
Prise en compte de l'état réel d'un système complexe pour l'aide à la décision en phase d'exploitation

Mohammed-Farouk Bouaziz^{1,2}, Pascale Marange^{1,2},
Alexandre Voisin^{1,2}, Jean-François Pétin^{1,2}

1. CNRS, CRAN UMR 7039, France

2. Université de Lorraine, CRAN UMR 7039, Boulevard des aiguillettes
BP 70239 F-54506 Vandœuvre-lès-Nancy
{mohammed-Farouk.bouaziz, pascale.marange, alexandre.voisin,
jean-francois.petin}@univ-lorraine.fr

RÉSUMÉ. Cet article propose un modèle d'aide au choix de séquences de conduite pour les systèmes critiques. L'objectif ici consiste à proposer un classement multicritère de séquences en intégrant à la fois l'aspect sécuritaire, dans la définition des critères de décision, et également l'état réel des équipements et les connaissances métiers. Une méthodologie structurée pour supporter le processus de classement est ainsi développée. Les modèles proposés reposent sur la théorie de l'utilité multi-attribut et la notion de bilan de santé. Les entrées de ces modèles proviennent des données réelles et des connaissances métiers. En sortie, l'expert de la conduite dispose d'un ensemble d'informations consensuelles et objectives sur le système. La principale originalité de ce travail consiste en la combinaison d'information issue du suivi « on line » du système et d'un outil issu de l'aide à la décision dans un objectif de pilotage de SED.

ABSTRACT. This paper presents a model/methodology to rank actions sequences in critical systems using health/safety criteria and multi attribute utility theory (MAUT). The proposed approach is validated using a case study performed on CISPI platform at CRAN, Nancy. The weighted average and choquet integral methods are also evaluated for the aggregation of criteria, used during ranking. The choquet integral shows advantages over weighted average in the results of the case study. The inputs of in the proposed model/methodology come from real data and experts' knowledge and output provides a set of consensual and objective information.

MOTS-CLÉS : sécurité, indicateur de bilan de santé, aide à la décision multicritère, méthode d'agrégation, système critique.

KEYWORDS: safety, health checkup indicators, multi-criteria decision aiding, aggregation operators, critical systems.

DOI:10.3166/JESA.49.503-535 © Lavoisier 2016

1. Contexte et problématique de l'étude

De nos jours, la sécurité des systèmes critiques est au cœur des préoccupations des spécialistes et de la société. Les enjeux économiques, sociétaux et environnementaux en font un des axes majeurs de la recherche fondamentale et appliquée. Selon la norme AFNOR (1977), la sécurité peut être définie comme étant l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. Ainsi nous cherchons à maintenir le système dans un état dans lequel le risque de dommages corporels ou matériels est limité à un niveau acceptable (Villemeur, 1988). Les systèmes critiques à risques émergent de l'interaction de trois pôles (Figure 1) :

- un système complexe caractérisé par de nombreuses interactions entre ses sous-systèmes et par de nombreux couplages physiques avec des bouclages ;
- des opérateurs humains interagissant avec le système, dans un environnement donné, et qui possèdent une vision synthétique influencée par plusieurs facteurs (règles, normes, standards, etc.) ;
- un environnement dans lequel les deux pôles précédents baignent.

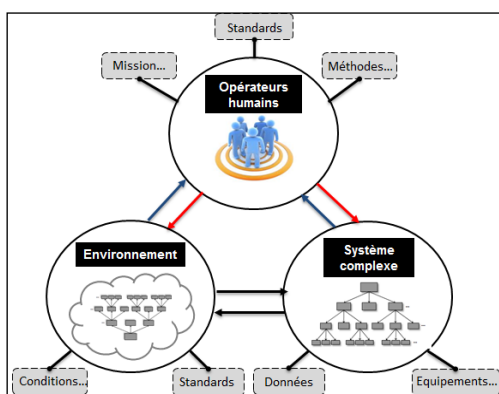


Figure 1. Composantes d'un système critique (Tarride, 2013)

Aussi, la notion de sécurité est étroitement liée à la bonne conduite du système complexe par les opérateurs humains (Amalberti, 2001). Cette conduite est assurée par la définition préalable de procédures à exécuter afin d'accomplir chacune des missions souhaitées (e.g. refroidissement, brassage, traitement, etc.). Une procédure ou séquence de conduite est un ensemble ordonné d'actions sur des équipements. Leur préparation repose sur des méthodes de génération qui permettent de définir un ensemble de séquences d'actions menant à la même mission souhaitée en toute sécurité (Clarke *et al.*, 2000). Le choix d'une séquence particulière à un moment donné se base en grande partie sur la connaissance métier et prend en compte l'état réel du système complexe et notamment son aspect graduel (i.e. dégradation des

équipements, vieillissement, etc.). Aussi, pour les opérateurs humains, la prise de décision sur la procédure à exécuter reste une tâche délicate car plusieurs facteurs se conjuguent :

- la multitude de choix mise à disposition,
- la prise en compte de l'ensemble d'informations, (propriétés, critères, etc.) au moment de la décision,
- la difficulté d'avoir une vision complète et précise de chaque équipement du système,
- le facteur subjectif conduisant à des choix différents (systèmes de valeurs et habitudes des opérateurs), etc.

De surcroît, les méthodes de génération de séquences, issues du domaine des systèmes à événements discrets, proposent souvent une vision binaire du système et leur utilisation dans un contexte complexe se heurte à une problématique d'explosion combinatoire (Valmari, 1999). Cette problématique limite fortement l'extension de ces méthodes pour intégrer plusieurs critères à valeurs réelles dont l'état graduel du système. Pour résumer, l'aide à la planification des activités de conduite s'effectue principalement en deux temps :

- génération d'un ensemble de séquences avec prise en compte de l'état binaire du système et respectant des contraintes de sécurité,
- classement de cet ensemble de séquences avec prise en compte de l'état graduel du système.

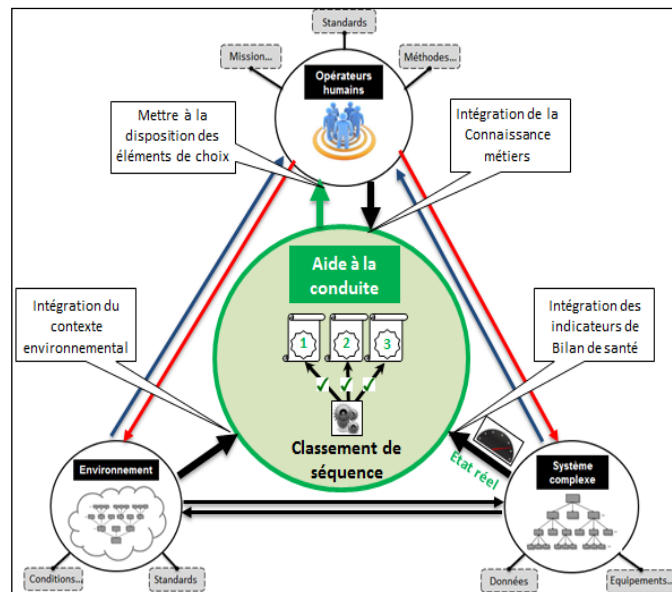


Figure 2. Vers une aide à la décision des activités de conduite

Dans cet article, nous nous focalisons sur l'aspect classement. Ainsi, nos travaux prennent place au cœur de la (re)-planification des activités de conduite et se fixent comme objectif de proposer un modèle d'aide au choix permettant de synthétiser les informations de la conduite sûre afin de mettre à la disposition des experts un classement automatique basé sur des informations objectives et consensuelles (Figure 2). Le modèle repose sur les théories de l'aide à la décision multicritère (*multi-criteria decision*) et de la surveillance (*health monitoring*). La vérification expérimentale utilise conjointement l'extension Kappalab du logiciel GNU R et les bibliothèques du logiciel Matlab.

L'originalité de ce travail réside non seulement dans l'intégration de l'aspect sécuritaire dans la définition des critères de décision mais également dans la prise en compte de l'état graduel des équipements et la formalisation des connaissances métiers pour la prise de décision finale. Ce travail consiste donc en la combinaison d'information issue du suivi « on line » d'un système et d'un outil issu de l'aide à la décision dans un objectif de pilotage de SED (systèmes à événements discrets).

L'article est organisé comme suit : la section 2 est consacrée au positionnement de notre étude avec les thématiques du bilan de santé et de la décision multicritère. La section 3 décrit la méthodologie développée selon une démarche systémique. Dans la section 4, la méthode est formalisée pour supporter le processus de classement des séquences. Nous proposons dans la section 5, une description détaillée de chaque processus et sa modélisation mathématique. Une application du processus de classement sur un cas d'étude est présentée dans la section 6. Une conclusion et des perspectives d'extensions terminent cet article.

2. Positionnement des travaux

La notion de santé d'un système a été largement abordée dans la littérature (Byington *et al.*, 2004) elle est présentée comme étant une grandeur complexe reflétant différents aspects du système. Une représentation générique de ces aspects sous la forme d'un bilan de santé *BS* a été proposée par (Abichou, 2013). Cette représentation regroupe un ensemble d'indicateurs de performance, de dysfonctionnement et d'environnement. La recherche d'un cadre commun pour l'exploitation de ces indicateurs nous a conduit vers le domaine du pronostic et de management de la santé *PHM* (*prognostic and health management*). Le *PHM* est défini comme étant une approche pour le suivi de l'évolution de l'état réel, la détection d'un défaut naissant et la prédiction d'une dégradation d'un système durant son cycle de vie (Kalgren *et al.*, 2006). Cette discipline est apparue il y a environ une dizaine d'années, elle s'appuie sur certains processus importants tels que le traitement de données, le diagnostic, le pronostic et l'aide à la décision.

La Figure 3 présente une architecture séquentielle des processus du *PHM* (Bouaziz, 2012) ainsi que les liens qui peuvent exister entre ces processus et les indicateurs du *BS*. Une première étape consiste à extraire des indicateurs pertinents à partir d'un traitement des données qualitatives et quantitatives. Ces indicateurs peuvent être utilisés par la suite pour des fins de diagnostic ou de pronostic du

système. Enfin, une dernière étape d'aide à la décision permet de choisir un plan d'action approprié en évaluant des critères prédéfinis (coûts, temps de cycle, rendements, etc.). En plus de son aspect générique, cette architecture est configurable et peut être adaptée selon les besoins de l'application. Dans nos travaux, nous portons un intérêt particulier au concept d'aide à la décision (Mathur *et al.*, 2001). Notre étude s'oriente vers les méthodes et les outils issus du domaine d'aide à la décision multicritère *MCDM*.

