HAL
open science

IMPACT D'UNE EXPRESSION DE PERFORMANCE ELEMENTAIRE SUR L'EXPRESSION DE PERFORMANCE AGREGEE : UNE APPROCHE PAR L'INTEGRALE DE CHOQUET

L Berrah, V Cliville, H Verjus, R Gandia

To cite this version:

L Berrah, V Cliville, H Verjus, R Gandia. IMPACT D'UNE EXPRESSION DE PERFORMANCE ELEMENTAIRE SUR L'EXPRESSION DE PERFORMANCE AGREGEE : UNE APPROCHE PAR L'INTEGRALE DE CHOQUET. MOSIM 2020 (13ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation), Nov 2020, Agadir, Maroc. hal-02960911

HAL Id: hal-02960911

https://hal.science/hal-02960911v1

Submitted on 3 Feb 2021

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

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

IMPACT D'UNE EXPRESSION DE PERFORMANCE ELEMENTAIRE SUR L'EXPRESSION DE PERFORMANCE AGREGEE : UNE APPROCHE PAR L'INTEGRALE DE CHOQUET

L. BERRAH, V. CLIVILLE, H. VERJUS

LISTIC Université Savoie Mont-Blanc
74944 Annecy le Vieux Cedex - France
vincent.cliville@univ-savoie.fr, lamia.berrah@univ-savoie.fr, herve.verjus@univ-savoie.fr

R. GANDIA

IREGE Université Savoie Mont-Blanc
74944 Annecy le Vieux Cedex - France
romain.gandia@univ-savoie.fr

RESUME : *Cet article traite de la notion d'impact d'une expression de performance élémentaire sur une expression de performance globale, sachant une relation d'agrégation entre les deux expressions. Lorsque l'agrégation est fondée sur un opérateur mathématique tel que la moyenne pondérée, le calcul de cet impact est immédiat. Il n'en est pas de même pour des agrégations fondées sur des opérateurs plus complexes, lesquels, en l'occurrence, considèrent non seulement les poids mais aussi les interactions entre les expressions élémentaires. Partant d'un modèle d'agrégation par l'Intégrale de Choquet (IC), nous cherchons dans cette étude à définir cet impact. Quantifié sur l'univers de discours de l'expression agrégée, l'impact prend en compte la valeur de l'expression élémentaire considérée ainsi que ses liens avec les autres expressions impliquées dans l'agrégation. Après un bref rappel de l'évolution des SIP (Systèmes d'Indicateurs de Performance) en milieu industriel, une description des fondamentaux de l'agrégation par l'IC est présentée. La définition de l'impact est alors argumentée et formalisée. La proposition est illustrée à partir d'une exploitation d'un modèle d'agrégation précédemment développé chez un partenaire industriel, leader mondial de l'automation. Des perspectives concluront finalement cette étude.*

MOTS-CLES : *Systèmes d'Indicateurs de Performance (SIP), Agrégation, Intégrale de Choquet (IC), Impact.*

1 INTRODUCTION

Un Indicateur de Performance (IP) identifie l'association d'un objectif, d'une mesure et d'un critère. Il est l'outil qui établit le lien entre l'objectif (état espéré associé au critère), la mesure (état atteint) et l'action menée dans ce sens (Berrah et al., 2018). L'IP fournit alors ladite expression de performance qui renseigne le pilotage de la satisfaction liée à l'atteinte de l'objectif. Cette expression s'est vue totalement changer de paradigme pour les systèmes industriels. Son mode de calcul a évolué d'un modèle simplifié, additif et monocritère vers un modèle complexe, systémique et multicritère. En effet, à l'ère du Taylorisme (entreprise 2.0), des IP productivistes, basés sur le critère Coût, avaient été définis, conformément à la pyramide de Dupont de Nemours (Johnson, 1975). L'expression de la performance globale, *i.e.* celle de l'ensemble du système industriel, se calculait sur le principe d'une somme des expressions élémentaires, retournées par les IP associés aux postes les plus élémentaires du système. Les informations retournées par les IP avaient pour vocation le contrôle de l'atteinte des objectifs de productivité. L'impact de chaque expression élémentaire était obtenu par simple opération de *ratio*. Quasi-redondant avec l'expression associée, cet impact permettait l'analyse de l'efficience du moyen (homme et équipement) utilisé. Quant à l'expression globale, elle donnait lieu à des recherches d'optimisation de l'enveloppe budgétaire globale.

