à des sous-objectifs des expressions de performance [Ducq et al., 2001] [Berrah et Foulloy, 2013], ont certes cherché à pallier cet aspect de performance « *a posteriori* ». Allant plus loin dans la recherche de la prise en compte du temps dans la performance, des travaux plus récents ont étendu l'expression d'une telle performance instantanée à tout instant de l'horizon temporel associé à l'atteinte de l'objectif [Berrah et Foulloy, 2013]. Néanmoins, la logique de définition de la performance reste une logique de performance que nous qualifions d'« instantanée ». Or, si nous convenons de la pertinence aujourd'hui de fournir au pilotage des performances qui renseignent non pas seulement d'atteintes « *a posteriori* » des objectifs, nous avons à imaginer d'autres formes de performance que celle instantanée.

En ce sens, nous souhaitons enrichir la performance instantanée par deux performances sémantiquement différentes, la performance « prédictive » d'une part et la performance « tendancielle » d'autre part. Ces trois formes de performance temporelle fournissent ainsi, à un instant donné, non seulement l'expression d'une performance atteinte, mais aussi une idée de la manière dont l'atteinte de l'objectif se profile, d'ici l'instant final de l'horizon temporel.

Le développement de ces idées s'articule comme suit dans cet article. Nous introduisons dans la section 2 les performances respectivement prédictive et tendancielle et cherchons à en montrer l'intérêt ainsi qu'une utilisation conjointe. La section 3 sera consacrée à un rappel de la définition d'une performance instantanée ainsi qu'à une formalisation des performances prédictive et tendancielle. Une formalisation floue a été retenue dans la mesure où elle permet un traitement homogène à la fois d'expressions qualitatives et quantitatives. Le cadre formel flou offre de plus la possibilité d'agréger de telles informations. En effet, une expression linguistique nous semble particulièrement adaptée à l'expression de la performance tendancielle, tandis qu'une agrégation à base de règles nous sera utile pour combiner performance instantanée, performance prédictive et performance tendancielle. Des exemples extraits d'une étude soumise par un fabricant de roulements à billes autour d'un objectif quantitatif de production illustreront nos propos le long de nos développements. Enfin, nous conclurons cette étude par un résumé et des perspectives des travaux présentés.

2 PERFORMANCE INSTANTANEE, PERFORMANCE PREDICTIVE ET PERFORMANCE TENDANCIELLE

Nous proposons de définir la performance temporelle par un triplet constitué respectivement de, la performance instantanée, la performance prédictive et la performance tendancielle.

Plus particulièrement, supposons un objectif déclaré, soit une valeur à atteindre, associée à une variable, sur un horizon temporel.

La **performance instantanée** identifie le degré d'atteinte d'un objectif à un instant donné. L'expression de cette performance est le résultat de la comparaison d'une mesure, reflet de l'état atteint, à cet objectif [Berrah et Foulloy, 2013]. La performance instantanée s'exprime le long de ce que nous pouvons appeler la *trajectoire temporelle* de l'objectif. Elle peut donc concerner l'atteinte de l'objectif considéré à l'instant final de l'horizon temporel mais elle peut également concerner l'atteinte d'objectifs *intermédiaires*, définis le long de la trajectoire temporelle et associés de ce fait à des instants particuliers - des jalons - de l'horizon temporel.

La **performance prédictive** identifie, à un instant donné, le degré d'atteinte d'un objectif à un instant futur. Cette performance se caractérise ainsi par trois paramètres, le degré d'atteinte d'une part et les instants, présent et futur, d'autre part. En extension du mode d'expression de la performance instantanée, la performance prédictive sera le résultat d'une estimation ou prédiction de la mesure à l'instant futur, rapportée à l'objectif.

La **performance tendancielle** véhicule l'idée d'une opinion sur une évolution de la mesure, rapportée à l'évolution de l'objectif. Cette performance vient ainsi comparer la tendance d'une mesure à la tendance d'un objectif. La performance tendancielle fait donc intervenir dans son expression des variations, entre, deux instants de l'horizon temporel et deux objectifs intermédiaires.

Chacune de ces performances a une manière d'illustrer l'aspect temporel de la performance et de ce fait l'atteinte de l'objectif.

- La performance instantanée véhicule l'idée de donner, à tout instant, une information sur l'atteinte de l'objectif. La performance instantanée peut renseigner, partiellement ou totalement, de cette atteinte, selon le positionnement de l'instant considéré dans l'horizon temporel.
- La performance prédictive se veut donner une information relative à l'atteinte de l'objectif, à des instants qui sont nécessairement dans le « futur », c.à.d. au-delà de l'instant considéré. Associée à la performance instantanée, cette performance peut être une aide à un ajustement des actions à mener pour une meilleure atteinte de l'objectif. Naturellement, l'expression de cette performance peut être entachée d'incertitude, au vu de plusieurs paramètres. Intervient notamment le positionnement de l'instant d'expression de cette performance par rapport à l'instant final de l'horizon temporel ainsi que le caractère plus ou moins stable de l'environnement autour de l'objectif. En effet, l'expression d'une performance prédictive ne saurait avoir le même sens en début d'exécution de plan d'action qu'en milieu ou en fin d'exécution. De même, on peut imaginer qu'une performance prédictive aurait moins d'intérêt à être exprimée lorsque la performance instantanée est satisfaisante sur une certaine durée, jugée suffisamment longue pour pouvoir tirer des conclusions sur la manière dont l'objectif sera atteint. Ainsi, méthodologiquement, nous pouvons bien sentir l'intérêt en premier lieu d'estimer une sorte de pertinence associée à l'expression de la performance prédictive. Cette pertinence viendra pondérer la valeur proposée. Par ailleurs, l'on peut également ressentir l'utilité d'une interprétation conjointe, voire d'une combinaison, de cette performance avec la performance instantanée. L'information obtenue synthétisera toute l'étape d'analyse préalable à la décision et fondée sur l'analyse conjointe de, (1) l'expression de la performance instantanée atteinte, (2) l'expression de la performance prédictive estimée, (3) du coefficient de pertinence associé. Cette information représentera une sorte d'ajustement ou correction de l'expression de la performance instantanée, qui devient conditionnée par la prédiction de ce qu'elle serait à l'instant final.
- Par ailleurs, la performance tendancielle vient renseigner d'une information d'une autre nature. Cette performance donne une idée de la manière dont les trajectoires, respectivement celle de l'objectif et celle de la mesure, évoluent l'une par rapport à l'autre. La performance tendancielle exprime en quelque sorte un degré de correspondance entre ce qui a été planifié et ce qui est réel. Méthodologiquement, l'interprétation de cette performance se suffit à elle-même mais ne concerne plus l'atteinte de l'objectif à proprement parler mais la manière dont cette atteinte est réalisée. Si la performance instantanée et la performance prédictive relèvent de l'efficacité dans l'atteinte de l'objectif, la performance tendancielle relèvera de l'efficience associée à cette atteinte. Toutefois, l'information qu'elle véhicule peut également intervenir pour ajuster et pondérer le résultat obtenu à un instant. L'expression corrigée de la performance instantanée devient conditionnée cette fois par la manière dont elle a été atteinte.