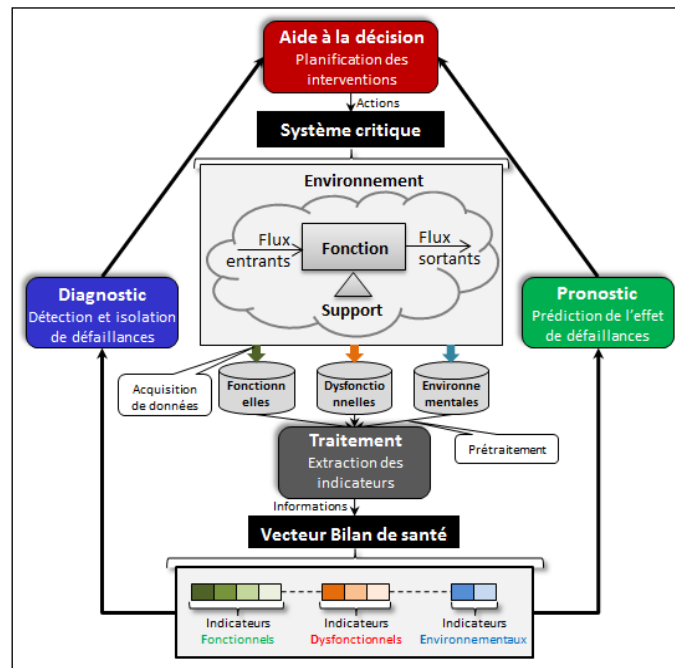


Figure 3. Utilisation des indicateurs bilan de santé

Le recours aux méthodes multicritère comme cadre mathématique pour la prise de décision est fonction aussi des spécifications de l'étude (multitudes d'objectifs et de critères, données quantitatives/qualitatives, critères incommensurables, points de vue contradictoires, synergies entre critères, etc.). Il existe plusieurs méthodes d'aide à la décision multicritère, les techniques les plus utilisées sont (Oztürk *et al.*, 2005) : *PROMETHEE* (*preference ranking organization method for enrichment evaluations*), *ELECTRE* (élimination et choix traduisant la réalité), *AHP* (*analytic hierarchy process*), *ANP* (*analytic network process*) et *MAUT* (théorie de l'utilité multi-attributs).

Rappelons que l'objectif recherché vise à classer un ensemble d'alternatives (séquences) sur la base d'une analyse multicritère. Nous utilisons pour cela le cadre de la théorie *MAUT* qui constitue l'une des méthodes les plus couramment utilisée

pour l'aide à la décision (Fishburn, 1970). Notre choix s'est porté sur la MAUT car nous pensons que la prise en compte d'interaction entre les critères constitue une propriété nécessaire dans le type d'application envisagée. Seules ANP et PROMETHEE permettent cette prise en compte. Cependant, ANP est très complexe à mettre en œuvre.

Ainsi, la formalisation du problème de classement revient à comparer par paire, des alternatives sur chaque critère. Cette comparaison se fait sur la base de la représentation de ces alternatives par des valeurs de critères, souvent opposés, représentant les points de vue pertinents du problème (Zopounidis et Doumpos, 2002). D'une part, la comparaison nécessite de chercher une représentation numérique de la préférence à travers des fonctions appelées fonctions d'utilités *FU*. Une *FU* représente la relation entre des valeurs numériques de critères et un référentiel d'utilité représentant un système de valeur du décideur. Elle peut être obtenue à partir des connaissances métiers ou par apprentissage à partir de données. D'autre part, et afin de pouvoir comparer les alternatives, un mécanisme d'agrégation fusionne différentes valeurs d'utilité des critères en une valeur globale appelée score. Pour notre problématique de classement de séquences, l'agrégation permet, à partir des utilités, d'attribuer un score à chaque séquence (Grabisch et Perny, 2007). Parmi les grandes familles d'opérateurs d'agrégation (Beliakov et Prodera, 2007), la classe d'opérateurs de compromis a attiré notre attention car elle permet d'exprimer des importances relatives entre critères et des attitudes plus ou moins tolérantes ou intolérantes vis-à-vis de certains critères. Les méthodes les plus utilisées pour cette famille d'opérateurs sont : la moyenne arithmétique, la moyenne pondérée, la moyenne pondérée ordonnée et les intégrales floues. Le choix d'un opérateur d'agrégation est fonction de l'application (Grabisch *et al.*, 2009). Pour notre application, la méthode par intégrale de Choquet nous intéresse tout particulièrement car elle nous a permis (Bouaziz *et al.*, 2014) non seulement de prendre en compte les interactions entre critères mais également de classer des séquences d'actions en respectant les choix des experts et ce pour différents scénarios de fonctionnement correspondant à des états de dégradation différents (i.e. valeurs différentes des bilans de santé des équipements).

Compte tenu de ces différents aspects, les travaux présentés ici se positionnent au cœur de la théorie d'utilité multi-attribut, en particulier la technique d'agrégation utilisant l'opérateur de compromis « intégrale de Choquet ». Nous proposons dans ce qui suit, une méthodologie globale pour le développement d'un outil de classement de séquences de conduite ainsi qu'une vérification sur un cas d'étude.

3. Description de la méthodologie globale de développement

Dans nos travaux antérieurs, un processus de classement a été proposé. Ce processus décrit en quatre étapes la démarche qui permet de *modéliser* le problème et se focalise sur l'aspect mathématique du classement des séquences. En effet, cette modélisation est rendue possible par la définition d'un ensemble d'étapes supports et complémentaires permettant de *spécifier* en amont et de *vérifier* en aval les modèles mathématiques élaborés par ce processus de classement.

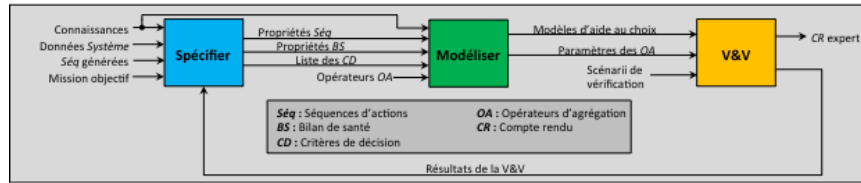


Figure 4. Méthodologie globale de développement d'un outil d'aide à la décision des séquences d'actions de conduite

La Figure 4 donne une vision complète et descendante des trois notions : spécifier, modéliser puis vérifier, et présente ainsi une méthodologie globale qui permet d'appréhender un procédé de conduite complexe. Cette méthodologie structurée part d'une description détaillée du système complexe étudié pour aboutir à la proposition d'un outil de simulation pour l'aide à la (re)-planification des interventions.

La Figure 5 détaille la méthodologie. La première étape de spécification a pour objectif de définir les propriétés des séquences et du bilan de santé ainsi que les critères de décision. Cette étape est composée de quatre sous-étapes : la description qualitative part de l'ensemble des données techniques et de la mission objectif pour caractériser les propriétés des équipements. Ensuite, la définition des séquences utilise les propriétés des équipements, les connaissances métiers et les séquences générées afin de déterminer les caractéristiques des séquences. La définition des éléments bilan de santé propose trois types d'indicateurs conceptuels associés à chaque équipement (fonctionnels, dysfonctionnels et environnementaux) et utilise en plus des propriétés de la séquence, les mesures quantitatives disponibles. Enfin, la définition des critères de décision est une étape clé pour le processus de classement multicritère, elle permet d'identifier les critères à adresser et d'établir les liens qualitatifs entre ces critères, les propriétés de la séquence et les indicateurs du BS.

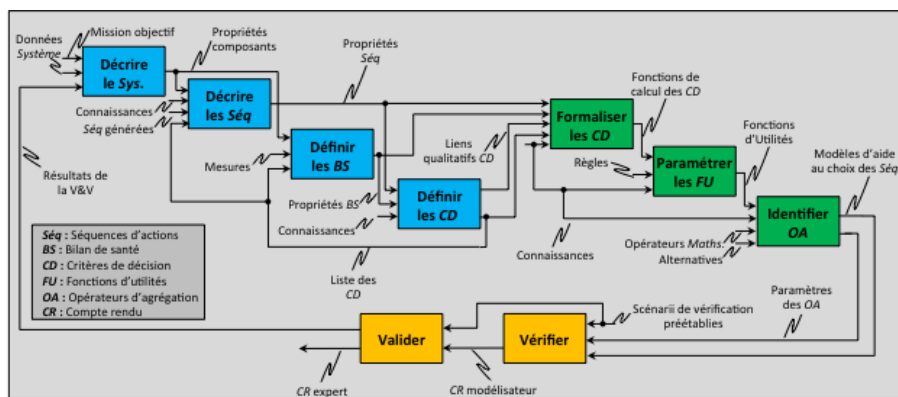


Figure 5. Méthodologie détaillée de développement de l'outil

La deuxième étape concerne la modélisation et a comme objectif d'élaborer des modèles d'aide au choix des séquences. Cette étape est composée de trois sous étapes : tout d'abord, la formalisation des critères de décision consiste à définir les fonctions mathématiques pour le calcul des critères. Par la suite, la formalisation des fonctions d'utilités utilise des règles métiers pour définir les paramètres des *FU*. Enfin, l'identification des paramètres des opérateurs d'agrégation est réalisée par apprentissage à partir d'un ensemble d'alternatives évaluées par un expert métier.

Une dernière étape de vérification et validation est nécessaire afin de tester et de mettre-à-jour, si besoin, les modèles de classement. Elle est constituée de deux sous étapes : la vérification par le modélisateur permet d'analyser les résultats de classement à partir de scénarii préétablies et enfin, la validation qui s'intéresse à l'évaluation de ces scénarii par l'expert métier afin de comparer les résultats de l'étape de vérification et permettre ainsi de reboucler l'approche sur la première étape de spécification.

4. Formalisation du problème

L'aide à la sélection de séquences consiste à proposer à l'expert un classement des séquences de conduite envisagées. Ce classement doit tenir compte en partie de la complexité de la conduite réelle. Ainsi, l'obtention de ce classement se base sur une représentation de la réalité à travers des propriétés liées aux séquences de conduite et à l'état actuel du système. Nous utilisons le cadre de la décision multicritère et plus précisément celui de la théorie de l'utilité multi-attributs. Dans la suite, nous présentons la notion de bilan de santé d'un système qui nous permet d'assurer le suivi de l'état courant du système. Puis, nous introduisons la théorie de l'utilité multi-attributs.

4.1. Notion de bilan de santé

Le suivi de l'état courant d'un système est assuré par le processus de surveillance (*Health Monitoring*) (Kalgren *et al.*, 2006). L'objectif de ce processus est d'obtenir une image de l'état du système et ainsi fournir une évaluation de sa condition/santé (Racoceanu, 2006). Les informations issues des capteurs sont récupérées pour être transformées en indicateurs, par exemple de défaillance à partir d'une référence illustrant le fonctionnement normal ou anormal (dégradé ou inconnu) du système (Ribot, 2009) et (Bouaziz *et al.*, 2013).

La notion de santé d'un équipement a été abordée dans la littérature. (Byington *et al.*, 2004) indique que l'évaluation de la santé correspond à la représentation du niveau réel des déviations relativement à un état normal. (Liu, 2007) désigne par la santé d'un système/équipement sa capacité à effectuer la fonction définie et attendue et peut donc être considéré comme le degré d'une performance requise. (Shin, 2009) souligne que la performance d'un produit/composant est évaluée tout au long de sa période d'utilisation par rapport aux spécifications de conception en caractérisant la dégradation de cette performance dans le temps par sa criticité, sa gravité et son

anormalité. (Kumar et Pecht, 2010) renvoie également au fait que le contexte devrait être intégré dans les paramètres de suivi de la santé. Ainsi, la notion de santé est une grandeur complexe qui reflète des aspects liés aux performances, aux dysfonctionnements et à l'environnement.