Avec l'Industrie 3.0 (Bitteau and Bitteau, 1998), la définition des IP s'est progressivement élargie aux critères de Qualité et de Délai, induisant des interactions entre les IP associés. L'expression de la performance industrielle devint ainsi fondée sur le fameux triptyque C-Q-D (Ducq et al., 2001). Des méthodologies de définition de tableaux de bord ont été proposées, telles le *Balanced ScoreCard* (BSC) (Kaplan and Norton, 2001). Plus généralement, la notion de Système d'Indicateurs de Performance (SIP) (*Performance Measurement Systems* (PMS)) (Neely, 2005) (Nudurupati et al., 2011) était née, pour la prise en compte de la dimension multicritère de l'expression de la performance. Les SIP prônaient une prise en compte « intégrée » des différents IP et devenaient un outil d'aide au pilotage. Réactif, ce pilotage allait ainsi au-delà du contrôle taylorien. L'expression de la performance globale se calculait à partir de l'agrégation des expressions élémentaires associées aux IP impliqués (Globerson, 1985) (Bititci et al., 2001) (Clivillé et al., 2007) (Lauras et al., 2010). Le modèle additif a alors laissé place à des modèles de compromis, induisant des questions de décomposition d'objectif et de choix d'opérateur d'agrégation. Des contraintes de commensurabilité du fait de la nature différente des critères ont été également à prendre en compte. La part de chaque critère dans les résultats globaux ainsi que les interactions avec les autres critères étaient dans ce cas moins simples à déduire que dans le cas additif. L'analyse reposait essentiellement sur des explications *a posteriori* fournies par des données extérieures au SIP.

Le pilotage disposait alors d'une vue synthétique (par l'expression agrégée) et de vues locales (par les expressions élémentaires) de la performance du système industriel considéré ; avec une possible caractérisation des liens entre elles. En effet, depuis une vingtaine d'années, des modèles fondés sur l'Intégrale de Choquet (IC) (Labreuche and Grabisch, 2003) ont été proposés (Clivillé et al., 2007) (Shah et al., 2016). Opérateur de la famille des moyennes, l'IC offre la possibilité de réaliser une agrégation des expressions de performance sur la base d'une prise en compte des liens entre celles-ci, à savoir des importances et des interactions. Cet opérateur de moyenne généralisée peut en particulier se décliner selon son paramétrage comme une moyenne pondérée, un opérateur *min*, un opérateur *max*, l'opérateur *Ordered Weighted Average* (OWA) selon son paramétrage. Une quantification des expressions élémentaires et de l'expression agrégée résulte du mécanisme. Un modèle explicatif des résultats atteints est ainsi fourni au pilotage (Berrah 2019). La cohérence du mécanisme utilisé est garantie grâce à des méthodologies proposées par l'école de la prise de décision multicritère (*MultiCriteria Decision Aiding* MCDA), telles que, pour celles connues en milieu industriel, MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation TecHnique*) (Bana e Costa et al., 2012) ou AHP (*Analytic Hierachy Process*) (Saaty, 1977).

Plus tard, des politiques d'industrialisation fondées sur des notions comme le Développement Durable (DD) (Sikdar, 2003), la Responsabilité Sociale et Environnementale (RSE) (ISO 26000) ou l'économie circulaire (Rossa et al., 2019) ont vu le jour, introduisant des critères tels que ceux liés à l'environnement, la sécurité ou le bien-être humain. Aujourd'hui, à l'ère de l'Industrie 4.0, les critères précédents demeurent (Dalenogare et al., 2018) et s'étendent à des critères traitant de cette introduction du numérique (Atik and Ünlü, 2019) (Büchi et al., 2020). La question des liens prend d'autant plus d'importance en la présence de critères « complexes ». Ces derniers couvrent l'ensemble du système industriel, et ce, dans toutes les étapes de son cycle de vie ; avec une décomposition qui n'obéit pas aux règles hiérarchiques classiques. L'innovation (Arnold and Voigt, 2016) (Frank et al., 2019) (Müller et al., 2018) en est un bon exemple. Revenue en force dans les mécanismes de transformation digitale vécus actuellement par les systèmes industriels (Reischauer, 2018), la préoccupation d'intégrer l'innovation dans les tableaux de bord n'est toutefois pas récente (Kueng, 2000). Mais sa portée dépasse le système industriel et ses interactions avec les critères qui y sont impliqués sont difficilement identifiables.

S'inscrivant plus particulièrement dans la continuité des modèles d'agrégation basés sur l'IC, nous proposons dans cet article d'enrichir les informations données par le modèle d'agrégation au pilotage, par une information supplémentaire : l'impact d'une expression de performance élémentaire sur l'expression agrégée. L'idée est de chercher à retrouver dans l'expression de la performance agrégée l'influence de chacune des expressions de performance élémentaires. La notion d'impact offre en effet plusieurs avantages. Elle présente l'intérêt d'une information explicite et directement exploitable pour le pilotage. Elle permet également, dans un modèle qui se veut compensatoire, de faire ressortir clairement la part de chaque IP dans le SIP global.

L'objectif de cet article est donc l'introduction de la notion d'impact dans un modèle d'agrégation. Pour ce faire, un retour sur l'agrégation dans la performance industrielle par l'IC est effectué dans un premier temps. Par la suite, une exploitation de ce modèle pour la proposition de quantification de la notion d'impact est introduite. En guise d'application, une agrégation menée précédemment chez un partenaire industriel est considérée. Enfin, des perspectives à cette réflexion concluront ce travail.