Maintenant que nous avons délimité les contours des trois formes de performance temporelle introduites dans cet article, nous allons passer, dans la partie suivante, à leur formalisation. Nous rappellerons dans ce sens le principe d'expression de la performance instantanée, conformément à des travaux menés précédemment par notre équipe. Concernant l'expression de la performance prédictive, nous nous inspirerons de mécanismes intuitifs de projection temporelle. Nous choisissons de caractériser la pertinence associée à l'expression de la performance prédictive par une expression linguistique. De plus, la combinaison de la performance instantanée avec la performance prédictive sera effectuée à l'aide d'un jeu de règles, pondéré par la pertinence. Quant à la performance tendancielle, nous faisons le choix de l'exprimer sous forme qualitative, ce qui nous semble en accord avec la pratique industrielle actuelle. Nous proposerons en guise de synthèse une expression globale qui intègre à l'expression de performance instantanée corrigée l'expression de la performance tendancielle. L'expression synthétique sera obtenue sur la base d'une agrégation à base de règles. C'est pour l'ensemble de ces raisons que nous nous tournerons vers les mécanismes définis dans la théorie des sous-ensembles flous [Zadeh, 1965] [Zadeh, 1973].

3 L'EXPRESSION DE LA PERFORMANCE INSTANTANEE

La représentation d'un objectif par sa valeur à l'instant final de l'horizon temporel associé à l'exécution d'un plan d'action, a fait l'objet de travaux précédents dans lesquels la déclaration d'objectifs précis, imprécis, numériques ou linguistiques a été prise en compte de manière générale grâce à la théorie des sous-ensembles flous [Berrah et al., 2000]. L'expression de la performance, de fait instantanée et qui renseigne sur l'atteinte de l'objectif, a été traitée dans le même cadre. Rappelons quelques

définitions rattachées à cette expression et utiles pour la suite de l'étude présentée dans cet article.

Définition 1 : soit V un ensemble de variables associées aux objectifs. Tout attribut d'un objectif est obtenu par l'intermédiaire d'une fonction définie sur V. Ainsi, $o(v)$ représente la valeur à atteindre de l'objectif associé à la variable v. D'une manière analogue, $T_i(v)$ et $T_f(v)$ sont les instants respectivement initial et final de l'horizon temporel associé à l'objectif.

Définition 2 : soit $v \in V$, l'objectif instantané est défini par la fonction q, appelée fonction de quantification, et $q(v,t)$ est la valeur de l'objectif associée à l'objectif v à l'instant $T_i(v) \le t \le T_f(v)$. Avec ces notations on a : $o(v) = q(v, T_f(v))$.

Définition 3 : soit $v \in V$, on notera $m(v,t)$ la mesure, instantanée, associée à la variable v. En particulier, la mesure à l'instant final est notée $n(v) = m(v, T_f(v))$.

La performance instantanée identifie le degré d'atteinte d'un objectif à un instant donné. La performance instantanée peut s'exprimer par le biais de la comparaison entre l'objectif instantané et la mesure instantanée, associés à la variable v à l'instant considéré. La comparaison est modélisée par la fonction f de sorte que la performance instantanée est donnée par l'expression suivante [Berrah et Foulloy, 2013] :

$$\forall t \in [T_i(v), T_f(v)], p(v,t) = f(q(v,t), m(v,t)). \qquad (1)$$

Illustrons ces concepts sur une problématique d'évolution de la capacité d'une ligne de production d'un constructeur de roulements à billes dont l'objectif est d'augmenter cette capacité de 3000 pièces par semaine, permettant ainsi un passage d'une capacité actuelle 27 000 pièces par semaine à une capacité espérée de 30 000 pièces par semaine. L'horizon temporel considéré pour ce faire est de 12 semaines.

Formellement l'objectif déclaré s'écrira : $o(capacité) = 30000\, pièces$.

Afin d'illustrer les différentes notations, la figure 1 représente l'évolution de l'objectif instantané et de la mesure pendant 7 semaines pour la variable *Capacité*.

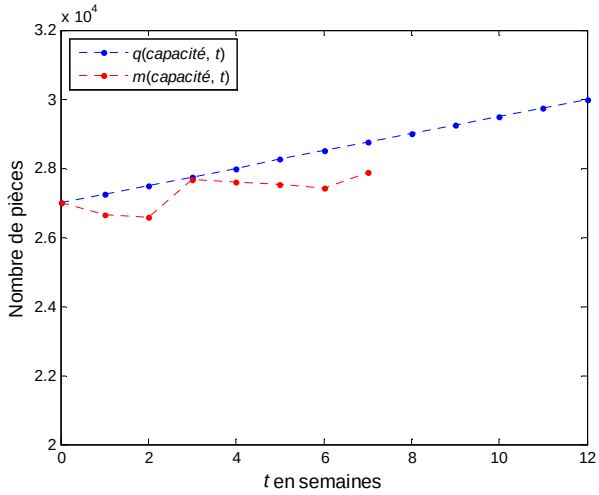

Figure 1 : Evolution de l'objectif et de la mesure

En utilisant le ratio entre la mesure et l'objectif, comme fonction de comparaison, nous obtenons le résultat présenté à la figure 2 pour les 7 premières semaines.

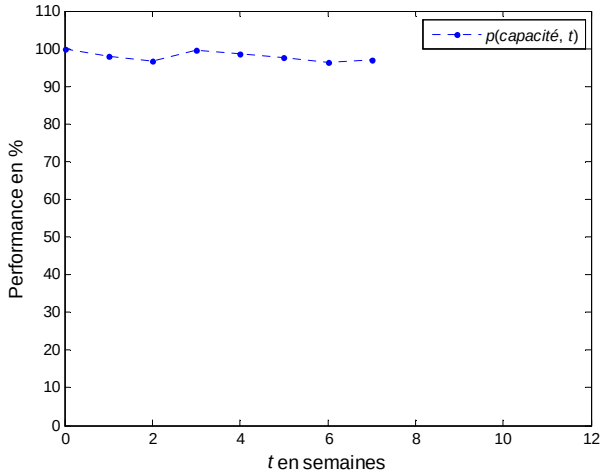

Figure 2 : évolution de la performance instantanée sur les 7 premières semaines

4 L'EXPRESSION DE LA PERFORMANCE PREDICTIVE

Comme nous l'avons expliqué précédemment, l'idée développée dans cette étude est d'exploiter, à un instant t donné, une information sur l'atteinte future de l'objectif. Cette information sera d'autant plus pertinente que l'instant considéré sera proche de la fin de l'horizon temporel, soit la fin de l'exécution du plan d'action, c'est-à-dire proche de $T_f(v)$. Nous proposons ici un modèle assez simple de prédiction (des modèles plus recherchés pouvant être envisagés) qui consiste à prédire la valeur de la mesure à l'instant final $T_f(v)$. Cette valeur sera ensuite comparée à la valeur de l'objectif à l'instant final à l'aide de la fonction de comparaison f. Au vu de l'incertitude associée à ce type de performance, nous proposons de coupler l'expression de la performance prédictive à une information renseignant de la pertinence d'une telle expression.