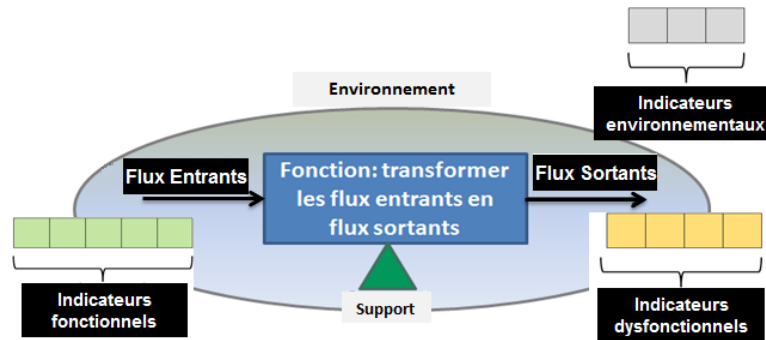


Figure 6. Bilan de santé associé à la représentation systémique d'un système

(Abichou, 2013) a proposé une représentation générique de ces aspects à partir de la représentation systémique (Figure 6) sous la forme d'un bilan de santé. Un bilan de santé est un ensemble d'indicateurs de trois types :

- Fonctionnels : permettent de surveiller la fonction accomplie par l'élément adressé à tous les niveaux de la structure hiérarchique du système. Ces indicateurs sont principalement axés sur la représentation, d'une part, des flux (d'énergie ou d'information) de la fonction, et d'autre part, de ses performances. Nous trouvons dans cette deuxième catégorie en particulier, les indicateurs représentant l'efficacité (rapport des résultats aux objectifs), et ceux reflétant l'efficacité (rapport entre les résultats et les ressources engagées).

- Dysfonctionnels : sont essentiellement liés à l'évolution des mécanismes de dégradation. Ce type d'indicateurs peut représenter :

- le mécanisme de dégradation lui-même (usure, fissure, fuite...). Les indicateurs sont construits à partir des paramètres physiques caractéristiques du composant supportant la fonction suivie,
- les symptômes observables révélateurs de l'apparition de ces mécanismes (hausse de température, vibrations, caractéristiques acoustiques...),
- les facteurs externes de dégradation (comme les chocs subits par le système, contraintes mécaniques d'usage...).

- Environnementaux : permettent de contextualiser les valeurs prises par les indicateurs fonctionnels et dysfonctionnels par rapport aux conditions dans lesquelles le système évolue. Ainsi, les variations de ces indicateurs, résultant d'un changement des conditions opérationnelles ou environnementales, peuvent être

détectées et, seules les dérives des indicateurs fonctionnels et dysfonctionnels causées par des anomalies sont effectivement prises en compte.

La formalisation d'un bilan de santé d'un élément E est donnée par (Abichou, 2013) :

$$\mathcal{V}(E) \triangleq \{I_1^P, I_2^P, \dots, I_{n_{PE}}^P\} \cup \{I_1^D, I_2^D, \dots, I_{n_{DE}}^D\} \cup \{I_1^C, I_2^C, \dots, I_{n_{CE}}^C\} \quad (1)$$

où : $\mathcal{V}(E)$ est l'ensemble des indicateurs pour un élément E du système, I_j^x est le $j^{\text{ème}}$ indicateur de performance ($x=P$) de dégradation ($x=D$) ou environnemental ($x=C$) et n_{x_E} indique le nombre d'indicateurs affectés à un E .

4.2. Théorie de l'utilité multi-attribut

Le problème de classement des séquences est un problème de décision multicritère. Dans ce cadre, pour (Grabisch et Perny, 2007), il s'agit d'évaluer les « performances » de chaque alternative, i.e. de chaque séquence, selon les points de vues pertinents du problème et de les ranger suivant leurs performances. Le problème devient alors un problème de comparaison puisque les alternatives doivent être comparées 2 à 2 afin d'obtenir un classement complet. Cette comparaison se fait sur la base de la représentation des alternatives par des valeurs de critères représentant les points de vues pertinents du problème. La difficulté réside dans les différences entre les critères des deux alternatives qui peuvent être de sens opposés. Un exemple classique est le choix d'une voiture suivant sa consommation et sa vitesse.

Le problème se formalise alors de la manière suivante, nous cherchons à construire une fonction f , telle que :

$$a \succcurlyeq b = f(a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n) \quad (2)$$

où : $a \succcurlyeq b$ est un prédicat binaire tel que $a \succcurlyeq b = 1$ si a est préféré ou indifférent à b . Et a_1, \dots, a_n et b_1, \dots, b_n représentent les valeurs des critères de décision pour chacune des alternatives a et b . \succcurlyeq est généralement donné par un expert sous forme de choix entre 2 alternatives.

La fonction f nécessite d'utiliser d'une part une agrégation (ψ) et d'autre part une comparaison (ϕ). La construction de f peut se faire soit par une approche « agréger puis comparer » ou bien par une approche « comparer puis agréger » (Grabisch et Perny, 2007). Bien que montrant un intérêt, par exemple lorsque nous combinons des critères quantitatifs et qualitatifs ou lorsque l'on ne peut ramener les critères sur des échelles commensurables, l'approche « comparer puis agréger » montre un certain nombre de limites (Arrow, 1951 ; Perny, 1992 ; Sen, 1986) comme la perte de la transitivité ou la présence d'un sous-ensemble de critères décisionnaires. En effet, le théorème d'Arrow (1951) montre l'impossibilité de respecter en même temps les conditions d'universalité (tout classement sur les critères est admissible), d'unanimité (le classement final ne doit pas contredire un classement unanime sur les critères), d'indépendance binaire (le classement final

entre 2 alternatives ne dépend que de leur position relative sur chaque critère) et de non dictature (aucun critère ne peut dicter en toutes circonstances, le résultat final du classement). Notre problématique de classement de séquence requiert le respect de ces quatre propriétés. Bien qu'ayant également des limites (Grabisch et Perny, 2007) comme la nécessité de ramener l'ensemble des critères sur une échelle commensurable, les conflits entre les critères (i.e. les effets de compensation pouvant exister entre critère) et la quantité d'information nécessaire pour établir la méthode, nous nous situons dans une approche « agréger puis comparer » car nous souhaitons préserver les propriétés liées au théorème d'Arrow et nous pouvons disposer de suffisamment d'information « métier » pour ramener les critères sur une échelle commensurable et établir la fonction d'agrégation. D'autre part, l'utilisation d'opérateur non-linéaire et pouvant modéliser des interactions entre critères peut imiter les effets de compensation entre critères sans toutefois les supprimer complètement.

La formalisation de cette approche consiste à trouver une représentation numérique de la préférence, i.e. une fonction $\gamma : X \rightarrow \mathbb{R}$, telle que :

$$\forall a \text{ et } b, a \succcurlyeq b \Leftrightarrow \gamma(a) \geq \gamma(b) \quad (3)$$

Si \succcurlyeq est une relation binaire complète et transitive, γ peut alors prendre la forme :

$$\gamma(a) = \psi(u_1(a_1), \dots, u_k(a_n)) \quad (4)$$

Les u_k sont des fonctions de $X_i \rightarrow [0,1]$ appelées fonctions d'utilités marginales car se rapportant à chaque critères. Notons que l'échelle $[0,1]$ est utilisée pour les fonctions d'utilités bien que dans le cas général elles soient définies sur \mathbb{R} .

Une conséquence de cette formulation est que toutes les actions sont comparables ; cette propriété n'est pas toujours souhaitable ou possible car nous observons que pour un expert, il existe des situations comportant des actions incomparables. Nous supposons que pour tout couple de séquences a et b , l'expert est capable de comparer deux séquences, et de donner sa préférence ($a \succcurlyeq b$ ou $b \succcurlyeq a$). Ainsi, l'ensemble des u_k et ψ reflètent les préférences de l'expert. Les u_k traduisent sur chaque critère indépendamment les préférences quant aux valeurs prises par le critère. Elles permettent à l'expert d'exprimer les valeurs acceptables ou non acceptables. Les fonctions d'utilités u_k permettent d'assurer :

Une sémantique commune aux critères de décisions : les critères étant hétérogènes, il convient pour les agréger d'assurer une même sémantique. Cette sémantique correspond à un score ou degré de satisfaction.

Une échelle commune et l'hypothèse de commensurabilité : cette propriété assure qu'un même niveau d'utilité sur deux critères différents correspond à une intensité de satisfaction identique.

La fonction d'agrégation ψ permet d'agréger les utilités. Pour que (4) soit vérifiée, il est nécessaire que ψ soit idempotente :

$$\psi(\alpha, \alpha, \dots, \alpha) = \alpha \quad (5)$$

avec $\alpha \rightarrow [0,1]$.

ψ doit permettre de refléter les préférences de l'expert dans sa prise en compte des différents critères. Ainsi, il est souhaitable que ψ puisse exprimer (Grabisch et Perny, 2007) :

- des importances relatives entre critères,
- des attitudes plus ou moins tolérantes ou intolérantes vis-à-vis de certains critères,
- des interactions entre critères.

Ainsi, d'après l'équation (4), le classement de séquences revient à trouver les fonctions u_k et ψ .

4.3. Du bilan de santé à la décision multicritère

Dans ce papier, nous proposons d'utiliser la notion de bilan de santé des équipements associés aux séquences de conduite afin de classer ces séquences ($séq_i$) en se basant sur la théorie de l'utilité multi-attribut. Comme indiqué dans la section précédente, la prise de décision finale doit passer par différentes phases. Nous présentons dans la Figure 7, les principaux objets permettant d'arriver à la décision.

La décision est basée sur des objets de décision décrits par un ensemble de critères commensurables et sémantiquement consistants représenté par des fonctions d'utilités (voir équation 4) :

$$score(séq_i) = \psi(u_1(séq_i), \dots, u_K(séq_i)) \quad (6)$$

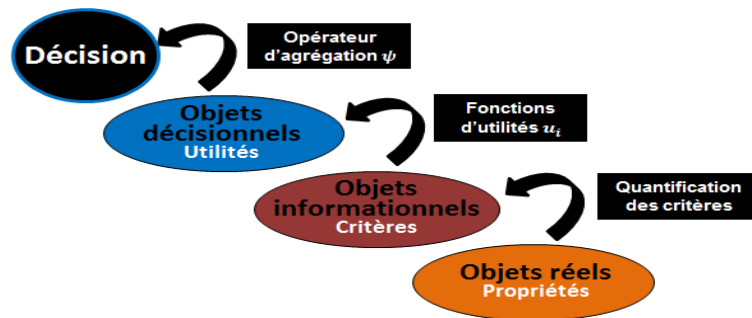


Figure 7. Coopération bilan de santé et théorie multicritère

Pour obtenir les utilités u_k , il est nécessaire d'avoir une représentation informationnelle des objets sur lesquels la décision porte. Ainsi, ces objets

informationnels quantifient les critères de décision cd_k sur des échelles qui leur sont propres :

$$u_k(séq_i) = u_k(cd_k(séq_i)) \tag{7}$$

Les critères sont construits à partir des propriétés d'objets réels tels que les propriétés des séquences $\mathcal{P}(séq_i)$ ou des équipements eq_j pour lesquels nous utilisons leurs bilans de santé $\mathcal{V}(eq_j)$:

$$cd_k(séq_i) = f(\mathcal{V}(eq_j), \mathcal{P}(séq_i)) \tag{8}$$

avec : $\forall eq_j \in \mathcal{E}(séq_i)$ et $\mathcal{E}(séq_i)$ est le nombre d'équipements dans la séquence $séq_i$.