2 L'AGREGATION PAR L'IC

2.1 Généralités sur l'agrégation

De manière générale, l'agrégation, qualifiée d'approche à critère unique de synthèse, « *consiste à prendre appui sur une règle apportant une réponse synthétique exhaustive et définitive au problème de l'agrégation des performances. Elle prend la forme d'un critère unique de synthèse agrégeant les n critères de la famille par le biais d'une fonction d'agrégation.* » (Roy, 1993).

L'agrégation peut être formalisée par la fonction :

$$\begin{aligned} &Ag: \quad E_1 \times E_2 \times ... E_i \times ... E_n \times \rightarrow E \\ &(p_1 ... p_i ... p_n) \rightarrow p_{\mathbf{Ag}} = Ag(p_1 ... p_i ... p_n) \end{aligned} \tag{1}$$

où chaque expression de performance élémentaire p_i $i = 1$ à n est définie sur un univers de discours E_i et l'expression de la performance agrégée p_{Ag} est définie sur l'univers de discours E (Berrah et al., 2011).

Le mécanisme d'agrégation doit respecter des conditions établies dans la théorie du mesurage, en particulier la commensurabilité des p_i et la signifiance de l'opérateur d'agrégation vis-à-vis de ces expressions (Krantz et al., 1971). Deux expressions de performance élémentaires p_i et p_j sont commensurables si l'égalité $p_i = p_j$ implique qu'elles réalisent un même degré d'atteinte de l'objectif auquel elles se rattachent. En l'occurrence, la normalisation des p_i sur des intervalles $[0,1]$ garantit la commensurabilité de ces expressions pour $p_i = p_j = 0$ et pour $p_i = p_j = 1$. Par ailleurs, un opérateur d'agrégation est signifiant pour un ensemble p_i si les opérations mathématiques exécutées ont un sens. Par exemple, il n'y a pas de sens à additionner le rang des p_i comme peut le faire la méthode de Borda[1]. Par contre, il y a un

[1].http://gerardgreco.free.fr/IMG/pdf/MA_c_moire-Borda-1781.pdf

sens à additionner des p_i définies suivant des échelles d'intervalle[2].
Garantir ces conditions mène à l'utilisation d'une procédure qui permet de définir dans un cadre mathématiquement fondé, des p_i commensurables d'une part et les paramètres de l'opérateur d'agrégation signifiant d'autre part (Grabisch et al., 2011). Bon nombre de méthodes d'aide à la décision multicritère ont été introduites pour ce faire. La méthode MACBETH en fait partie.

2.2 Procédure MACBETH pour l'agrégation

Le choix de MACBETH permet d'identifier de façon cohérente les paramètres de l'IC conformément aux exigences de commensurabilité et de signifiance de la théorie du mesurage (Fishburn 2001). Apparue dans les années 1990, MACBETH reprend la philosophie de la méthode AHP dans le principe d'identifier, par expertise, les informations requises pour réaliser l'agrégation. La collecte de l'expertise se fait sous forme d'identification des « préférences » du pilote relativement à des « situations » prédéfinies. Ces situations véhiculent une connaissance que le pilote a de son système. Elles peuvent être décrites par les vecteurs $(p_1 ... p_i ... p_n)$. A l'issue d'un questionnement du pilote quant à ses préférences par rapport aux situations considérées, un système de relations (équations et inéquations) est obtenu. La résolution de ce système permet de :

- quantifier les p_i. Ces p_i seront définies selon des échelles d'intervalle, ce qui garantit leur commensurabilité (Bana e Costa and Vansnick, 1997) ; les échelles sont bornées par deux valeurs : la borne inférieure pour laquelle $p_i = 0$ correspond à une satisfaction nulle par rapport à l'atteinte de l'objectif, et la borne supérieure pour laquelle $p_i = 1$ correspond à une satisfaction totale par rapport à l'atteinte de l'objectif ;
- quantifier les liens entre p_i et p_{Ag} selon l'opérateur retenu. MACBETH retient généralement la moyenne pondérée (*Weighted Arithmetic Mean* WAM) pour sa simplicité d'usage ou l'IC pour sa richesse en informations, chacun des deux opérateurs étant signifiant pour des p_i définies selon des échelles d'intervalle (Clivillé et al., 2007), (Mayag et al., 2011) ;
- calculer p_{Ag}.

Le lecteur pourra se reporter à (Bana e Costa et al., 2012) et (Clivillé et al. , 2007) pour de plus amples détails concernant ces deux étapes ; le propos de cet article étant sur un autre point. Le paragraphe ci-dessous traite de la seule dernière étape de calcul de l'expression agrégée p_{Ag}.

[2] Les échelle de température Celsius et Fahrenheit sont des échelles d'intervalle. Pour ces échelles, la différence a un sens : $p_i - p_j = p_l - p_k$ ou $p_i - p_j < p_l - p_k$ ou $p_i - p_j > p_l - p_k$.

