



HAL
open science

Utilisation de critères sécuritaires pour le choix de séquences de conduite de systèmes critiques

Mohammed-Farouk Bouaziz, Pascale Marangé, Alexandre Voisin,
Jean-François Pétin

► **To cite this version:**

Mohammed-Farouk Bouaziz, Pascale Marangé, Alexandre Voisin, Jean-François Pétin. Utilisation de critères sécuritaires pour le choix de séquences de conduite de systèmes critiques. 11ème Congrès International Pluridisciplinaire en Qualité, Sécurité de Fonctionnement et Développement Durable, QUALITA 2015, Mar 2015, Nancy, France. hal-01149786

HAL Id: hal-01149786

<https://hal.science/hal-01149786>

Submitted on 7 May 2015

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.

Utilisation de critères sécuritaires pour le choix de séquences de conduite de systèmes critiques

M-F. BOUAZIZ, P. MARANGE, A. VOISIN, J-F. PETIN

Université de Lorraine, CRAN, UMR 7039,

Campus Sciences, BP 70239

54506 Vandœuvre-lès-Nancy cedex, France

CNRS, CRAN, UMR 7039, France

[mohammed-farouk.bouaziz](mailto:mohammed-farouk.bouaziz@univ-lorraine.fr); [pascale.marange](mailto:pascale.marange@univ-lorraine.fr);
[alexandre.voisin](mailto:alexandre.voisin@univ-lorraine.fr); [jean-francois.petin](mailto:jean-francois.petin@univ-lorraine.fr) } @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 multicritères 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-attributs 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.

Mots-clés—Sécurité; indicateurs de bilan de santé; aide à la décision multi-critère; méthode d'agrégation; système critique.

I. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE

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 [1], 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 [2]. Les systèmes critiques à risques émergent de l'interaction de trois pôles "Fig. 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.

Aussi, la notion de sécurité est étroitement liée à la bonne conduite du système complexe par les opérateurs humains [4]. 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 [5]. 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 [6]. Cette problématique limite fortement l'extension de ces méthodes pour intégrer plusieurs critères à valeurs réelles dont l'état graduel du système.

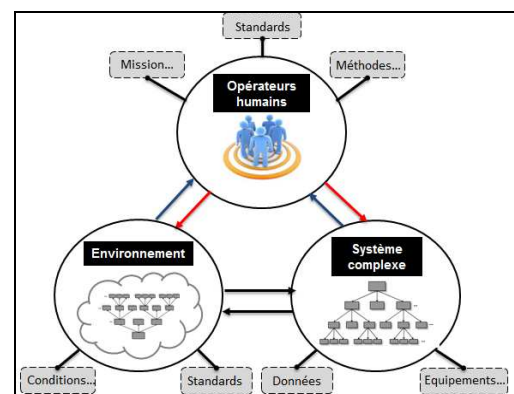


Figure 1. Composantes d'un système critique [3].

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.

Dans les travaux présentés 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 (cf. "Fig. 2"). Le modèle repose sur les théories de l'aide à la décision multicritères (*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*.

Aussi, 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.

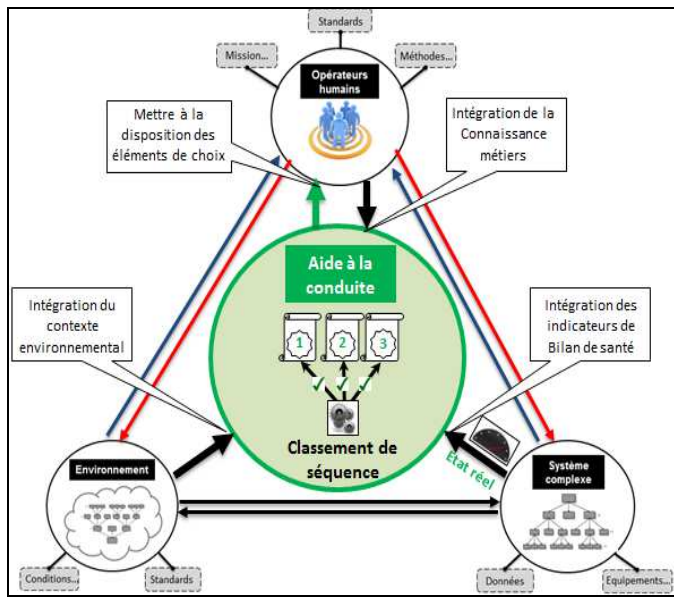


Figure 2. Vers une aide à la décision des activités de conduite.