Si pour les utilités et la décision nous retrouvons un cadre classique d'aide à la décision, pour la première étape de quantification, se pose le problème de l'hétérogénéité des séquences et des équipements adressés.

5. Description du processus de classement

Le processus de classement des séquences d'actions de conduite que nous proposons se décompose en quatre étapes (Figure 8) :

- Quantifier : un modèle de quantification permet d'établir le lien entre les propriétés des séquences et des bilans de santé et les critères de décision.
- Calculer : un modèle de calcul des utilités u_k à partir des critères de décision préétablies.
- Agréger : un opérateur d'agrégation ψ pour attribuer un score à chaque séquence.
- Classifier : un opérateur de classement ϕ des séquences.

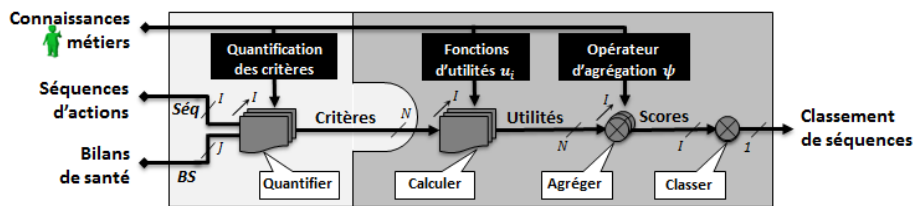


Figure 8. Processus de classement

Avant de détailler chacune des quatre étapes du processus de classement, certaines hypothèses sur les éléments de travail sont nécessaires :

- Toutes les séquences réalisent la même mission.

- Les séquences d’actions sont supposées admissibles d’un point de vue sûreté.
- Tous les équipements de la séquence contribuent à la réussite de la mission.
- Les propriétés et les bilans de santé sont disponibles.

5.1. Quantification des critères de décision

Dans le cas général, le modèle de quantification permet d’établir le lien entre critères de décision, séquences d’actions et état des équipements. Au préalable, une liste de critères est établie à partir des connaissances métiers, ceci afin d’identifier les principaux éléments pris en compte par l’expert dans son choix de séquence (par exemple des indications sur les temps, sur les coûts ou sur les performances). Pour chaque critère de décision étudié, une fonction mathématique est établie, afin de combiner des propriétés de la séquence et/ou des propriétés des éléments de bilan de santé des équipements de cette même séquence. Pour la suite des étapes du processus de classement, ce modèle de quantification doit être instanciable pour les I séquences d’actions et les J bilans de santé en entrée. En sortie de ce modèle, nous obtenons les valeurs des N critères de décision.

5.2. Calcul des utilités

Une fonction d’utilité u_k représente la relation entre des valeurs numériques des critères (valeurs des coûts par exemple) et un référentiel d’utilité allant de zéro (pour les valeurs rejetées) à un (pour les valeurs préférées).

Ces fonctions peuvent être obtenues soit par apprentissage à partir d’un historique de données soit à partir de connaissance métier (Grabisch, 2006). Notre contexte de travail est caractérisé par une expertise métier fortement mise en avant et par conséquent la deuxième approche est adoptée pour définir la forme des N utilités.

5.3. Agrégation

Un mécanisme d’agrégation fusionne différentes informations en une valeur globale. Dans le cas général, le score agrégé contribue à la prise de décision à partir de situations souvent contradictoires. Pour le classement de séquences, l’opérateur d’agrégation ψ permet d’attribuer un score à chaque séquence (I scores pour les I séquences) à partir des critères normalisés (N utilités).

Il existe quatre grandes classes d’opérateurs d’agrégation (Beliakov *et al.*, 2007) : conjonctive, disjonctive, de compromis et hybrides. Cependant, seuls les opérateurs de compromis respectent la propriété d’idempotence (voir équation 5). Les principaux opérateurs de compromis sont : la moyenne arithmétique, la moyenne pondérée, la moyenne pondérée ordonnée et les intégrales floues. Cette dernière famille d’opérateurs d’agrégation permet de prendre en compte l’interaction entre les critères (Grabisch et Perny, 2007).

L'agrégation consiste à synthétiser les valeurs normalisées, provenant des différents critères, dans une valeur globale appelée score. Le choix d'un opérateur d'agrégation est fonction de l'application (Grabisch *et al.*, 2009). Pour notre application, nous avons décidé de comparer les résultats obtenus avec deux opérateurs de compromis : la moyenne pondérée et l'intégrale de Choquet.

La moyenne pondérée associe un poids différent à chaque critère, la somme de ces pondérations étant égale à 1. Le calcul de la moyenne pondérée est donné par :

$$MP(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n W_i x_i \quad (9)$$

La méthode par intégrale de Choquet utilise des paramètres reflétant les poids des critères et le degré d'interaction entre ces critères. Les paramètres en question sont modélisés sous forme d'une capacité (ou mesures floues) (Marichal, 2000). L'intégrale de Choquet est calculée par (Murofushi et Sugeno, 1991) :

$$IC(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n (x_{(i)} - x_{(i-1)}) \mu(A_{(i)}) \quad (10)$$

où (\cdot) en indice est l'opérateur de permutation tel que $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(n)}$ avec $x_{(0)} = \emptyset$. $X : \{X_1, \dots, X_n\}$ est un ensemble d'indicateurs normalisés. μ est la capacité. $\mu(A)$ représente le degré d'importance de l'ensemble $A \subseteq X$ dans le calcul de la valeur globale de X .

Une analyse de l'intégrale de Choquet, à partir de la capacité, peut être réalisée en utilisant les indices d'importance de Shapley et les indices d'interaction. Le premier tient compte de l'importance d'un critère par rapport à ses contributions pour l'ensemble de la capacité. Quant au deuxième, il reflète l'interaction qui existe entre deux critères dans l'ensemble de la capacité.

5.4. Classement

La quatrième et la dernière étape du processus de classement consiste à ordonner les I scores du meilleur au moins bon. L'agrégation ayant permis d'obtenir un score sur \mathbb{R} , l'opérateur d'ordre \geq est utilisé pour classer les I séquences de la mission objectif (voir équation 3). Ce classement doit refléter au mieux le classement représenté par la relation de préférence \succsim . Le résultat du classement est un élément d'aide à la décision qui est utilisé pour la définition de la séquence de conduite.

6. Cas d'étude

Nous allons illustrer le processus de classement à travers la plateforme expérimentale *CISPI*¹. Cette plateforme permet de tester des nouvelles solutions

1. Ce travail est réalisé sur la plateforme expérimentale *CISPI* « Conduite Interactive et Sûre de Procédés Industriels » du laboratoire *CRAN* « Centre de recherche en Automatique de Nancy » : <http://safetech.cran.uhp-nancy.fr/>

pour la conduite sûre des procédés industriels intégrant des opérateurs humains. Pour faire un premier passage à l'échelle, par rapport à nos travaux antérieurs, nous considérons la plateforme *CISPI* dans sa globalité (Figure 9). Aussi, deux critères de décision liés à la sécurité du système sont introduits. La mission objectif consiste à remplir la cuve de stockage C_s , les équipements de l'installation permettent donc de contrôler l'écoulement du liquide entre trois niveaux différents.

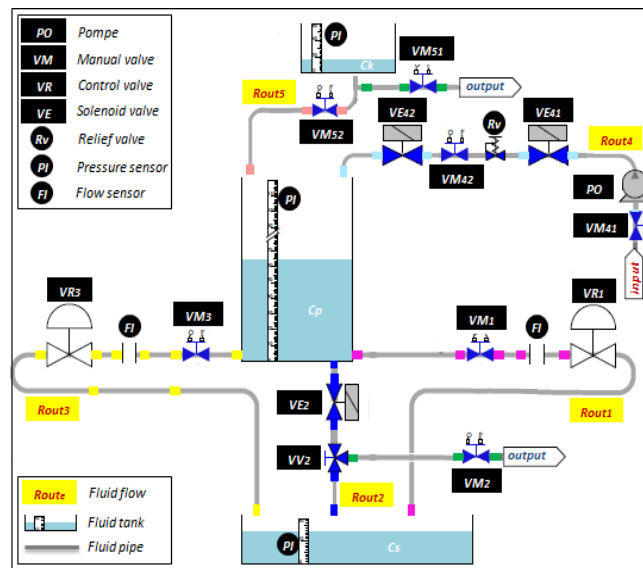


Figure 9. Installation *CISPI* complète

Pour les cuves C_p et C_s , le circuit est composé de : i) trois voies $route_1$, $route_2$ et $route_3$ pour acheminer le liquide de la cuve C_p vers la cuve de stockage C_s , ii) deux vannes réglantes linéaires VR_1 et VR_3 pour contrôler le débit des deux voies $route_1$ et $route_3$, iii) une électrovanne tout ou rien VE_2 pour commander le débit de la $route_2$, iv) quatre vannes manuelles VM_1 , VM_2 , VM_3 et une vanne manuelle 3 voies VM_4 . Nous considérons un niveau suffisant du liquide dans la cuve C_p . Afin d'assurer ce niveau, deux voies supplémentaires sont sollicitées ($route_4$ et $route_5$) entre les cuves C_k et C_p . A partir d'une source extérieure appelée *input*, la $route_4$ permet d'alimenter continuellement la cuve C_p avec un débit contrôlé par le biais d'une pompe PO , deux électrovannes tout ou rien VE_{41} et VE_{42} et deux vannes manuelles VM_{41} et VM_{42} . La $route_5$ assure la même mission pour la cuve C_p , elle est associée à une cuve de stockage C_k et commandée par deux vannes manuelles VM_{51} et VM_{52} . Pour cette voie, le débit n'est pas contrôlé et l'eau s'écoule par gravité. Enfin, l'ensemble est instrumenté par des capteurs de pression PI et de débit FI ainsi qu'un réducteur R_v permettant de limiter la pression interne de la $route_4$, afin de protéger ses équipements actifs d'un éventuel excès de pression.

Les trois lignages possibles pour l'installation *CISPI* complète sont les suivants :

- remplissage de C_s par la cuve C_p et la source *input* (*route₄* et *routes_{1/2/3}*).
- remplissage de C_s par les cuves C_p et C_k (*route₅* et *routes_{1/2/3}*).
- remplissage de C_s par les cuves C_p , C_k et la source *input* (*routes_{4/5}* et *routes_{1/2/3}*).

Notons que le fonctionnement nominal est défini par des équipements en bon état. Une hypothèse est faite sur l'état initial des équipements lors de la génération de séquences. Dans cette étude, c'est l'état fermé et inactif. De plus, nous considérons pour certains équipements critiques, la nécessité de vérifier leur état. Nous distinguons donc deux types d'actions : « ouverture/fermeture » et « vérification ».

À partir de ces trois lignages, 21 séquences de conduite sont définies pour assurer la mission objectif. Ces séquences sont supposées admissibles du point de vue de la sécurité et optimales (i.e. pas d'action inutile). La liste des 21 séquences est détaillée dans le tableau 6 de l'annexe 1. Chaque séquence est composée d'un ensemble d'équipements d'action (vannes et pompe) et de structure (cuves et tuyauteries). Ces équipements sont évalués par des indicateurs de bilan de santé. De ce fait, les propriétés d'une séquence donnée et les indicateurs du bilan de santé de ses équipements sont les paramètres pour le choix d'une séquence à exécuter. A titre d'exemple, la Figure 10 présente les longueurs des voies de circulation entre les cuves exprimées en unité de longueur UdL.