4.1 Prédiction de la mesure à l'instant final.

Nous proposons d'utiliser une prédiction au premier ordre. Pour les besoins de traitement ultérieurs, nous avons besoin d'introduire la notion de variation autour de la mesure et de la performance, soit plus généralement d'une certaine quantité. Dans ce sens, nous définissons formellement la variation d'une quantité comme suit.

Définition 4 : soient u une quantité associée à la variable $v \in V$ *et* ΔT *un intervalle de temps. On notera* $u(v,t)$ *la valeur de cette quantité à l'instant* t*. La variation de la quantité u à l'instant t est donnée par l'expression* $\Delta(u,t) = u(v,t) - u(v,t-\Delta T)$.

Soit $\Delta(m,t)$ la variation de la mesure m associée à une variable v. La prédiction au premier ordre, à l'instant t, de la mesure à l'instant final est donnée par l'expression suivante et illustrée par la figure 3 :

$$\hat{n}(v,t) = m(v,t) + \frac{\Delta(m,t).(T_f(v) - t)}{\Delta T}. \qquad (2)$$

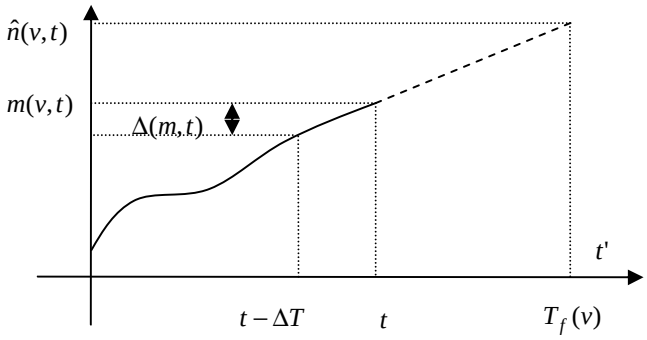

Figure 3 : prédiction de la mesure au premier ordre

La figure 4 présente l'application de ce principe sur l'exemple considéré avec $\Delta T = 4 semaines$. On obtient, pour $t = 7 semaines$, $\hat{n}(capacité,7) = 28171$ pièces.

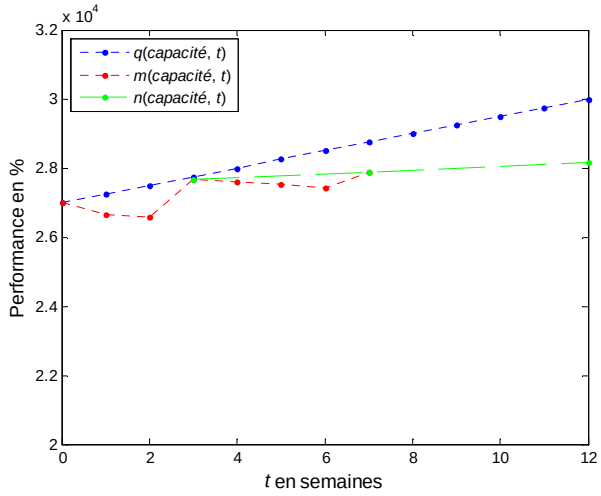

Figure 4 : illustration de la mesure prédite à 7 semaines

4.2 Performance prédictive et degré de pertinence

A un instant t donné, $T_i(v) \le t \le T_f(v)$, la prédiction de la performance pour l'instant final $T_f(v)$ est obtenue en comparant l'objectif à l'instant final, *i.e.* $o(v)$, avec la mesure prédite pour l'instant final, *i.e.* $\hat{n}(v,t)$, à l'aide de la fonction de comparaison f. Formellement on obtient :

$$\hat{p}(v,t) = f(o(v), \hat{n}(v,t)). \qquad (3)$$

L'application de ce principe à l'exemple considéré conduit à une performance prédictive $\hat{p}(capacité,7) = 94.69\%$, avec le ratio entre la mesure et l'objectif comme fonction de comparaison,

La pertinence de cette prédiction peut dépendre de plusieurs facteurs, comme la qualité du signal de mesure, mais, en premier lieu, semble d'autant meilleure que l'on s'approche de l'instant final. Nous proposons de renseigner qualitativement cette pertinence, et choisissons de la représenter par une information linguistique floue, *i.e.* un sous-ensemble flou défini sur un ensemble de termes linguistiques, en l'occurrence *Faible*, *Modérée*, *Forte*.

A cet effet, rappelons les liens définis par Zadeh [Zadeh, 1971] entre des termes et des nombres. La signification floue d'un terme l d'un ensemble de mots L, notée $M(L)$, est définie par la fonction d'appartenance $\mu_{M(l)}$ sur un ensemble de nombres X. Ainsi $\mu_{M(l)}(x)$ est le degré d'appartenance du nombre $x \in X$ à la signification du terme l. Comme l'a expliqué Zadeh, la relation entre les nombres et les mots peut aussi être caractérisée par la description floue du nombre x, notée $D(x)$ et définie par sa fonction d'appartenance $\mu_{D(x)}$. Ainsi $\mu_{D(x)}(l)$ représente le degré avec lequel le nombre x peut être représenté par le terme l. Comme la signification floue et la description floue sont deux manières de représenter la même relation entre mots et nombres, on a l'égalité suivante :

$$\forall l \in L, \forall x \in X, \mu_{D(x)}(l) = \mu_{M(l)}(x). \qquad (4)$$

En première approche et pour des raisons de simplicité pour cet article, nous considérerons que la pertinence associée à l'expression de la performance prédictive est obtenue en calculant la description floue de l'instant t à partir d'une partition floue de l'intervalle $[T_i(v), T_f(v)]$. Ce principe est illustré dans la figure 5 où la partition floue est définie par les fonctions d'appartenance des termes pris dans L = {*Faible*, *Modérée*, *Forte*}.