L'article est organisé comme suit, la section 2 sera consacrée au positionnement de notre travail avec les thématiques du bilan de santé et de la décision multicritères. Ensuite, la section 3 décrira la méthodologie que nous avons proposée pour supporter le processus de classement des séquences, méthodologie développée selon une démarche systémique. Nous proposerons dans la section 4 une application du processus de classement sur un cas d'étude. La section 5 présentera alors les résultats de classement. Une conclusion et des perspectives d'extensions termineront cet article.

II. POSITIONNEMENT DES TRAVAUX

La notion de santé d'un système a été largement abordée dans la littérature [7], 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 [8]. 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 [9]. 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 "Fig. 3" présente une architecture séquentielle des processus du *PHM* [10] 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 [11]. Notre étude s'oriente vers les méthodes et les outils issus du domaine d'aide à la décision multicritères *MCDM*.

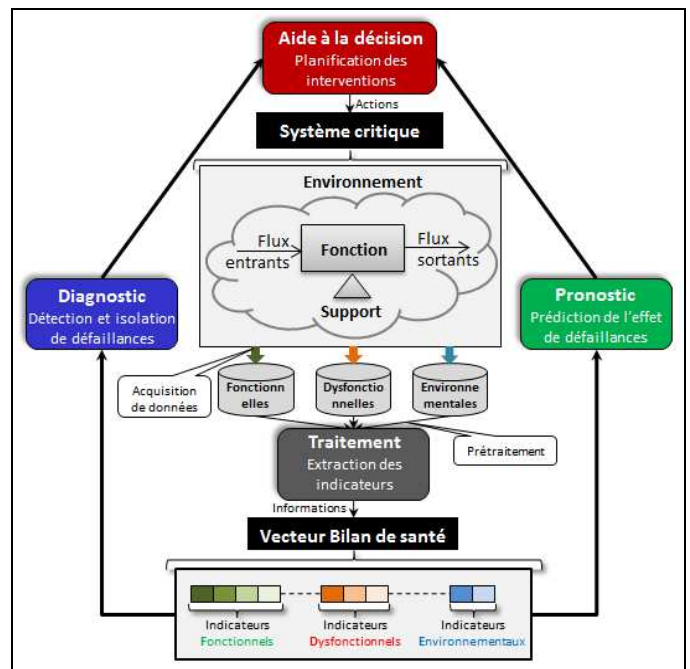


Figure 3. Utilisation des indicateurs bilan de santé.

III. DESCRIPTION DE LA METHODOLOGIE GLOBALE DE DEVELOPPEMENT

Le recours aux méthodes multicritères 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 multicritères, les techniques les plus utilisées sont [12] : *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 multicritères. Nous utilisons pour cela le cadre de la théorie *MAUT* qui constitue l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour l'aide à la décision [13]. En effet, 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 vues pertinents du problème [14]. 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 [15]. Parmi les grandes familles d'opérateurs d'agrégation [16], 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 [17]. Pour notre application, la méthode par intégrale de Choquet nous intéresse tout particulièrement car elle nous a permis [18] 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 correspondants 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 de l'utilité multi-attributs, 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.

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.

La "Fig. 4" donne une vision complète et descendante des trois notions : spécifier (*A1*), modéliser (*A2*) puis vérifier (*A3*), 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 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 (*A11*) part de l'ensemble des données techniques et de la mission objectif pour caractériser les propriétés des équipements. Ensuite, la définition des séquences (*A12*) 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 (*A13*) 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 (*A14*) est une étape clé pour le processus de classement multi-critères, 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*.

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 (*A21*) consiste à définir les fonctions mathématiques pour le calcul des critères. Par la suite, la formalisation des fonctions d'utilités (*A22*) utilise des règles métiers pour définir les paramètres des *FU*. Enfin, l'identification des paramètres des opérateurs d'agrégation (*A23*) est réalisée par apprentissage à partir d'un ensemble d'alternatives évaluées par un expert métiers.

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 (*A31*) permet d'analyser les résultats de classement à partir de scénarii préétablies et enfin, la validation (*A32*) qui s'intéresse à l'évaluation de ces scénarii par l'expert métiers afin de comparer les résultats de l'étape de vérification et permettre ainsi de reboucler l'approche sur la première étape de spécification.