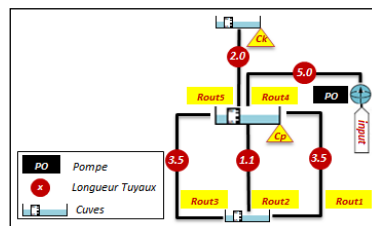


Figure 10. Propriétés des séquences : longueurs des tuyaux

Pour cette application, nous analysons 4 critères de décision définis comme suit :

- cd_1 : le temps de la réalisation d'une séquence.
- cd_2 : les coûts d'exploitation.
- cd_3 : le pourcentage des actions automatiques.
- cd_4 : la performance de réalisation de la mission.

6.1. Définition des bilans de santé

Le modèle de classement proposé prend en compte l'état réel des équipements, à travers la notion de leur bilan de santé $\mathcal{V}(eq_i)$. Comme défini précédemment, le

bilan de santé d'un équipement donné intègre des éléments fonctionnels, dysfonctionnels et environnementaux. Les éléments de $\mathcal{V}(eq_i)$ pour les équipements VM_i , T_x , et C_x sont résumés dans le Tableau 1.

Tableau 1 Éléments du bilan de santé

		Éléments	Unité
VM_1	Perf	Temps ($T_o; T_f$)	UdT
		Coûts ($C_{AM} C_{AA} C_{dM}$)	UdC
	Dysf	Blocage Ouverture	-
	Envir	Hauteur liquide	m
T_x	Perf	Débit (D_n)	m^3/s
	Dysf	Fuite (D_f)	m^3/s
	Envir	T° ext	°c
C_x	Perf	Niveau (L_i)	m
	Dysf	Fuite (D_f)	m^3/s
	Envir	T° int	°c

Chacun de ces éléments est alimenté par les mesures disponibles et/ou la connaissance métiers, par exemple :

- coûts des actions manuelles CAM (VM_1) = 7UdC
- coûts de matériels CdM (VM_1) = 5UdC
- coûts des actions automatisées CAA (VR_1) = 1UdC
- coûts de matériels CdM (VR_1) = 3UdC
- temps d'ouverture (VM_1) et (VM_2) : $T_o = 5UdT$
- temps de fermeture (VM_1) et (VM_2) : $T_f = 5UdT$
- temps d'ouverture/fermeture (VV_2) : $T_o = T_f = 7UdT$
- temps d'ouverture (VR_1) et (VE_2) : $T_o = 3UdT$
- temps de fermeture (VR_1) et (VE_2) : $T_f = 3UdT$
- débits nominaux des cuves C_x (en fonction du niveau L_i du liquide) = $3.5 \cdot 10^{-3} m^3/s$

6.2. Modélisation

6.2.1. Quantification des critères de décision

Pour chacun des quatre critères de décision établis, une fonction de quantification doit être définie, c'est à dire calculer les fonctions mathématiques combinant le critère en question avec les propriétés de la séquence et les propriétés des éléments de bilan de santé.

Pour le temps de réalisation d'une séquence donnée ($séq_i$), il est calculé en fonction des temps des actions (A_j) d'ouverture et de fermeture (T_o et T_f) des équipements (eq_j), ainsi que les temps de parcours (T_p) entre les équipements manuels (eq_j^M) en partant d'une position initiale I_0 . Ce qui donne :

$$cd_1(séq_i) = \sum_{A_j \in séq_i} T(A_j) + \sum_{j=0}^{|séq_i|^{man}} T_p(eq_j^M, eq_{j+1}^M) \quad (11)$$

avec : $|séq_i|^{man}$ le nombre d'actions manuelles d'une séquence donnée. Et $T(A_j) \in \{T_o(eq_j), T_f(eq_j)\}$ et $\{eq_0 = eq_{|séq_i|^{man}+1} = I_0\}$.

Le deuxième critère tient compte des coûts des actions manuelles et automatiques (CAM_j , CAA_j), ainsi que les coûts du matériel (CdM) d'un équipement donné (eq_j) :

$$cd_2(séq_i) = \sum_{j=1}^{|séq_i|} (CA_j + CdM(eq_j)) \quad (12)$$

avec : $|séq_i|$ le nombre d'action de la séquence $séq_i$ et $CA_j \in \{CAM_j, CAA_j\}$.

Le troisième critère définit le pourcentage des actions automatisées. Il est fonction de la cardinalité des actions automatisées :

$$cd_3(séq_i) = \frac{|séq_i|^{auto}}{|séq_i|} \quad (13)$$

avec : $|séq_i|^{auto}$ le nombre d'actions automatisées de la séq_i.

Le critère 4 caractérise la performance de réalisation de la mission. Il est fonction des volumes des équipements participants à la mission objectif V_{MO} , des volumes des lignages V_{Lg} , des débits nominaux et des débits de fuites de l'ensemble des équipements de la séquence. Nous supposons que les niveaux initiaux nécessaires pour la réalisation de la mission sont vérifiés :

$$cd_4(séq_i) = \frac{V_{MO}(eq_j) + \sum_{j=0}^{|séq_i|} V_{Lg}(eq_j, eq_{j+1})}{D_n(eq_j) + \sum_{j=0}^{|séq_i|} D_f(eq_j)} \quad (14)$$

En remplaçant les valeurs numériques de ces paramètres, les différents critères sont calculés pour 7 séquences, ils sont résumés dans le Tableau 2.

$$Séq_1: \begin{cases} CD_1 = T(VM1) + T(VR1) + T_p(dock, VM1) + T_p(VM1, dock) \\ CD_2 = CA(VM1) + CA(VR1) + CdM(VM1) + CdM(VR1) \\ CD_3 = \frac{|seq_1|^{auto}}{|seq_1|} \\ CD_4 = \frac{V_{MO}}{D_n} \end{cases}$$

$$Séq_1: \begin{cases} CD_1 = (5 + 3) + (10 + 10) = 28UdT \\ CD_2 = (7 + 1) + (5 + 3) = 16UdC \\ CD_3 = 1/2 = 0.5 \\ CD_4 = \frac{0.098}{9.86 * 10^{-3}} = 9.94s \end{cases}$$

Tableau 2. Quantification des critères de décision

	cd ₁	cd ₂	cd ₃	cd ₄
séq ₇	223	87	0,5	7,66
séq ₃	195	72	0,5	11,47
séq ₁₉	238	84	0,45	11,5
séq ₁₂	136	54	0,33	11,47
séq ₉	145	51	0,2	22,89
séq ₂	160	50	0,57	22,89
séq ₁₆	247	81	0,4	22,91

6.2.2. Calcul des utilités

Le référentiel d'utilité définit entre :

- 1.00 pour les valeurs préférées, correspondant à la meilleure valeur obtenue pour un critère. Il s'agit dans notre cas de la plus grande ou la plus petite valeur obtenue par les séquences pour un critère
- et 0.2 pour les valeurs les moins préférées, correspondant aux moins bonnes valeurs obtenues pour un critère.

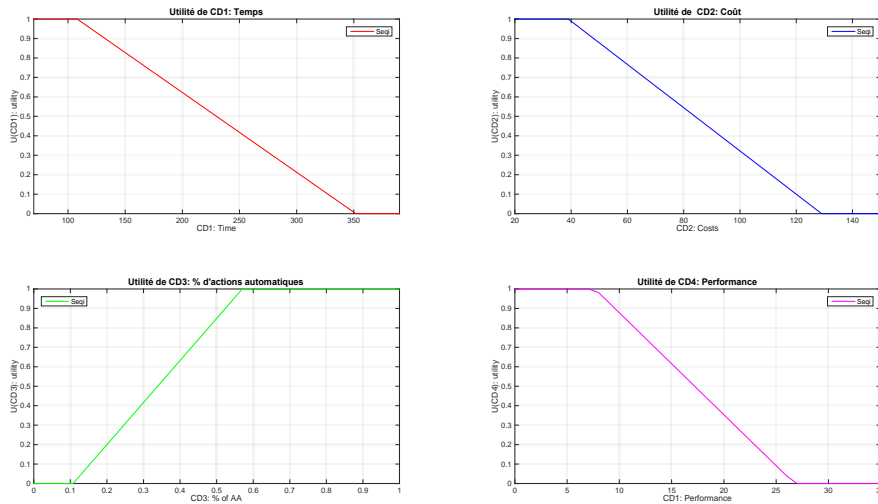


Figure 11. Fonctions d'utilités correspondant aux quatre critères

Ces valeurs minimales et maximales sont données en considérant toutes les séquences de la mission (voir tableaux 7 et 8 de l'annexe 1). Les courbes des FU sont données par la Figure 11.

6.2.3. Agrégation

Ce choix étant fait, se pose le problème de l'identification de leurs paramètres. Cherchant à intégrer des connaissances métiers dans notre approche, nous utilisons un ensemble d'exemples présentés et évalués par un expert pour cette identification. Ces exemples sont donnés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Identification des paramètres des opérateurs d'agrégation

	cd_1	cd_2	cd_3	cd_4	Score
$séq_7$	223	87	0,5	7,66	0.90
$séq_3$	195	72	0,5	11,47	0.80
$séq_{19}$	238	84	0,45	11,5	0.70
$séq_{12}$	136	54	0,33	11,47	0.60
$séq_9$	145	51	0,2	22,89	0.50
$séq_2$	160	50	0,57	22,89	0.40
$séq_{16}$	247	81	0,4	22,91	0.30

Les coefficients de la moyenne pondérée sont calculés, à partir des données d'apprentissage, en résolvant le système d'équations $A*W=B$, où A, est la matrice des alternatives et B, le vecteur des scores attribués à chaque alternative. Le système a été résolu en utilisant la méthode `solve` du logiciel R. Compte tenu des évaluations fournies par l'expert, il peut arriver que le système n'ai pas de solution. Dans ce cas, la moyenne pondérée ne peut pas être utilisée.

Après normalisation, le Tableau 4 donne les pondérations W_i . Ainsi, la performance (cd_4) a le poids le plus important.

Tableau 4. Coefficients de la moyenne pondérée

	W_1	W_2	W_3	W_4
MP	0.026	0.234	0.097	0.642

En utilisant l'extension *Kappalab* du logiciel de traitement et d'analyse statistique *GNU R* (Grabisch *et al.*, 2007), nous pouvons identifier la capacité à partir des exemples fournis par l'expert. La capacité de l'intégrale de Choquet est donc identifiée par apprentissage et la Figure 12 présente les valeurs de Shapley qui donnent l'importance d'un critère par rapport à ses contributions dans l'ensemble de la capacité. Par exemple, la performance (cd_4) a le poids le plus important par rapport aux autres critères comme pour la MP. Le deuxième critère le plus important n'est pas le même pour la MP (cd_2 : coût) et l'IC (cd_3 : % d'AA).