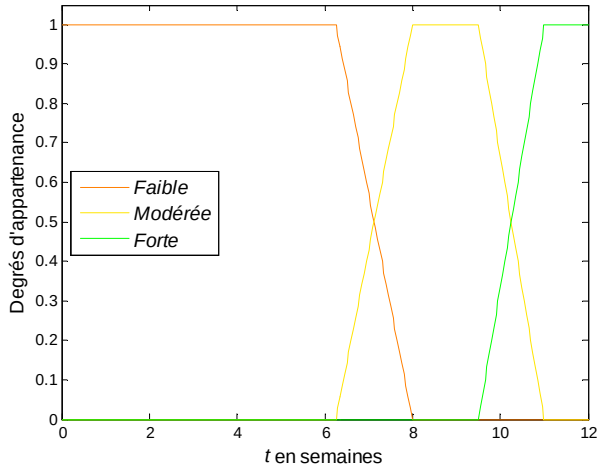

Figure 5 : exemple de partition floue pour la pertinence associée à la performance prédite

En utilisant la notation de Zadeh pour les sous-ensembles flous sur des ensembles discrets, on a pour $t = 7 semaines$:

$$pert(Capacité,7) = 0.57 / Faible + 0.43 / Modérée + 0 / Forte \,. \quad (5)$$

Cet exemple révèle une pertinence entre modérée et faible de l'expression prédite.

In fine, à chaque instant t, $T_i(v) \le t \le T_f(v)$ l'expression de la performance prédictive est fournie pour le couple $(\hat{p}(v,t), pert(v,t))$ qui renseigne sur le degré d'atteinte futur de l'objectif et la pertinence de cette prédiction.

4.3 Correction de la performance instantanée à l'aide de la performance prédictive

L'ajout d'informations complémentaires sur l'atteinte de l'objectif est intéressant mais peut aussi rendre plus complexe, pour le décideur, les tâches d'analyse et de conclusion. Une information agrégée permet alors une vision à la fois synthétique et globale de la situation.

Au vu de la nature des informations à prendre en compte et de la connaissance (analyse) nécessaire pour cette correction, un mécanisme à base de règles nous semble adapté. Nous proposons deux méthodes différentes de correction : l'une est à conclusions numériques, l'autre est à conclusions linguistiques.

4.3.1 Correction par un jeu de règles à conclusions numériques

Une piste très riche dans le domaine du contrôle flou a été ouverte par Takagi et Sugeno en 1985 en utilisant une base de règles où les conclusions ne sont plus des termes linguistiques mais sont exprimées sous une forme numérique qui peut être une constante, un polynôme ou, plus généralement, une fonction des variables d'entrée [Takagi et Sugeno, 1985]. Soit un jeu de *m* règles dont la *i*ème a la forme générique suivante :

Si x_1 *est* $A_{1,j}$ *et ... et* x_n *est* $A_{n,j}$ *alors* $s = f_j(x)$ *avec* $x = (x1, ..., xn)$.

Le calcul de la sortie de ce système flou de Takagi-Sugeno est donné par :

$$s = \frac{\sum_{j=1}^{m} c_j w_j}{\sum_{j=1}^{m} w_j} \quad avec \;\; w_j = \prod_{i=1}^{n} \mu_{M(A_{i,j})}(x_i) \,. \quad (6)$$

Ce cas très général va trouver ici une expression extrêmement simple car nous allons utiliser un système à trois règles avec une prémisse mono-dimensionnelle relative à la pertinence. Nous pouvons en effet imaginer par exemple une analyse résumée dans un jeu de règles ayant la forme suivante.

Si pertinence est *Faible* alors $p_{corr}(v,t) = p(v,t)$

Si pertinence est *Modérée* alors $p_{corr}(v,t) = 0.75\,p(v,t) + 0.25\,\hat{p}(v,t)$

Si pertinence est *Forte* alors $p_{corr}(v,t) = 0.5\,p(v,t) + 0.5\,\hat{p}(v,t)$

Cette proposition consiste à considérer que si la pertinence est faible alors la performance prédictive n'a pas de représentativité de l'atteinte de l'objectif et ne corrige en rien la performance instantanée. Si la pertinence est modérée, on tient principalement compte de la performance instantanée. Enfin si la pertinence est forte, on moyenne la performance instantanée et la performance prédictive.

Chacune de ces règles correspond au cas typique dans lequel la prémisse serait pleinement valide. Les situations intermédiaires vont introduire une pondération de chaque cas par les degrés d'appartenance selon le principe de l'équation (6).

A titre d'illustration, la situation donnée par l'équation (5) conduit à la performance corrigée suivante :

$p_{corr}(v,t) = 0.57\,p(v,t) + 0.43(0.75\,p(v,t) + 0.25\,\hat{p}(v,t))$ soit

$p_{corr}(v,t) = 0.9\,p(v,t) + 0.1\,\hat{p}(v,t)$.

En reprenant notre exemple, à $t = 7 semaines$ la performance instantanée vaut $p(capacité,7) = 96.98\%$ et la performance prédictive est $\hat{p}(capacité,7) = 94.69\%$. La performance instantanée corrigée vaut donc $p_{corr}(capacité,7) = 96.73\%$.

4.3.2 Correction par un jeu de règles à conclusions linguistiques

Dans ce contexte, l'idée est d'interpréter linguistiquement les performances pour les agréger. Pour cela, sans perte de généralité, nous supposerons que les valeurs numériques des expressions de performance sont dans l'intervalle [0%, 100%]. A titre d'illustration, nous utilisons une partition floue de cet intervalle à l'aide des significations floues des termes qualifiant la performance *L'* = {*Mauvaise*, *Bonne*, *Très Bonne*, *Excellente*} que nous abrégerons respectivement par *M*, *B*, *TB*, *E*. Cette partition est représentée dans la figure 6.

Nous disposons donc de 4 symboles pour qualifier la performance instantanée $p(v,t)$, des mêmes symboles pour qualifier la performance prédictive $\hat{p}(v,t)$ et des trois symboles du paragraphe précédent pour qualifier la pertinence $pert(v,t)$.

Le jeu de règles contient donc 4x4x3 = 48 règles de la forme :

Si $p(v,t)$ *est* A_i *et* $\hat{p}(v,t)$ *est* B_j *et* $pert(v,t)$ *est* C_k *alors* $p_{corr}(v,t)$ *est* D_l *avec* $A_i, B_j, D_l \in L'$ *et* $C_k \in L$.