2.3 L'Intégrale de Choquet (IC) 2-additive

L'IC est un opérateur d'agrégation de $[0,1]^n \to [0,1]$ où n correspond au nombre de p_i $i = 1$ à n. Généralement, ce sont les interactions 2 à 2 des paires (p_i, p_j) qui sont considérées, les autres interactions étant négligeables. L'IC 2-additive (Grabisch, 1996) (Marichal, 2005) peut alors s'écrire sous la forme suivante :

$$p_{Ag} = \sum_{i=1}^{n} p_i v_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^{n} |p_i - p_j| I_{ij} \qquad (2)$$

avec $\left(v_i - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n} I_{ij} \right) \geq 0$ pour assurer la monotonie.
L'indice de Shapley v_i donne l'importance relative de p_i par rapport aux autres p_j avec $\left(\sum_{i=1}^{n} v_i = 1 \right)$.
Les coefficients d'interaction I_{ij} corrigent l'importance de (p_i, p_j) selon la différence $|p_i - p_j|$. Quand I_{ij} est positif (respectivement négatif), il réduit p_{Ag} (respectivement l'augmente).

Exemple (1)

Afin de comprendre le principe de calcul par l'IC, considérons l'exemple d'un vecteur d'expressions élémentaires (p_1, p_2, p_3). Imaginons alors les valeurs suivantes : $p_1 = 0,32$, $p_2 = 0,72$ et $p_3 = 0,80$. Supposons les paramètres (identifiés par expertise) suivants (Tableau 1).

Indices de Shapley	v_1	v_2	v_3
	0,5	0,3	0,2
Coefficients d'Interaction	I_{12}	I_{13}	I_{23}
	0,4	0,2	0,2

Tableau 1 : Exemple de paramètres de l'IC

Le calcul de p_{Ag} donne :

$$\begin{aligned} p_{Ag} &= 0,32 \times 0,5 + 0,72 \times 0,3 + 0,80 \times 0,2 \\ &- \frac{1}{2} \times |0,32 - 0,72| \times 0,4 - \frac{1}{2} \times |0,32 - 0,80| \times 0,2 \\ &- \frac{1}{2} \times |0,72 - 0,80| \times 0,2 = 0,400 \end{aligned} \qquad (3)$$

3 PROPOSITION DE DEFINITION DE L'IMPACT DE p_i SUR p_{Ag}

3.1 La notion d'impact

Un modèle d'agrégation fondé sur l'IC fournit au pilotage trois sortes d'information : p_i $i = 1$ à n, p_{Ag} et la paire v_i et I_{ij}. Les deux types d'expressions de performance sont tous deux nécessaires et complémentaires pour agir localement (grâce à p_i) et conserver une vision globale (grâce à p_{Ag}). Les indices de Shapley et les coefficients d'interaction contiennent la connaissance sur la part de l'action locale à l'expression globale. Il demeure malgré tout une difficulté, de par la complexité de l'IC, dans la lecture de ce lien fait entre p_i (et par conséquent les actions menées pour atteindre l'objectif associé) et p_{Ag}. Le pilotage comprend p_i (par exemple $p_1 = 0,32$). Il lui est en revanche implicitement demandé de construire mentalement la part de cette valeur sur p_{Ag} (par exemple $p_{Ag} = 0,40$), sachant son importance relative ($v_1 = 0,5$) et ses interactions avec les autres p_j ($I_{12} = 0,4$ et $I_{13} = 0,2$).

Pour pallier cette difficulté, la notion de « contribution » de l'amélioration d'une expression élémentaire à l'amélioration de l'expression globale a été proposée (Berrah et al., 2019). S'inscrivant dans le cadre dynamique des démarches d'amélioration, cette contribution a cherché à répondre à la question : *quel effet l'amélioration d'une p_i aura sur l'amélioration de p_{Ag}* ? L'idée portée par l'impact est similaire, cherchant à répondre, pour sa part, à la question : *quelle part prend p_i dans p_{Ag} ?*

Le terme impact a pour avantage une sémantique claire et un usage régulier en pilotage industriel. De manière générale, ce terme résonne avec les termes influence, effet, conséquence, dans une vision explicative d'un phénomène, d'un état, ici en l'occurrence l'expression de la performance globale du système industriel considéré. Il s'en distinguerait selon nous par la quantification implicite qu'il pourrait porter. Il s'agit en effet de préciser, de mesurer une influence, d'en connaitre la valeur et de la comparer à celle des autres expressions élémentaires.

Dans cette volonté de quantification, notre vision est de penser cet impact, dans le même univers que celui de l'expression de la performance globale, d'une manière la plus simple possible. Le résultat intuitif corollaire à cette hypothèse est que l'expression de la performance globale devient la somme des impacts des expressions de performances élémentaires. La complexité de la prise en compte des interactions et importances sera ainsi encapsulée dans cette quantification. L'impact devient une information « intégrée » et unique qui fournit au pilotage la part prise par p_i dans p_{Ag}.