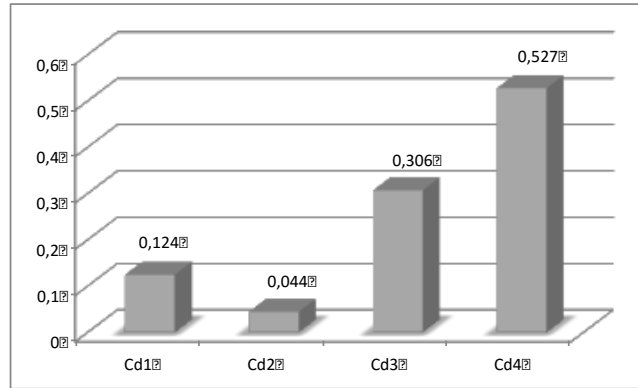


Figure 12. Indices de Shapley de l'IC

La figure 13 présente, quant à elle, les indices d'interaction qui reflètent l'interaction qui existe entre deux critères dans l'ensemble de la capacité. Ainsi, une valeur positive de l'interaction entre une paire de critères (e.g. Cd₁, Cd₃) correspond à la configuration où lorsque les utilités de Cd₁ et Cd₃ ont une valeur importante, le résultat de l'IC est supérieur au résultat de la somme des contributions individuelles. Nous parlons alors de synergie entre les critères. Pour une valeur négative de l'interaction (e.g. Cd₂, Cd₃), une interprétation opposée est possible. Nous parlons alors de redondance entre les critères. On remarque donc une forte interaction positive entre (cd₃, cd₄), et 2 moins forte entre (cd₁, cd₂) et (cd₁, cd₄). Pour les interactions négatives, il en existe entre (cd₁, cd₄), (cd₂, cd₃) et (cd₂, cd₄).

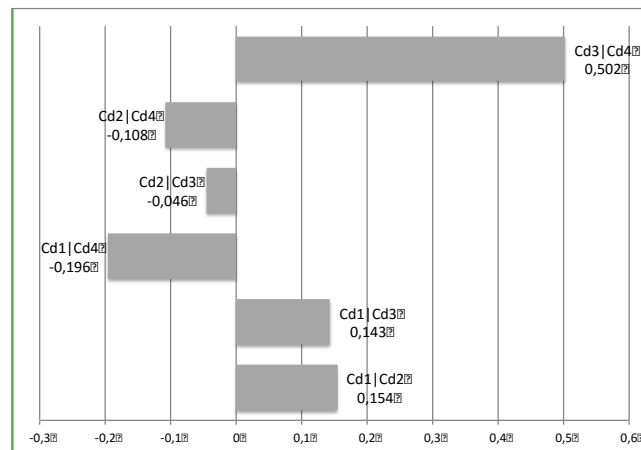


Figure 13. Paramètres de l'opérateur IC : Indices d'Interaction

6.2.4. Classement

Nous allons à présent interroger le modèle de classement. Les scores d'agrégation obtenus par les deux opérateurs de l'intégrale de Choquet (*IC*) et de la moyenne pondérée (*MP*) pour l'ensemble d'apprentissage sont donnés dans le Tableau 5.

Tableau 5. Scores pour le classement des séquences d'apprentissage

	Opérateur		IC		MP	
	score	rang	score	rang	score	rang
<i>seq</i> ₇	0,90	1	0,877	1	0,848	1
<i>seq</i> ₃	0,80	2	0,784	2	0,762	3
<i>seq</i> ₁₉	0,70	3	0,736	3	0,714	4
<i>seq</i> ₁₂	0,60	4	0,622	4	0,779	2
<i>seq</i> ₉	0,50	5	0,460	5	0,375	6
<i>seq</i> ₂	0,40	6	0,436	6	0,454	5
<i>seq</i> ₁₆	0,30	7	0,293	7	0,327	7

Nous voyons, sur la base des scores calculés par les deux méthodes, que les résultats sont différents d'un point de vue classement. Pour l'IC, ils correspondent au classement donné par l'opérateur. Si l'on regarde les scores, nous voyons que pour toutes les séquences, sauf *seq*₁₉, l'IC obtient des scores plus proches de ceux donnés par l'opérateur. Ainsi, la performance des modèles en utilisant l'erreur quadratique moyenne, nous donne $5,57 \cdot 10^{-3}$ pour l'IC et $55,82 \cdot 10^{-3}$ pour la MP.

6.2.5. Scénarii et discussion

Après avoir vérifié le classement sur l'ensemble d'apprentissage, il convient de regarder les résultats sur l'ensemble complet de séquences de conduite. Il faut également analyser le comportement du classement lorsque le système va se dégrader, ce qui constitue le principal apport de notre proposition.

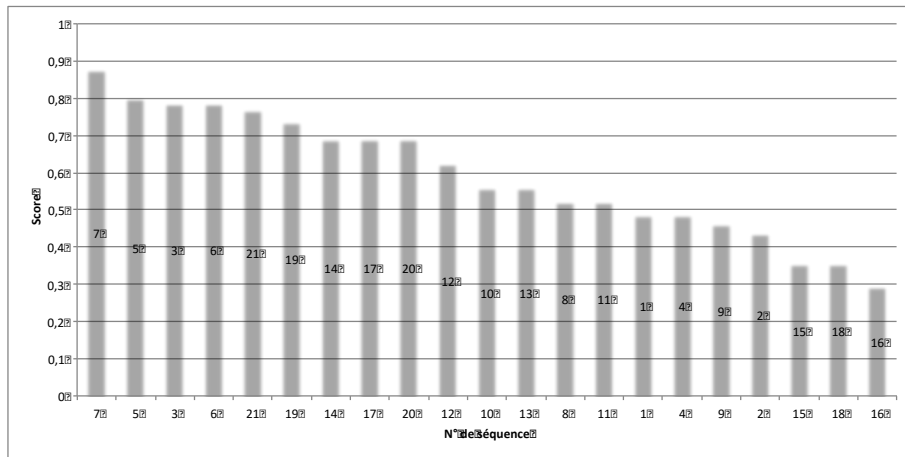
6.2.5.1. Classement de l'ensemble des séquences en mode nominal

Dans un premier temps, le système est considéré dans son état nominal. La figure 16 présente les résultats pour l'IC (a) et la MP (b). On remarque d'une part que l'IC donne, sur l'ensemble des séquences, une meilleure gradualité dans les scores. En effet pour la MP, on constate un net écart entre les scores des séquences 20 et 1. Cet écart ne se retrouve pas dans les scores des séquences de l'IC. On remarque également pour l'IC et la MP que certaines séquences ont des scores identiques (e.g. 3 et 6, 15 et 18). Les voies R1 et R3 étant identiques, il est normal que les séquences où l'une est remplacée par l'autre obtiennent des scores égaux.

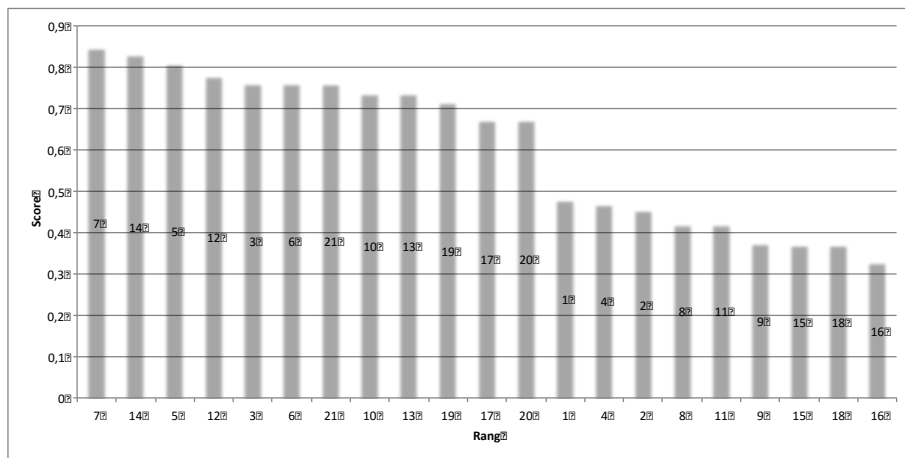
6.2.5.2. Prise en compte de dégradation des éléments $\mathcal{V}(eq_i)$

Nous proposons maintenant de comparer les résultats des deux opérateurs d'agrégation en effectuant deux scénarii. Dans un premier temps, nous considérons

une séquence avec un bilan de santé légèrement moins bon sur la voie 1. Dans un deuxième temps, nous considérons un scénario avec une dégradation plus importante toujours sur la voie 1.



(a)

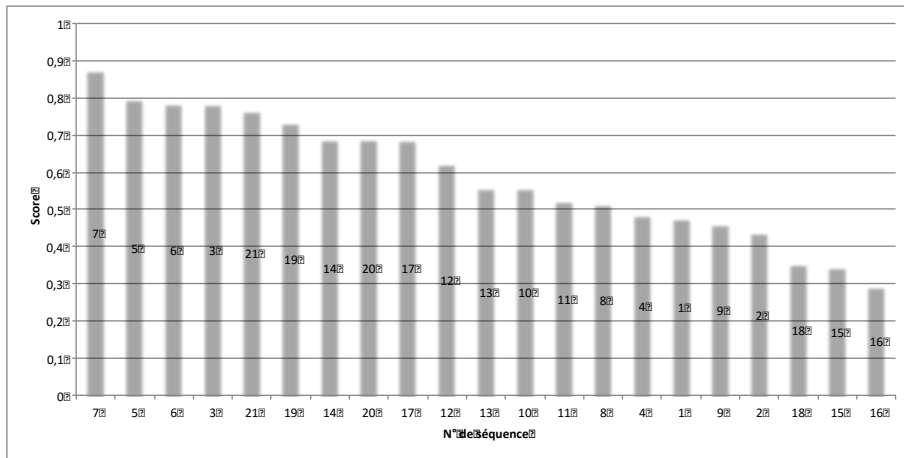


(b)

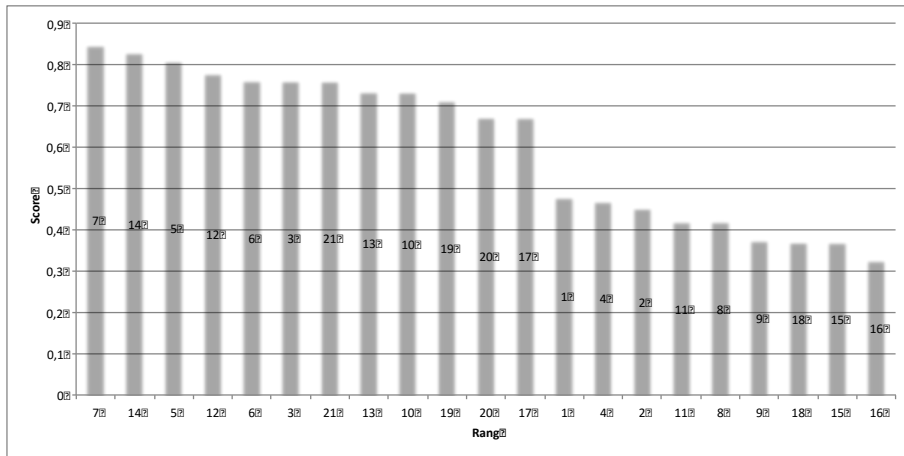
Figure 14. Classement de l'ensemble des séquences en mode nominal (a) pour l'IC et (b) pour la MP

Pour ce premier scénario, nous avons simulé une légère variation au niveau des temps d'ouverture et de fermeture de l'équipement manuel VM_1 de la première voie. Les nouveaux scores obtenus pour l'ensemble des séquences sont présentés figure 15. Nous obtenons globalement le même comportement que précédemment.