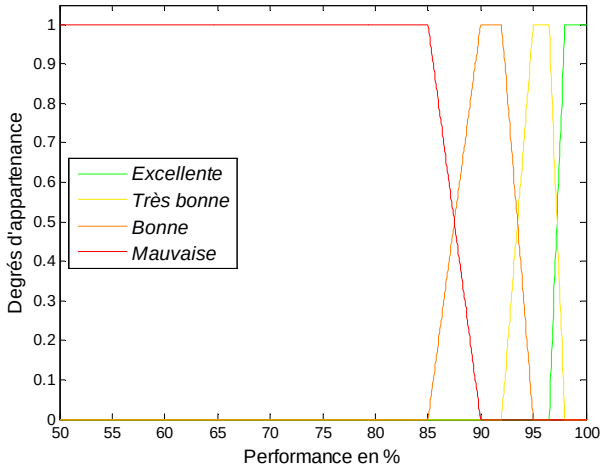

Figure 6 : partition floue des expressions de performance

Afin d'éviter l'écriture fastidieuse des 48 règles, nous en donnons une représentation sous forme de 3 tableaux, chacun d'entre eux correspondant à une des valeurs de la pertinence.

		pert(*v*, *t*) = *Faible*			
		$\hat{p}(v,t)$			
		E	***TB***	***B***	***M***
p(*v*, *t*)	***E***	*E*	*E*	*E*	*E*
	TB	*TB*	*TB*	*TB*	*TB*
	B	*B*	*B*	*B*	*B*
	M	*M*	*M*	*M*	*M*

		pert(*v*, *t*) = *modérée*			
		$\hat{p}(v,t)$			
		E	***TB***	***B***	***M***
p(*v*, *t*)	***E***	*E*	*E*	*TB*	*TB*
	TB	*TB*	*TB*	*TB*	*B*
	B	*TB*	*B*	*B*	*M*
	M	*B*	*M*	*M*	*M*

		pert(*v*, *t*) = *Forte*			
		$\hat{p}(v,t)$			
		E	***TB***	***B***	***M***
p(*v*, *t*)	***E***	*E*	*TB*	*TB*	*B*
	TB	*E*	*TB*	*B*	*B*
	B	*TB*	*TB*	*B*	*M*
	M	*TB*	*B*	*M*	*M*

Figure 7 : représentation du jeu de règles

En reprenant notre exemple, à $t = 7 semaines$ avec une pertinence donnée par l'équation (5), on dispose des 3 descriptions floues suivantes - les deux premières résultent de la partition floues de la figure 6, la troisième est donnée par l'équation (5) :

$$\begin{cases} D(p(capacité,7)) = 0.32/E + 0.68/TB + 0/B + 0/M \\ D(\hat{p}(capacité,7)) = 0/E + 0.9/TB + 0.1/B + 0/M \\ pert(capacité,7) = 0.57/Faible + 0.43/Modérée + 0/Forte \end{cases} \quad (7)$$

Le calcul de la performance corrigée s'effectue grâce à la règle compositionnelle d'inférence de Zadeh [Zadeh, 1973] qui peut s'exprimer comme suit dans le cas général d'une variable v :

$$\forall D_l \in L, \mu_{p_{corr}(v,t)}(D_l) = \underset{(A_i,B_j,C_k)\in L\times L\times L'}{\perp} \mathrm{T}(\mu_{D(p(v,t))}(A_i), \mu_{D(\hat{p}(v,t))}(B_j), \mu_{pert(v,t)}(C_k), \mu_\Gamma(A_i,B_j,C_k,D_l)) \quad (8)$$

Dans l'équation (8), $\mu_\Gamma(A_i,B_j,C_k,D_l)$ est une information fournie par le jeu de règles. Elle est booléenne quand le jeu de règles n'est pas pondéré, ce qui est le cas ici. A titre d'exemple, pour la case grisée de la figure 7, on a $\mu_\Gamma(M,TB,Forte,B) = 1$ car ces quatre termes sont en relation par le jeu de règles. Par contre on a, par exemple, $\mu_\Gamma(M,TB,Forte,TB) = 0$ car le jeu de règles ne relie pas ces quatre termes linguistiques.

Les notations $\perp$ et T correspondent respectivement à des opérateurs de disjonction et de conjonction flous, appelés co-norme et norme triangulaires. Classiquement les opérateurs *max* et *min* sont utilisés mais d'autres couples peuvent être utilisés comme :

$\forall x, y \in [0,1]\times[0,1], \perp(x,y) = \min(x+y,1)$ et $\mathrm{T}(x,y) = x.y$.

Ces opérateurs présentent l'intérêt de préserver une propriété des partitions utilisées, appelées partitions de Ruspini [Ruspini, 1969], qui est d'avoir une somme des degrés d'appartenance des ensembles flous linguistiques égale à 1.

Avec ces opérateurs et cette condition, l'équation (8) devient :

$$\forall D_l \in L, \mu_{p_{ag}}(D_l) = \sum_{(A_i,B_j,C_k)\in L\times L\times L'} \mu_{D(p(v,t))}(A_i), \mu_{D(\hat{p}(v,t))}(B_j), \mu_{pert(v,t)}(C_k), \mu_\Gamma(A_i,B_j,C_k,D_l)) . \quad (9)$$

En utilisant les valeurs données à l'équation (7) ainsi que le jeu de règles, on obtient la performance agrégée sous la forme de l'ensemble flou suivant :

$$p_{corr}(capacité,7) = 0.31/E + 0.69/TB + 0/B + 0/M$$

Comme on peut le constater, la performance prédictive étant *Très Bonne* mais avec une pertinence entre *Modérée* et *Faible*, son effet n'induit qu'un très léger décalage de la performance instantanée de *E* vers *TB*.

5 L'EXPRESSION DE LA PERFORMANCE TENDANCIELLE

Comme nous venons de le voir, la performance prédictive peut être exploitée pour corriger la performance instantanée. Elle présente l'inconvénient d'être peu pertinente lorsque l'on est loin de la fin du plan d'action, la performance instantanée est alors seule prise en compte. Or cette dernière n'est relative qu'à un instant donné et ne prend pas en compte l'évolution locale. La figure 8 illustre une situation où la performance instantanée peut être considérée comme très bonne, voire excellente, mais où l'on comprend, intuitivement, qu'elle est en phase de dégradation.