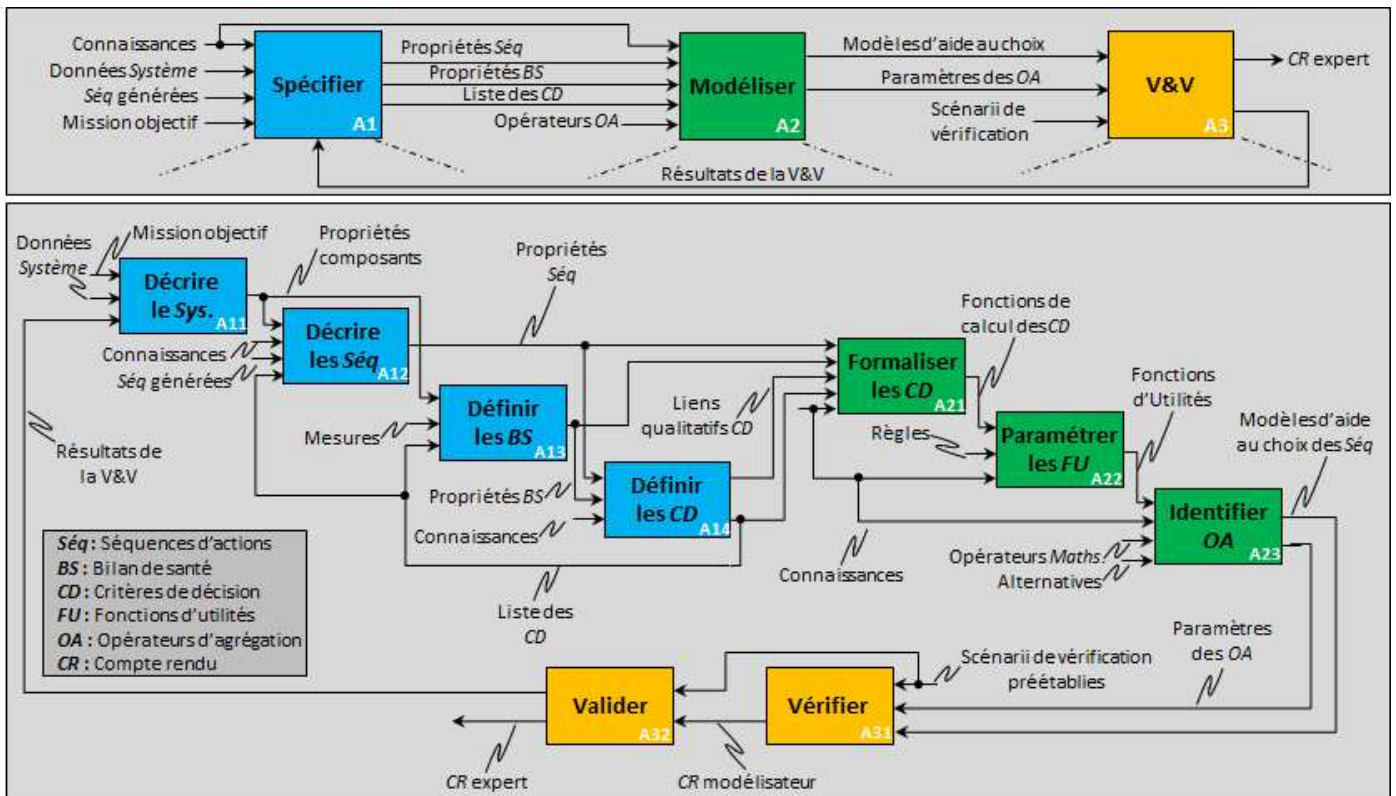


Figure 4. Méthodologie globale de développement d'un outil d'aide à la décision des séquences d'actions de conduite.

IV. CAS D'ETUDE

Nous allons illustrer le processus de classement à travers la plateforme expérimentale *CISPI*. Cette plateforme permet de tester des nouvelles solutions 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 (cf. "Fig. 5"). 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.

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 , 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.