3.2 Le calcul de l'impact

Comment calculer l'impact d'une expression élémentaire Imp_p_i sur p_{Ag}, sachant un modèle d'agrégation fondé sur l'IC et la contrainte d'un résultat défini sur l'univers de discours de p_{Ag} (pour que la somme de tous les impacts corresponde à p_{Ag}) ?

Pour un modèle d'agrégation fondé sur la WAM,

$$p_{Ag} = \sum_{i=1}^{n} w_i \times p_i \,. \tag{4}$$

le calcul de l'impact est immédiat. Imp_p_i ne dépend que de p_i et de w_i, poids de p_i dans p_{Ag} :

La propriété d'additivité des impacts nous ramène à la formule d'agrégation par la WAM. L'impact est une pondération de l'expression élémentaire.

$$Imp_p_i = w_i \times p_i \,. \tag{5}$$

our un modèle fondé sur l'IC, l'idée restera la même, à savoir la prise en compte de tous les termes de l'agrégation qui font intervenir p_i. Par conséquent, conformément à (2) :

$$Imp_p_i = p_i v_i - \frac{1}{4}\sum_{i=i,\,j=1}^{n} \left|p_i - p_j\right| I_{ij} \,. \tag{6}$$

Le $\frac{1}{4}$ s'explique par le caractère mutuel des interactions.

(2) peut s'écrire alors sous la forme :

$$p_{Ag} = \sum_{i=1}^{n} Imp_p_i \,. \tag{7}$$

Notons qu'il est également possible de calculer l'impact d'un sous-ensemble de p_i. En utilisant la propriété d'additivité, dans le cas de l'impact de $\{p_i p_j\}$:

$$\begin{aligned} Imp_\{p_i p_j\} &= Imp_p_i + Imp_p_j = \\ & p_i v_i + p_j v_j - \frac{1}{2}\left|p_i - p_j\right| I_{ij} - \frac{1}{4}\sum_{i=i,k\neq j,k=1}^{n}\left|p_i - p_k\right| I_{ik} \\ & - \frac{1}{4}\sum_{j=i,k\neq i,k=1}^{n}\left|p_j - p_k\right| I_{jk} \,. \end{aligned} \tag{8}$$

Exemple (2)

Pour l'illustration, considérons à nouveau l'exemple précédent. Conformément à (6), le calcul de Imp_p_i donne :

$$Imp_p_1 = p_1 v_1 - \frac{1}{4}\left(|p_1 - p_2| I_{12} + |p_1 - p_3| I_{13}\right) = 0{,}096 .$$

Imp_p_1 est faible car la part de p_1 est de $p_1 v_1 = 0{,}160$. Interviennent également I_{12} et I_{13} qui diminuent cette part de $\frac{1}{4}\left(|p_1 - p_2| I_{12} + |p_1 - p_3| I_{13}\right) = 0{,}054$. La figure 1 illustre ces résultats.

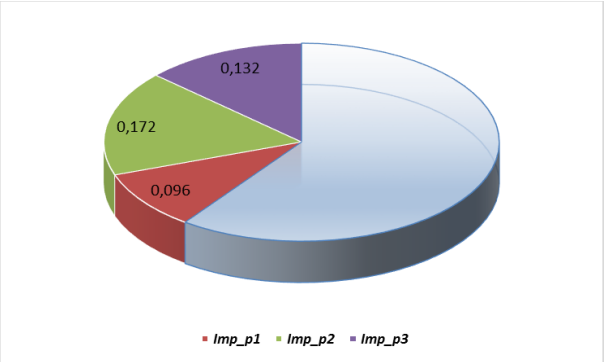

Figure 1 : L'impact des p_i sur p_{Ag}

Les impacts Imp_p_2 et Imp_p_3 sont calculés de la même façon. On a alors :

$$p_{Ag} = \sum_{i=1}^{n} Imp_p_i = 0{,}096 + 0{,}172 + 0{,}132 = 0{,}400 ,$$

et $Imp_\{p_1 p_2\} = 0{,}096 + 0{,}172 = 0{,}268$.

4 APPLICATION

4.1 Présentation

Adaptant son mode de pilotage aux préceptes du *Lean Manufacturing*, la Société R. B., leader mondial dans le domaine de l'automation, s'est dotée, il y a une dizaine d'années, d'un ensemble de méthodes et outils pour augmenter la réactivité de son pilotage. En particulier, le SIP mis en place autour de la production a été enrichi d'un modèle d'agrégation (de la performance) fondé sur l'IC (Berrah 2011). Les informations retournées permettaient d'une part, une vision globale des résultats atteints et d'autre part, une explication de ces résultats. Plus tard, avec l'avènement du management visuel, l'idée fut de transformer les résultats numériques en symboles faciles à interpréter (Berrah 2018). Il n'en restait pas moins que les explications fournies par le modèle *via* les indices de Shapley et les coefficients d'interaction demeuraient complexes, ce qui biaisait l'analyse en se focalisant sur les seules valeurs des expressions de performance.