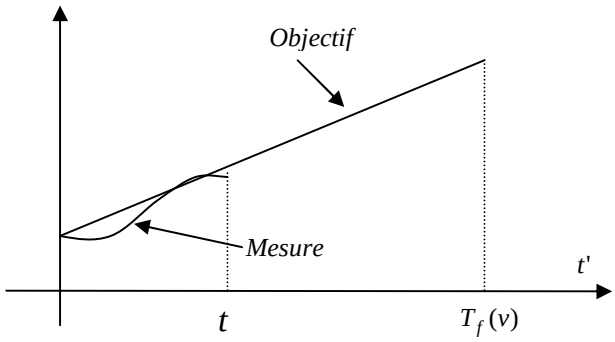

Figure 8 : situation où la performance est très bonne mais en cours de dégradation

L'idée que nous avons développée consiste à exploiter le comportement local de l'objectif et de la mesure pour préciser davantage la correction de la performance instantanée. Pour cela nous proposons de comparer la tendance de l'objectif avec la tendance de la mesure, comparaison qui fournit une nouvelle expression de performance que nous avons appelée performance tendancielle.

L'utilisation de la tendance ou plus généralement d'informations qualitatives est une idée assez ancienne qui a été en vogue dans les années 60 en économie qualitative [Lancaster, 1962] où les signes de paramètres ont été utilisés pour représenter les propriétés d'un système. Les années 80 ont vu l'émergence d'un courant de pensée très actif en physique qualitative [Hayes, 1979], [Forbus, 1984], [Kuipers, 1986] dont une extension aux ordres de grandeur flous a été proposée par Dubois et Prade [Dubois et Prade, 1989]. Nous reprenons l'idée générale de considérer que la tendance est une information qualitative sur la variation d'une grandeur. Pour cela, nous utilisons un ensemble de termes linguistiques, dont les significations floues forment une partition floue de la variation. A titre d'exemple la figure 9 représente une telle partition avec 7 termes linguistiques pour une variation entre -2500 et + 2500. Les termes linguistiques sont pris dans l'ensemble $L''=\{NG, NM, NP, Z, PP, PM, PG\}$ avec *NG* pour *Négatif Grand*, *NM* pour *Négatif Moyen*, *NP* pour *Négatif Petit*, *Z* pour *Zéro*, *PP* pour *Positif Petit*, *PM* pour *Positif Moyen* et *PG* pour *Positif Grand*.

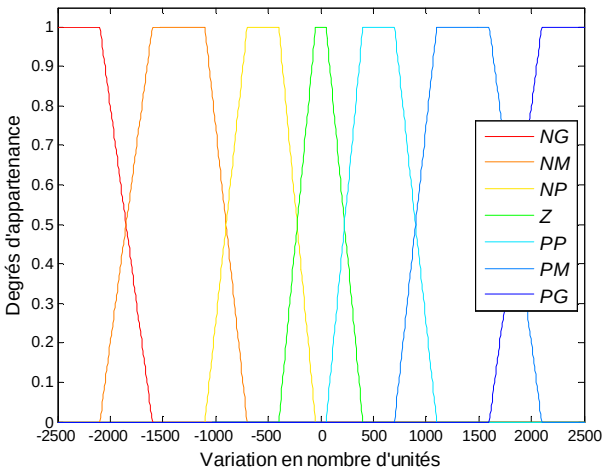

Figure 9 : exemple de partition floue pour les variations d'une grandeur

A partir de ces notions il devient possible de définir formellement la tendance comme suit :

Définition 5: soient u une quantité associée à la variable $v \in V$ et L'' un ensemble de termes dont les significations floues forment une partition floue. On appellera tendance de u à l'instant t la description floue de la variation de u, i.e. le sous-ensemble flou de L'' défini par $Tr(u,t) = D(\Delta(u,t))$.

La performance tendancielle est le résultat de la comparaison de la tendance de l'objectif, *i.e.* $Tr(q,t)$, et de celle de la mesure, *i.e.* $Tr(m,t)$. Parmi les différentes manières d'effectuer cette comparaison, nous avons privilégié le choix d'une approche linguistique. Celui-ci est lié à la manière naturelle qu'ont les décideurs d'exprimer les choix en langage naturel. En leur proposant de qualifier la performance tendancielle avec les termes de l'ensemble *L'* = {*Mauvaise*, *Bonne*, *Très Bonne*, *Excellente*}, nous aboutissons rapidement au jeu de règles représenté sous forme de tableau à la figure 10. Ce tableau a été construit à partir de sa diagonale où la performance tendancielle est *Excellente* si les deux tendances sont identiques.

		Tr(m, t)						
		NG	***NM***	***NP***	***Z***	***PP***	***PM***	***PG***
Tr(q, t)	***PG***	*M*	*M*	*M*	*M*	*B*	*TB*	*E*
	PM	*M*	*M*	*M*	*B*	*TB*	*E*	*TB*
	PP	*M*	*M*	*B*	*TB*	*E*	*TB*	*B*
	Z	*M*	*B*	*TB*	*E*	*TB*	*B*	*M*
	NP	*B*	*TB*	*E*	*TB*	*B*	*M*	*M*
	NM	*TB*	*E*	*TB*	*B*	*M*	*M*	*M*
	NG	*E*	*TB*	*B*	*M*	*M*	*M*	*M*

Figure 10 : jeu de règles pour la comparaison des tendances de l'objectif et de la mesure

Toutefois, après discussions avec les décideurs il est ressorti que la symétrie de la table par rapport à la diagonale ne reflétait pas complètement leur analyse de la situation. En effet, les deux cases grisées du tableau conduisent à une performance tendancielle identique. Pourtant, toutes choses étant égales par ailleurs, le couple (*PP*, *Z*) correspond à une mesure qui s'éloigne de l'objectif tandis que le couple (*PP*, *PM*) correspond au cas où elle se rapproche. Pour prendre en compte cette nuance, nous avons proposé d'étendre l'ensemble des termes *L'* en introduisant des nuances, notées « + » et « - » pour représenter respectivement le rapprochement ou l'éloignement de l'objectif. Le jeu de règles final est donné à la figure 11 où l'on utilise l'ensemble abrégé $L'''=\{M^-, B^-, TB^-, E, TB^+, B^+, M^+\}$.