On peut noter quelques changements de classement qui sont dû au fait que les voies 1 et 3 ne sont plus équivalentes. Ainsi les scores obtenus pour les séquences utilisant la voie R1 ont légèrement diminué. Cette diminution est normale puisque des équipements étant dégradés, le score final doit être moins bon. Par exemple pour les séquences 3 est 6, le score pour l'IC en état nominal est de 0,7844 et devient 0,7823 pour la voie 1 dégradée. On observe le même comportement pour la MP. Ainsi, avec une légère dégradation, l'ordre des séquences n'est pas complètement bouleversé.

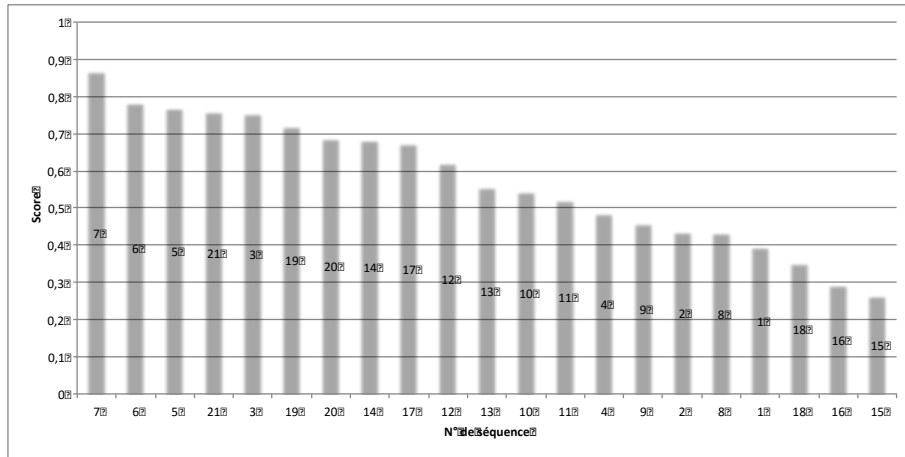


(a)

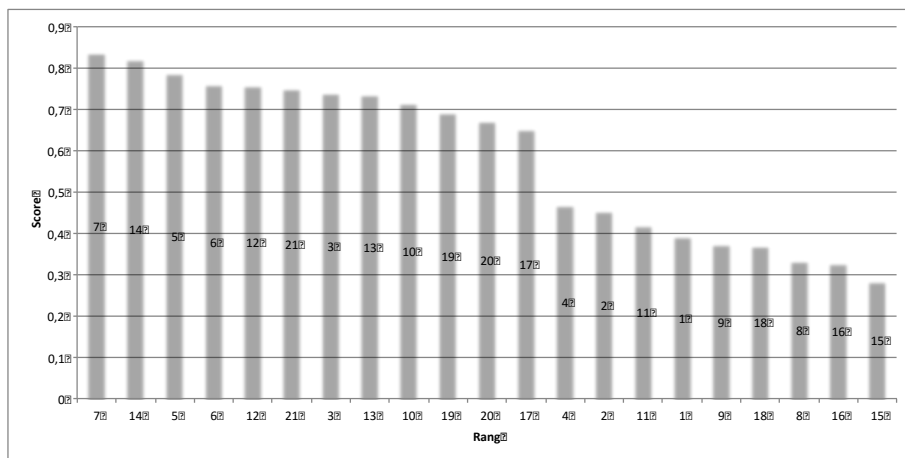


(b)

Figure 15. Classement de l'ensemble des séquences pour le scénario 1 (a) pour l'IC et (b) pour la MP



(a)



(b)

Figure 16. Classement de l'ensemble des séquences pour le scénario 2 (a) pour l'IC et (b) pour la MP

Le deuxième scénario a pour objectif d'illustrer la prise en compte d'une dégradation plus sérieuse du système. Ainsi, en plus du premier scénario, nous considérons une d'une fuite au niveau des équipements indirects T_x de la voie 1. Ce scénario consiste donc à simuler non seulement une baisse de performances de la vanne manuelle mais également le dysfonctionnement d'équipements indirects. Les nouveaux scores obtenus pour l'ensemble des séquences sont présentés figure 16. On observe cette fois des changements plus importants dans l'ordre des séquences. Par exemple pour l'IC, la séquence 6 est maintenant moins bien classée que la séquence 5. On remarque également que pour les séquences ayant les moins bon

score, i.e. les 8 dernières séquences, l'ordre est complètement changé. L'impact d'une dégradation étant plus important sur les scores quand ceux-ci sont faibles. On observe également le même comportement pour la MP.

7. Conclusion

Dans ce papier, la problématique de (re)-planification des activités de conduite est présentée. Les travaux relatifs prennent place dans le contexte des systèmes de conduite critiques à risques et visent à développer un modèle de classement des séquences d'actions.

Nous avons ainsi proposé une modélisation multicritère basée sur la notion de bilan de santé et la théorie de l'utilité multi-attribut. Ces techniques présentent de nombreux avantages par rapport à un contexte de travail caractérisé par sa complexité et une expertise humaine fortement mise en avant.

En support de cette modélisation, une méthodologie globale de développement a été proposée. Elle part d'une spécification détaillée d'un procédé de conduite critique (système complexe, procédures, indicateurs, etc.) pour aboutir à une vérification et une validation des modèles d'aide au choix. Pour vérifier les modèles développés, une application sur un cas d'étude est présentée à partir de la plateforme expérimentale *CISPI*.

Partant d'une mission objectif et pour un système de conduite donné, le modèle de classement automatique propose aux opérateurs d'exploitation d'exécuter une séquence parmi N séquences admissibles générées. Cette information objective est donc un élément d'aide aux choix, elle permet de (re)-planifier l'activité de conduite en toute sécurité et d'améliorer ainsi la performance de l'installation.

L'analyse des résultats du modèle de classement pour différents scénarii de fonctionnement nous a permis de montrer que le comportement des deux opérateurs est proche. Cependant, comme sur l'ensemble d'apprentissage l'intégrale de Choquet donne de bien meilleurs résultats, nous préférons utiliser l'IC sur cet exemple. Bien sûr, nous ne pouvons pas conclure de manière générale.

Enfin, comme perspectives, la première à considérer est dans la méthodologie d'aide à la décision, où la tendance actuelle est à la combinaison d'outils puisque il s'agit d'un premier travail dans ce domaine. Ensuite, le passage à l'échelle sur une installation réelle, où le nombre d'équipements impliqués est beaucoup plus important augmentant le nombre de séquences possibles. De plus, et comme nous avons pu le mentionner dans la section 2, la définition des paramètres des fonctions d'utilités peut être réalisée par apprentissage, d'autant plus si le nombre des critères est important. Dans de telles perspectives, nous proposons d'apprendre des fonctions d'utilités génériques à partir des informations quantitatives incertaines et des connaissances métiers en utilisant les modèles graphiques probabilistes comme par exemple le recours aux réseaux bayésiens (Chajewska and Koller, 2000).

Bibliographie

- Abichou B. (2013). *Contribution à la formalisation de bilans/états de santé multi-niveaux d'un système pour aider à la prise de décision en maintenance*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, CRAN, Nancy, France.
- AFNOR (1977). *Statistique et Qualité : introduction à la fiabilité*, X-NF, 06-501, Norme.
- Amalberti R. (2001). *La conduite des systèmes à risques*. PUF, Paris, France.
- Arrow K.-J. (1951). *Social Choice and Individual Values*. Cowles Foundations and Wiley, New-York.
- Beliakov G., Pradera A., Calvo T. (2007). *Aggregation functions: A guide for practitioners*, Springer Berlin Heidelberg.
- Bouaziz M. F. (2012). *Contribution à la modélisation Bayésienne de l'état de santé d'un système complexe : Application à l'industrie du semi-conducteur*. PhD thesis, Université de Grenoble, Grenoble INP, France.
- Bouaziz M. F., Marangé P., Voisin A., Pétin J.F. (2014). Prise en compte de l'état réel d'un système complexe pour l'aide à la décision de séquences de conduite. *10^e Conference on Modeling, Optimization & SIMulation*, paper n°141, Nancy, France.
- Bouaziz M.-F., Zamaï E., Duvivier F. (2013). Towards Bayesian Network Methodology for Predicting the equipment Health Factor of Complex Semiconductor Systems. *International Journal of Production Research*, vol. 51, n° 15, 4597-4617.
- Byington C.S., Watson M., Edwards D. (2004). Dynamic Signal Analysis and Neural Network Modeling for Life Prediction of Flight Control Actuators. *Proceedings of the American Helicopter Society 60th Annual Forum*. Alexandria, VA: AHS.
- Chajewska U., Koller D. (2000). Utilities as random variables: density estimation and structure discovery. Boutilier C., M. Goldszmidt (Eds.), *Proceedings of the Sixteenth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, Stanford, CA, pp. 63–71.
- Clanché F., Gouyon D., Dobre D., Pétin J.-F., Morel G. (2010). Plate-forme pour la conduite interactive et sûre. *3^e Journées Démonstrateurs en Automatique*, Angers, France.
- Clarke E. M., Grumberg O., Peled A. (2000). *Model checking*. MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Fishburn P. C. (1970). *Utility Theory for Decision Making*. Wiley, New York, USA.
- Frey G., Litz L. (2000). Formal methods in PLC programming. *Proceedings of the IEEE SMC*, p. 2431-2436 (4). Nashville, TN.
- Grabisch M. (2006). Evaluation subjective, Concepts et Méthodes pour l'Aide à la Décision. D. Bouyssou, D. Dubois, M. Pirlot, H. Prade (Ed.) pp. 175-232.
- Grabisch M., Kojadinovic I., Meyer P. (2007). A review of methods for capacity identification in Choquet integral based multi-attribute utility theory Applications of the Kappalab R package. *European Journal of Operational Research*, vol 186, pp. 766-785.
- Grabisch M., Marichal J. L., Mesiar R., Pap E. (2009). Aggregation functions: Means. *Information Sciences*, Elsevier, 181 (1), pp. 1–22.