Le modèle d'agrégation défini a mis en avant les liens entre les différents IP impliqués. Pour sa représentativité de la production et la criticité de son pilotage, notamment en matière de délai, la ligne de production de Vérins Hydrauliques (ligne VH) a été retenue. L'objectif (global) associé au *Temps de traversée* a été associé à quatre IP, conformément à la figure 2 et au tableau 2.

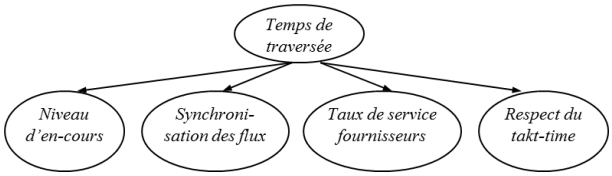

Figure 2 : La décomposition des objectifs de la ligne VH

	Niveau d'en-cours	*Synchronisation des flux*	*Taux de service des fournisseurs*	*Respect du takt-time*
Valeur de l'objectif	1 jour	0 jour	100%	1 heure

Tableau 2 : La valeur des objectifs

Le tableau 3 regroupe les paramètres de l'IC tels qu'ils avaient été obtenus (conformément à la procédure MACBETH § 2.2).

Indices de Shapley	ν_1	ν_2	ν_3	ν_4
	0,140	0,390	0,220	0,250
Coefficients d'Interaction		I_{12}	I_{13}	I_{14}
		0,107	0,071	0,071
		I_{23}	I_{24}	I_{34}
		0	0,143	0,214

Tableau 3 : Les paramètres de l'IC pour la ligne VH

Les expressions de performance obtenues (par (2)) sont : $p_1 = 0{,}330$ $p_2 = 0{,}400$ $p_3 = 0{,}580$ $p_4 = 0{,}150$ et $p_{Ag} = 0{,}284$.

Voyons comment la notion d'impact peut expliquer ces résultats.

4.2 Diagnostic à l'aide de l'impact

L'impact associé à chaque p_i est obtenu par l'application de (6) et illustré dans la figure 3. En l'occurrence :

$$Imp_p_1 = p_1 v_1 - \frac{1}{4}\left(|p_1 - p_2| I_{12} + |p_1 - p_3| I_{13} + |p_1 - p_4| I_{14}\right)$$
$$= 0{,}037$$

De la même façon :

$Imp_p_2 = 0{,}145,\ Imp_p_3 = 0{,}100,\ Imp_p_4 = 0{,}002$

.

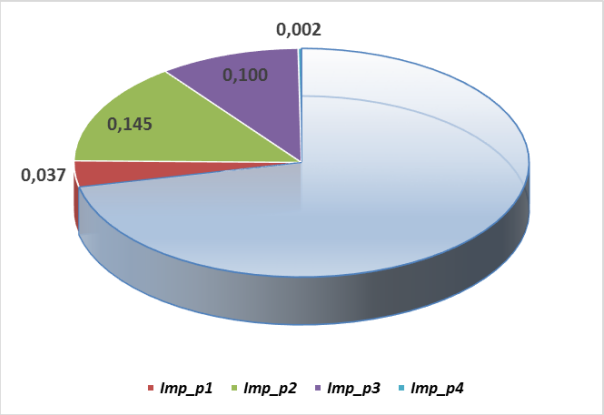

Figure 3 : Les Imp_p_i de la ligne VH.

Ainsi, la valeur atteinte pour l'expression de la performance globale de la ligne VH vient essentiellement de Imp_p_2 et de Imp_p_3. Imp_p_1 est très faible et Imp_p_4 est quasi-nul. Pour le pilotage, cette explication établie à partir des Imp_p_i conduit à cibler l'amélioration sur le *Niveau d'en-cours* et le *Respect du takt-time*. Alors que le diagnostic établi à partir des seules p_i conduit à cibler en priorité l'amélioration du seul *Respect du takt-time.*

Le tableau 4 regroupe p_i et Imp_p_i.

Expression de performance élémentaire	p_1	p_2	p_3	p_4
	0,330	0,400	0,580	0,150
Impact de l'expression de performance élémentaire	Imp_p_1	Imp_p_2	Imp_p_3	Imp_p_4
	0,037	0,145	0,100	0,002

Tableau 4 : Les p_i et Imp_p_i de la ligne VH

On peut voir dans ce tableau que l'expression de performance élémentaire la plus haute $p_3 = 0{,}58$ ne donne pas l'impact le plus grand, et que p_1 et p_2 qui sont assez proches ont des impacts très différents.

Par ailleurs, considérons une amélioration régulièrement menée par l'entreprise et qui cible le *Niveau d'en-cours* p_1 et le *Respect du takt-time* p_4. Il s'agit de diminuer les arrêts de production en formant les opérateurs à la gestion des micro-arrêts. Les p_i atteintes sont alors : $p_1 = 0{,}550$ $p_2 = 0{,}400$ $p_3 = 0{,}580$ $p_4 = 0{,}650$. Le nouveau calcul d'impact est illustré figure 4.