		Tr(m, t)						
		NG	***NM***	***NP***	***Z***	***PP***	***PM***	***PG***
Tr(q, t)	***PG***	M^-	M^-	M^-	M^-	B^-	TB^-	E
	PM	M^-	M^-	M^-	B^-	TB^-	E	TB^+
	PP	M^-	M^-	B^-	TB^-	E	TB^+	B^+
	Z	M^-	B^-	TB^-	E	TB^+	B^+	M^+
	NP	B^-	TB^-	E	TB^+	B^+	M^+	M^+
	NM	TB^-	E	TB^+	B^+	M^+	M^+	M^+
	NG	E	TB^+	B^+	M^+	M^+	M^+	M^+

Figure 11 : jeu de règles final pour la comparaison des tendances de l'objectif et de la mesure

Le calcul de la performance tendancielle s'effectue selon le même principe qu'au paragraphe précédent.

$$\forall C_k \in L''', \mu_{p_{tend}}(C_k) = \sum_{(A_i,B_j)\in L''\times L''\times L'} \mu_{D(Tr(q,t))}(A_i).\mu_{D(Tr(m,t))}(B_j).\mu_\Gamma(A_i,B_j,C_k))$$

A titre d'exemple, supposons que la variation de q et m soient respectivement $\Delta(q,t) = 1000\,pièces$ et $\Delta(m,t) = 230\,pièces$. Les tendances de q et m sont respectivement :

$$Tr(q,t) = 0/NG + ... + 0/Z + 0.25/PP + 0.75/PM + 0/PG$$

$$Tr(m,t) = 0/NG + ... + 0.49/Z + 0.51/PP + 0/PM + 0/PG$$

La performance tendancielle est alors :

$$p_{tend}(capacité,7) = 0.13/E + 0.51/TB^- + 0.36/B^- + 0/M^- + ...$$

Comme on peut le constater la variation de la mesure est plus faible que celle de l'objectif, mais les valeurs sont relativement proches, ce qui conduit à une performance tendancielle entre *Très Bonne* et *Bonne* mais en décroissance.

5.1 Agrégation de la performance instantanée corrigée et de la performance tendancielle

La performance instantanée corrigée et la performance tendancielle sont deux informations complémentaires qui peuvent être agrégées afin de fournir au décideur une information unique représentant mieux la situation. En effet, on peut distinguer quatre situations caractéristiques de l'évolution temporelle de la mesure par rapport à celle de l'objectif qui sont représentées à la figure 12. Le cas (*a*) correspond à une excellente performance instantanée corrigée mais une mauvaise performance tendancielle. Le cas (*b*) est le cas réciproque. Le cas (*c*) est relatif à une mauvaise performance instantanée corrigée mais aussi tendancielle. Enfin, le cas (*d*) est celui qui correspond à ce vers quoi le plan d'action devrait conduire, à savoir une excellente performance instantanée corrigée et une excellente performance tendancielle.

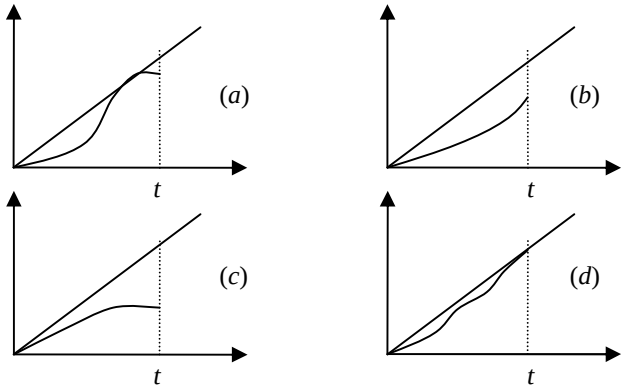

Figure 12 : les cas comportements locaux typiques

L'agrégation de la performance instantanée corrigée et de la performance tendancielle peut être réalisée à nouveau à l'aide d'un jeu de règles comme celui représenté à la figure 13.

		$p_{tend}(v, t)$						
		M^-	B^-	TB^-	E	TB^+	B^+	M^+
$p_{corr}(v, t)$	E	M	B	TB	E	E	E	E
	TB	M	M	B	TB	TB	TB	E
	B	M	M	M	B	B	B	TB
	M	M	M	M	M	M	M	B

Figure 13 : jeu de règles pour l'agrégation de la performance instantanée et de la performance tendancielle

A nouveau, le calcul s'effectue comme précédemment. En agrégeant la performance instantanée corrigée et la performance tendancielle, on obtient la performance que nous qualifions de synthétique :

$$p_{synth}(capacité,7) = 0.04/E + 0.25/TB + 0.46/B + 0.25/M \ .$$

Ce résultat est à comparer avec la description floue initiale de la performance instantanée donnée à l'équation (7), soit : $D(p(capacité,7)) = 0.32/E + 0.68/TB + 0/B + 0/M$. L'effet de la performance tendancielle entre *Bonne* et *Très Bonne* mais en décroissance est mis en évidence par un décalage significatif de la performance vers *Bonne*.

En guise de synthèse, l'ensemble du processus de calcul de la performance temporelle est représenté à la figure 14.

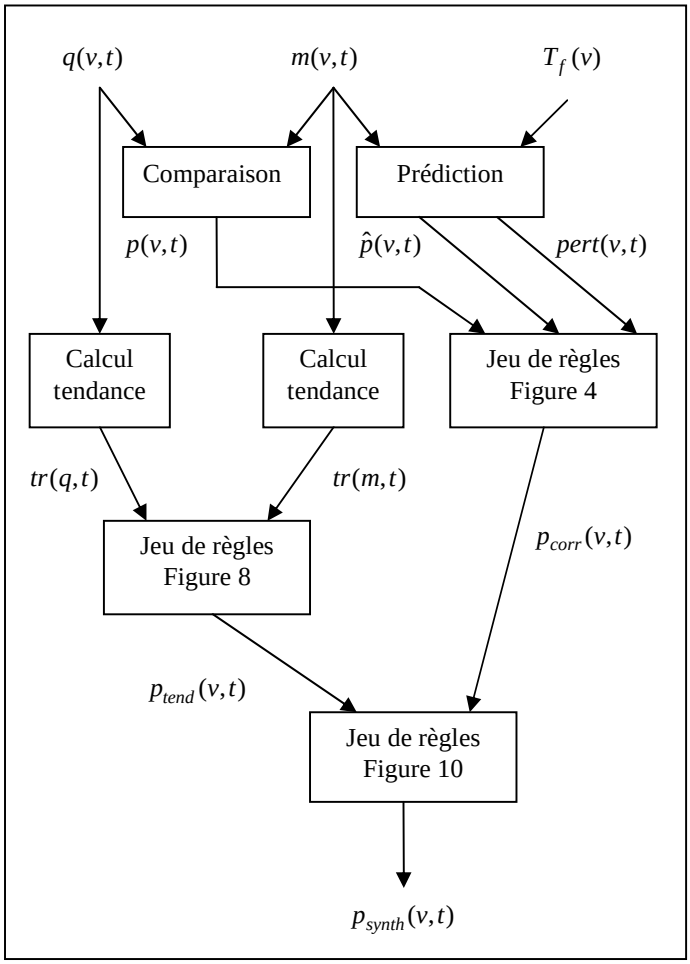

Figure 14 : synthèse du calcul de la performance temporelle

6 CONCLUSION

Prendre en compte le temps dans l'évaluation de la performance des processus industriels peut avoir plusieurs déploiements. Il peut s'agir de cycle de vie, de dynamique de systèmes, de planification… Il nous semble que le point commun à tous ces points de vue reste une forme d'évolution temporelle de la grandeur considérée, que cela soit le système physique ou les informations qui le caractérisent.