- Grabisch M., Perny P. (2007). Agrégation multicritère. In B. Bouchon and C. Marsala, editors, *Utilisations de la logique floue*, Hermès.
- Kalgren P., Byington C., Roemer M., Watson M. (2006). Defining PHM, A Lexical Evolution of Maintenance and Logistics. *IEEE Autotestcon Conference Record*, Anaheim, California, pp. 353–358.
- Kowalewski S., Preuig J. (1996). Verification of sequential controllers with timing functions for chemical processes. *IFAC 13th World Congress*, vol. J, p. 419-424, San Francisco, USA.
- Kumar S., Pecht M. (2010). Modeling approaches for prognostics and health management of electronics. *Int. Jour. of Performability Engineering*, vol. 6, n° 5, p. 467.
- Liu X. (2007). *Machinery fault diagnostics based on fuzzy measure and fuzzy integral data fusion techniques*. PhD thesis, Queensland University of Technology.
- Öztürk M., Tsoukiàs A., Vincke P. (2005). Preference modelling, In M. Ehrgott, S. Greco, and J. Figueira, editors, *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, pp. 27–73.
- Machado J., Denis B., Lesage J.-J., Faure J.-M., Ferreira Da Silva J.C.-L. (2006). Logic controllers dependability verification using a plant model. *DESDes06*, p. 37-42, Rydzyna, Poland.
- Marichal J.-L. (2000). On Choquet and Sugeno integrals as aggregation functions. In *Fuzzy measures and integrals*, vol. (40), pp. 247-272.
- Mathur A., Cavanaugh K., Pattipati K., Willet P., Galie T. (2001). Reasoning and Modeling Systems in Diagnosis and Prognosis, In *SPIE Aerosense Conference*, Orlando, USA.
- Murofushi T., Sugeno M. (1991). A theory of fuzzy measures. Representation, the Choquet integral and null sets. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, vol. 159, p. 532-549.
- Niel E., Pietrac L., Regimbal L., (2001). Advantages and drawbacks of the logic program synthesis using supervisory control theory. 10th IFAC Symposium on information Control Problems in Manufacturing (INCOM 2001), Vienna, Austria.
- Perny P. (1992). Sur le non respect de l'axiome d'indépendance dans les méthodes de type ELECTRE. *Cahiers du CERO*, 34, 211–232.
- Racoceanu D. (2006). *Contribution à la surveillance des systèmes de production en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle*. Synthèse des activités de recherche et d'encadrement, Université de Franche-Comté de Besançon, France.
- Ramadge G. and Wonham W.-M. (1989). The control of discrete event systems. *Proc. IEEE, Special issue on DEDSs*, 77, pp. 81-98.
- Ribot P. (2009). *Vers l'intégration diagnostic/pronostic pour la maintenance des systèmes complexes*. Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, LAAS, France.
- Roussel J.-M., Faure J.-M. (2002). An algebraic approach for PLC programs verification. In *Proceedings of 6th international workshop on discrete event systems (WODES'02)*, Zaragoza, Spain, p. 303–308, 2–4.
- Rushby J. (2000). Theorem proving for verification. In Franck Cassez, editor, *Modelling and Verification of Parallel Processes: MoVEP 2k*, Nantes, France.

- Schnoebelen P., Bérard B., Bidoit M., Laroussinie F., Petit A. (1999). *Vérification de logiciels : Techniques et outils du model-checking*. Vuibert, Paris.
- Sen A.-K. (1986). Social Choice Theory. In K.J. Arrow, M.D. Intrilligator (Eds), *Handbook of Mathematical Economics*, chapter 22, p. 1073–1181. Elsevier Sciences Publishers, North-Holland.
- Shin J. (2009). *Decision support methods for closed-loop conceptual design*. Thèse de doctorant, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Suisse.
- Tarride B. (2013). *Physique, fonctionnement et sûreté des REP*, EDP sciences, Collection génie atomique, France.
- Valmari A. (1999). “The state space explosion problem,” In *Advances in Petri Nets*. Springer-Verlag,
- Villemeur A., (1988). *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*, Eyrolles, Collection de la direction des études et recherches d’Électricité de France, Paris.
- Volker N., Kramer B.-J. (2002). Automated verification of function block-based industrial control systems. *Science of Computer Programming*, 42(1), 101-113.
- Wonham W.-M., Ramadge P.-J. (1987). On the supermall controllable sublanguage of a given language, *SIAM J. Control Optimization*, 25, pp. 637-659.
- Zio E. (2009). Reliability engineering: Old problems and new challenges. *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 94, pp. 125-141.
- Zopounidis C., Doumpos M. (2002). Multicriteria classification and sorting methods: A literature review, *European Journal of Operational Research*, 138, p. 229–246.

Article reçu le 24 mai 2015

Accepté le 7 octobre 2015

Annexe 1

Tableau 6. Définition des séquences d'actions de conduite²

		Route N°	Équipement actionné ¹	N°
C I S P I	Lignage N°1	Séq1 {R4,R1}	$\perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\} \perp\{VM_1\}$ $\perp\{VR_1\}$	$\top : 0$ $\perp : 7$
		Séq2 {R4,R2}	$\perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\} \vee\top\{VM_2\}$ $\perp\{VV_2\} \perp\{VE_2\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 7$
		Séq3 {R4,R1,R2}	$\perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\} \perp\{VM_1\}$ $\perp\{VR_1\} \vee\top\{VM_2\} \perp\{VV_2\} \perp\{VE_2\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 9$
		Séq4 {R4,R3}	$\perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\} \perp\{VM_3\}$ $\perp\{VR_3\}$	$\top : 0$ $\perp : 7$
		Séq5 {R4,R1,R3}	$\perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\} \perp\{VM_1, VM_3\}$ $\perp\{VR_1, VR_3\}$	$\top : 0$ $\perp : 9$
		Séq6 {R4,R2,R3}	$\perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\} \vee\top\{VM_2\}$ $\perp\{VV_2, VM_3\} \perp\{VE_2, VR_3\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 9$
		Séq7 {R4,R1,R2,R3}	$\perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\} \vee\top\{VM_2\}$ $\perp\{VM_1, VV_2, VM_3\} \perp\{VR_1, VE_2, VR_3\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 11$
	Lignage N°2	Séq8 {R5,R1}	$\top\{VM_{51}\} \perp\{VM_{52}, VM_1\} \perp\{VR_1\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 3$
		Séq9 {R5,R2}	$\vee\top\{VM_2, VM_{51}\} \perp\{VM_{52}, VV_2\} \perp\{VE_2\}$	$\vee\top : 2$ $\perp : 3$
		Séq10 {R5,R1,R2}	$\vee\top\{VM_{51}, VM_2\} \perp\{VM_{52}, VM_1, VV_2\} \perp\{VR_1, VE_2\}$	$\vee\top : 2$ $\perp : 5$
		Séq11 {R5,R3}	$\vee\top\{VM_{51}\} \perp\{VM_{52}, VM_3\} \perp\{VR_3\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 3$
		Séq12 {R5,R1,R3}	$\vee\top\{VM_{51}\} \perp\{VM_{52}, VM_1, VM_3\} \perp\{VR_1, VR_3\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 5$
		Séq13 {R5,R2,R3}	$\vee\top\{VM_{51}, VM_2\} \perp\{VM_{52}, VV_2, VM_3\} \perp\{VE_2, VR_3\}$	$\vee\top : 2$ $\perp : 5$
		Séq14 {R5,R1,R2,R3}	$\vee\top\{VM_{51}, VM_2\} \perp\{VM_{52}, VM_1, VV_2, VM_3\}$ $\perp\{VR_1, VE_2, VR_3\}$	$\vee\top : 2$ $\perp : 7$
	Lignage N°3	Séq15 {R4,R5,R1}	$\vee\top\{VM_{51}\} \perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\}$ $\perp\{VM_{52}, VM_1\} \perp\{VR_1\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 8$
		Séq16 {R4,R5,R2}	$\vee\top\{VM_2, VM_{51}\} \perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\}$ $\perp\{VM_{52}, VV_2\} \perp\{VE_2\}$	$\vee\top : 2$ $\perp : 8$
		Séq17 {R4,R5,R1,R2}	$\vee\top\{VM_{51}, VM_2\} \perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\}$ $\perp\{VM_{52}, VM_1, VV_2\} \perp\{VR_1, VE_2\}$	$\vee\top : 2$ $\perp : 10$
		Séq18 {R4,R5,R3}	$\vee\top\{VM_{51}\} \perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\}$ $\perp\{VM_{52}, VM_3\} \perp\{VR_3\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 8$
		Séq19 {R4,R5,R1,R3}	$\vee\top\{VM_{51}\} \perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\}$ $\perp\{VM_{52}, VM_1, VM_3\} \perp\{VR_1, VR_3\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 10$
		Séq20 {R4,R5,R2,R3}	$\vee\top\{VM_{51}, VM_2\} \perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\}$ $\perp\{VM_{52}, VV_2, VM_3\} \perp\{VE_2, VR_3\}$	$\vee\top : 2$ $\perp : 10$
		Séq21 {R4,R5,R1,R2,R3}	$\vee\top\{VM_{51}, VM_2\} \perp\{VM_{52}, VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\}$ $\perp\{PO\} \perp\{VM_1, VV_2, VM_3\} \perp\{VR_1, VE_2, VR_3\}$	$\vee\top : 2$ $\perp : 12$

2. \perp / \top : équipement actionné (ouvert) / équipement non actionné (fermé).
 $\vee\perp / \vee\top$: équipement vérifié (ouvert) / équipement vérifié (fermé).

Tableau 7. Quantification des critères de décision

	<i>cd₁</i>	<i>cd₂</i>	<i>cd₃</i>	<i>cd₄</i>
<i>séq₁</i>	130	41	0,57	22,91
<i>séq₂</i>	160	50	0,57	22,89
<i>séq₃</i>	195	72	0,5	11,47
<i>séq₄</i>	130	45	0,57	22,91
<i>séq₅</i>	158	60	0,56	11,48
<i>séq₆</i>	195	72	0,5	11,47
<i>séq₇</i>	223	87	0,5	7,66
<i>séq₈</i>	108	39	0,25	22,9
<i>séq₉</i>	145	51	0,2	22,89
<i>séq₁₀</i>	173	66	0,29	11,47
<i>séq₁₁</i>	108	39	0,25	22,9
<i>séq₁₂</i>	136	54	0,33	11,47
<i>séq₁₃</i>	173	66	0,29	11,47
<i>séq₁₄</i>	201	81	0,33	7,66
<i>séq₁₅</i>	210	69	0,44	22,93
<i>séq₁₆</i>	247	81	0,4	22,91
<i>séq₁₇</i>	275	96	0,42	11,49
<i>séq₁₈</i>	210	69	0,44	22,93
<i>séq₁₉</i>	238	84	0,45	11,5
<i>séq₂₀</i>	275	96	0,42	11,49
<i>séq₂₁</i>	303	111	0,43	7,68

Tableau 8. Valeurs des utilités

	U_{cd1}	U_{cd2}	U_{cd3}	U_{cd4}
$séq_1$	0.9097	0.9778	1.0000	0.2010
$séq_2$	0.7867	0.8778	1.0000	0.2021
$séq_3$	0.6431	0.6333	0.8486	0.8004
$séq_4$	0.9097	0.9333	1.0000	0.2010
$séq_5$	0.7949	0.7667	0.9784	0.7999
$séq_6$	0.6431	0.6333	0.8486	0.8004
$séq_7$	0.5282	0.4667	0.8486	1.0000
$séq_8$	1.0000	1.0000	0.3081	0.2016
$séq_9$	0.8482	0.8667	0.2000	0.2021
$séq_{10}$	0.7333	0.7000	0.3946	0.8004
$séq_{11}$	1.0000	1.0000	0.3081	0.2016
$séq_{12}$	0.8851	0.8333	0.4811	0.8004
$séq_{13}$	0.7333	0.7000	0.3946	0.8004
$séq_{14}$	0.6185	0.5333	0.4811	1.0000
$séq_{15}$	0.5815	0.6667	0.7189	0.2000
$séq_{16}$	0.4297	0.5333	0.6324	0.2010
$séq_{17}$	0.3149	0.3667	0.6757	0.7993
$séq_{18}$	0.5815	0.6667	0.7189	0.2000
$séq_{19}$	0.4667	0.5000	0.7405	0.7988
$séq_{20}$	0.3149	0.3667	0.6757	0.7993
$séq_{21}$	0.2000	0.2000	0.6973	0.9990