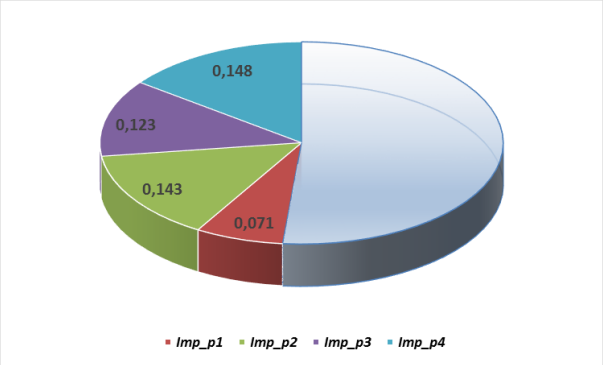

Figure 4 : Les Imp_p_i après amélioration.

Cette fois Imp_p_2, Imp_p_3 et Imp_p_4 sont assez équilibrés, Imp_p_1 reste moins élevé, principalement en raison de son importance moyenne, $v_1 = 0{,}14$. Un impact équilibré signifie des interactions plutôt faibles, ce qui peut aller dans le sens d'une utilisation efficiente des moyens utilisés.

5 CONCLUSION

Cet article traite de l'agrégation par l'IC dans les SIP et introduit la notion d'impact d'une expression de performance élémentaire retournée par un IP à l'expression globale associée au SIP. Nouvelle information d'aide au pilotage, l'impact établit un lien unique et simple entre expression élémentaire et expression agrégée. Prenant en compte à la fois l'importance de l'expression de performance élémentaire et ses interactions avec les autres expressions élémentaires, l'impact encapsule la complexité du modèle d'agrégation de manière à en faciliter l'exploitation. De par sa vocation, fournir une synthèse unique d'un phénomène, l'agrégation ne traite qu'indirectement des mécanismes d'influence entre les informations à agréger.

Plusieurs perspectives s'ouvrent à cette étude. Revenant à notre préoccupation initiale d'intégration de nouveaux critères comme l'Innovation ou l'Economie de déchets, la première perspective vise à définir et calculer l'expression de la performance élémentaire associée à ce type de critère, préalable à l'agrégation et donc au calcul d'impact avant de traiter un cas industriel.

La deuxième perspective vise à opérationnaliser cette information dans la cadre de l'Industrie 4.0 et en particulier de l'intégrer dans le *Manufacturing Execution System* et sa fonctionnalité d'évaluation de la performance. La recherche s'appliquera d'une part, à définir le format d'affichage propre à développer le management visuel, et d'autre part, à préparer l'aide au pilotage en intégrant outils de simulation et d'optimisation de cet impact.

Enfin, la dernière perspective envisage de revisiter les méthodes multicritères pour la collecte d'expertise. Actuellement, les paramètres de l'opérateur d'agrégation sont identifiés par une expertise sur des situations « fictives » mal connues du pilotage. L'idée serait d'utiliser

l'expertise du pilotage, à notre avis plus accessible, sur l'impact des différentes expressions de performance élémentaires, pour en déduire les indices de Shapley et les coefficients d'interaction.

REFERENCES

Arnold, D.K., Voigt, K.I., 2016. How Industry 4.0 Changes Business Models in Different Manufacturing Industries. In *Proceedings of the XXVII ISPIM Innovation Conference, Blending Tomorrow's Innovation Vintage*. Porto, Portugal. p. 1-20

Atik, H., Ünlü, F., 2019. The Measurement of Industry 4.0 Performance through Industry 4.0 Index: An Empirical Investigation for Turkey and European Countries. Procedia Computer Science. 3rd World Conference on Technology, Innovation and Entrepreneurship Industry 4.0 Focused Innovation, Technology, Entrepreneurship and Manufacture. Vol. 158, p. 852-860.

Bana e Costa, C., De Corte, J.M., Vansnick, J.C., 2012. MACBETH. International Journal of Information Technology & Decision Making. Vol. 11(02), p. 359-87.

Bana e Costa, C., Vansnick, J.C,. 1997. Applications of the MACBETH Approach in the Framework of an Additive Aggregation Model. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. Vol. 6(2), p. 107-14.

Berrah L., Montmain J., Mauris G., Clivillé V., 2011, Optimising industrial performance improvement within a quantitative multi-criteria aggregation framework, Int. J. of Data Analysis Techniques and Strategies, Vol. 3 (1), p.42-65,

Berrah, L., Clivillé, V., Montmain, J., Mauris, G., 2019. The Contribution Concept for the Control of a Manufacturing Multi-Criteria Performance Improvement. Journal of Intelligent Manufacturing. Vol. 30(1), p. 47-58.

Berrah, L., Clivillé, V., Foulloy. L., 2018. Objectifs et performances industriels: Concepts et traitement flou. ISTE Group.