Nous avons fait le choix dans cet article de considérer l'évolution temporelle du concept même de performance. Nos réflexions nous ont menés à postuler que l'expression d'une performance à tout instant ne pouvait, à elle seule, traduire cette évolution. Nous avons introduit dans ce sens deux formes supplémentaires de performance, assez intuitives au demeurant, la performance prédictive et la performance tendancielle.

Les performances instantanée, prédictive et tendancielle ont des sémantiques différentes mais complémentaires au regard de l'évolution temporelle. Exploitant cette complémentarité, nous

avons proposé un mécanisme qui permet l'ajustement, à tout instant, de la performance obtenue, selon, la manière dont ce résultat a été obtenu et les résultats à venir.
Cette première approche est en cours de validation auprès de nos partenaires industriels, dans l'objectif d'être intégrée, sous formes de fonctionnalités nouvelles, aux PMS actuels.

7 REFERENCES

[Anthony, 1965] Anthony, R. (1965). *Planning and control systems: a framework for analysis*. Boston, Graduate School of Business Administration, Harvard University.

[Berrah et Foulloy, 2013] Berrah, L. Foulloy, L. (2013). Towards a unified descriptive framework for industrial objective declaration and performance measurement. *Computers in Industry*, 64(6):650 – 662.

[Berrah et al., 2000] Berrah, L., Mauris, G., Haurat, A., Foulloy, L. (2000). Global vision and performance indicators for an industrial improvement approach. *Computers in Industry*, 43(3):211–225.

[Bititci, 1995] Bititci, U. S. (1995). Modelling of performance measurement systems in manufacturing enterprises. *International Journal of Production Economics*, 42:137–147.

[Clivillé et al., 2007] Clivillé, V., Berrah, L., Mauris, G. (2007). Quantitative expression and aggregation of performance measurements based on the MACBETH multi-criteria method. *International Journal of Production Economics*, 105(1):171–189.

[Comoglio et Botta, 2012]Comoglio, C. Botta, S. (2012). The use of indicators and the role of environmental management systems for environmental performances improvement: a survey on {ISO} 14001 certified companies in the automotive sector. *Journal of Cleaner Production*, 20(1):92 – 102.

[Deming, 1982] Deming, E. (1982). *Quality, Productivity and Competitive Position*. The MIT Press.

[Dubois et Prade, 1989] Dubois, D. Prade, H. (1989). Fuzzy arithmetic in qualitative reasoning. In Blaquière, A., editor, *Modeling and Control of Systems in Engineering, Quantum Mechanisms, Economics and Biosciences, Lecture Notes in Control and Information Sciences*, pages 457–467. Springer Verlag.

[Ducq et al., 2001] Ducq, Y., Vallespir, B., Doumeingts, G. (2001). Coherence analysis methods for production systems by performance aggregation. *International Journal of Production Economics*, 1:23–37.

[Forbus, 1984] Forbus, K. (1984). Qualitative process theory. *Artificial Intelligence*, 24:85–168.

[Hammer et Champy, 1993] Hammer, M. Champy, J. (1993). Dunod.

[Hayes, 1979] Hayes, P. J. (1979). The naive physics manifesto. In Michie, D., editor, *Expert Systems in the Micro-Electronic Age*, pages 242–270. Edinburgh University Press, Edinburgh.

[Hronec, 1995] Hronec, S. (1995). *Vital signs : des indicateurs - coûts, qualité, délais - pour optimiser la performance de l'entreprise*. Editions d'Organisation.

[Imai, 1986] Imai, M. (1986). *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*. McGraw Hill Higher Education.

[Johnson, 1975] Johnson, H. (1975). Management accounting in early integrated industry - e.i. dupont de nemours powder company 1903-1912. *Business History Review*, pages 184–204.

[Kuipers, 1986] Kuipers, B. (1986). Qualitative simulation. *Artificial Intelligenc*, 29(29):289–338.

[Lancaster, 1962]Lancaster, K. (1962). The scope of qualitative economics. *The Review of Economic Studies*, 29(2):99–123.

[Neely et al., 2000] Neely, A., Mills, J., Platts, K., Richards, H., Gregory, M., Bourne, M., Kennerley, M. (2000). Performance measurement system design: developing and testing a process-based approach. *International Journal of Operations & Production Management*, 20(10):1119–1145.

[Nudurupati et al., 2011] Nudurupati, S. S., Bititci, U. S., Kumar, V., Chan, F. T. S. (2011). State of the art literature review on performance measurement. *Computers & Industrial Engineering*, 60(2):279–290.

[Ohno, 1988] Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: Beyond Large-scale Production*. Production Press.

[Pinheiro de Lima et al., 2013] Pinheiro de Lima, E., da Costa, S. E. G., Angelis, J. J., Munik, J. (2013). Performance measurement systems: A consensual analysis of their roles. *International Journal of Production Economics*, 146(2):524 – 542.

[Pujo et Kieffer, 2002] Pujo, P. Kieffer, J., editors (2002). *Fondements du pilotage des systèmes de production*. Hermès.

[Pydzek et Keller, 2001] Pydzek, T. Keller, P. (2001). *The six-sigma handbook*. McGraw-Hill Professional.

[Ruspini, 1969] Ruspini, E. (1969). A new approach to clustering. *Information and Control*, 15(1):22–32.

[Takagi et Sugeno, 1985] Takagi, T. Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, SMC-15(1):116–132.

[Taylor, 1911] Taylor, F. (1911). *Principles of Scientific Management*. Harper Bros.

[Vernadat et al., 2013] Vernadat, F., Shah, L., Etienne, A., Siadat, A. (2013). Vr-pms: a new approach for performance measurement and management of industrial systems. *International Journal of Production Research*, 51(23-24):7420–7438.

[Wholey, 1996] Wholey, J. (1996). Formative and summative evaluation: related issues in performance measurement. *Evaluation Practice*, 17(2):145–149.

[Wiseman, 1988] Wiseman, C. (1988). *Strategic Information Systems*. Dow-Jones Irwin, Homewood IL.

[Womack et al., 1990] Womack, J., Jones, D., Roos, D. (1990). *The Machine that Changed the World: Based on the Massachusetts Institute of Technology 5-million Dollar 5-year Study on the Future of the Automobile*. Free Press paperbacks. Rawson Associates.

[Zadeh, 1965] Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:38–353.

[Zadeh, 1971] Zadeh, L. (1971). Quantitative fuzzy semantics. *Information Sciences*, 3:159–176.

[Zadeh, 1973] Zadeh, L. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3:28–44.