Bititci, U. S., Suwignjo, P., Carrie, A.S., 2001. Strategy Management through Quantitative Modelling of Performance Measurement Systems. International Journal of Production Economics, Productivity, Performance and Valuation. Vol. 69 (1), p. 15-22.

Bitteau, R., Bitteau, S., 1998. Maîtriser Les Flux Industriels. Editions d'organisation.

Büchi, G., Cugno., Castagnoli. R., 2020. Smart Factory Performance and Industry 4.0. Technological Forecasting and Social Change. Vol. 150 (January).

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. Vol. 105(1), p. 171-89.

Dalenogare, L.S., Benitez, G.B., Ayala, N.F, Frank, A.G., 2018. The Expected Contribution of Industry 4.0 Technologies for Industrial Performance. International Journal of Production Economics. Vol. 204, p. 383-394.

Ducq, Y., Vallespir, B., Doumeingts, G., 2001. Coherence Analysis Methods for Production Systems by Performance Aggregation. International Journal of Production Economics, Productivity, Performance and Valuation. Vol.69(1), p. 23-37.

Fishburn P., 2001Measurement Theory: Conjoint, in International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences,

Frank, A.G., Mendes, G.H.s., Ayala, N.F., Ghezzi, A., 2019. Servitization and Industry 4.0 Convergence in the Digital Transformation of Product Firms: A Business Model Innovation Perspective. *Technological Forecasting and Social Change.* Vol. 141, p. 341-51.

Globerson, S,. 1985. Issues in Developing a Performance Criteria System for an Organization. *International Journal of Production Research.* Vol. 23 (4), p. 639-646.

Grabisch, M., 1996. The Application of Fuzzy Integrals in Multicriteria Decision Making. *European Journal of Operational Research.* Vol. 89(3), p. 445-56.

Grabisch, M., Marichal, J.L., Mesiar, R., Pap, E., 2011. Aggregation Functions: Means. *Information Sciences.* Vol. 181 (1), p. 1-22.

Johnson, H.T., 1975. Management Accounting in an Early Integrated Industrial: E. I. DuPont de Nemours Powder Company, 1903-1912. *Business History Review.* Vol. 49 (2), p. 184-204.

Kaplan, R.S., Norton, D.P., 2001. Comment Utiliser Le Tableau de Bord Prospectif. *Editions d'Organosation*. p. 440.

Krantz, D.H., Luce, R.D., Suppes, P., versky, T., 1971. Foundations of Measurement. *Additive and polynomial representations, Academic press*. Vol. 1.

Kueng, P., 2000. Process Performance Measurement System: A Tool to Support Process-Based Organizations. *Total Quality Management.* Vol. 11 (1), p. 67-85.

Labreuche, C., Grabisch, M.,. 2003. The Choquet Integral for the Aggregation of Interval Scales in Multicriteria Decision Making. *Fuzzy Sets and Systems, Preference Modelling and Applications.* Vol. 137 (1), p. 11-26.

Lauras, M., Marques, M., Gourc, D., 2010. Towards a Multi-Dimensional Project Performance Measure-

ment System. *Decision Support Systems.* Vol. 48(2), p. 342-53.

Marichal, J.L., 2004. Tolerant or Intolerant Character of Interacting Criteria in Aggregation by the Choquet Integral. *European Journal of Operational Research, Traffic and Transportation Systems Analysis.* Vol. 155(3), p. 771-91.

Mayag, B., Grabisch, M., Labreuche, C., 2011. A Characterization of the 2-Additive Choquet Integral through Cardinal Information. *Fuzzy Sets and Systems, Preference Modelling and Decision Analysis.* Vol. 184(1), p. 84-105.

Müller, J.M., Buliga, O., Voigt, K.I., 2018. Fortune Favors the Prepared: How SMEs Approach Business Model Innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change.* Vol.132, p. 2-17.

Neely, A., 2005. The evolution of performance measurement research: Developments in the last decade and a research agenda for the next. International *Journal of Operations & Production Management.* Vol. 25(12), p. 1264-1277.

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.* Vol. 60(2), p. 279-290.

Reischauer, G., 2018. Industry 4.0 as Policy-Driven Discourse to Institutionalize Innovation Systems in Manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change.* Vol.132, p. 26–33.

Rosa P., Sassanelli C., Terzi S., 2019. Towards Circular Business Models: A systematic literature review on classification frameworks and archetypes, *Journal of Cleaner Production.* Vol. 236, 17 pages.

Roy, B., 1993. Méthodologie multicritère d'aide à la décision. *Economica*. p. 423.

Saaty, T.L., 1977. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology.* Vol. 15(3), p. 234-81.

Shah, L. A., Etienne, A., Siadat, A., Vernadat, F., 2016. Decision-Making in the Manufacturing Environment Using a Value-Risk Graph. *Journal of Intelligent Manufacturing.* Vol. 27(3), p. 617-630.

Sikdar, S.K., 2003. Sustainable Development and Sustainability Metrics. *AIChE Journal.* Vol. 49(8), p. 1928-32.