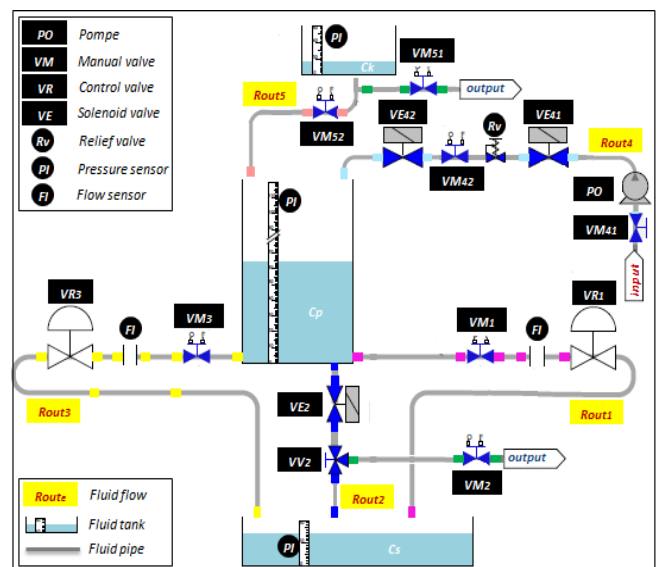


Figure 5. Installation *CISPI* complète.

Le changement de ces conditions est caractérisé par un degré de contamination D_c associé aux équipements d'action et de structure :

$$cd_6(séq_i) = \sum_{eq_j \in séq_i} D_c(eq_j, V(eq_j))$$

avec : $V(eq_j)$ indicateurs *BS* de l'équipement eq_j . Ces indicateurs tiennent compte de certaines caractéristiques mesurées, en particulier la température extérieure T_{ext} , la température du liquide T_{lq} et le potentiel hydrogène du liquide pH_{lq} . Pour chacun de ces trois paramètres, le niveau de contamination est calculé à partir d'un historique de données et sa valeur est fonction de la nature de variation du paramètre analysé : croissant, optimal ou décroissant (cf. "Fig. 9" pour le cas pH_{lq} croissant).

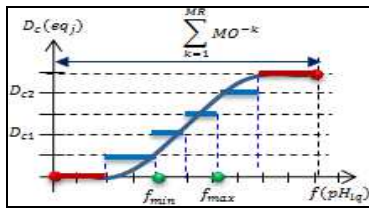


Figure 9. Degré de contamination en fonction de la variation du pH_{lq} .

V. RESULTATS DE CLASSEMENT

Pour le calcul numérique, nous remplaçons les valeurs des paramètres pour les 21 séquences. Les résultats pour les six critères étudiés sont résumés dans la Table 2 (annexe). Le référentiel d'utilité est entre 1.0 (pour les valeurs préférées) et 0.2 (pour les valeurs rejetées), ces valeurs minimales et maximales sont données en considérant toutes les séquences de la mission (voir Table 3 en annexe). Les courbes des *FU* sont données par la "Fig. 10".

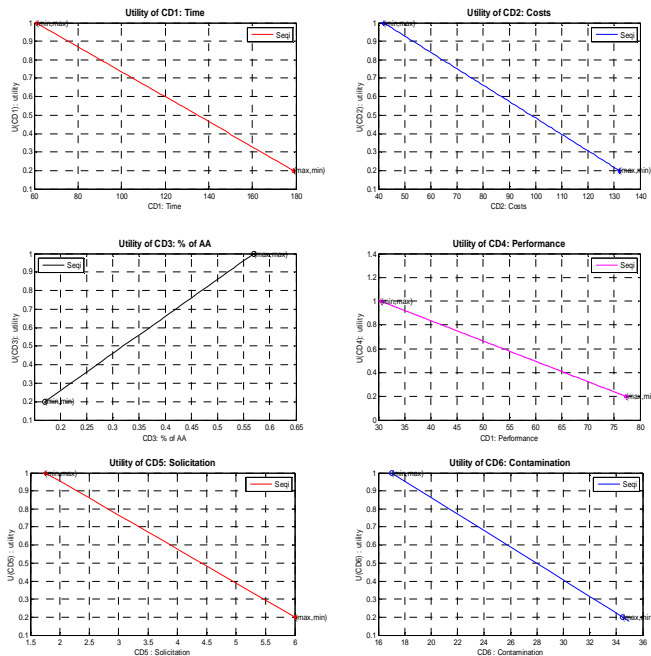


Figure 10. Fonctions d'utilités correspondant aux six critères.

Pour l'identification des paramètres de l'intégrale de Choquet, un sous-ensemble de séquences est analysé. L'expert évalue donc le score global de ces séquences (Table 4), ceci nous permet d'analyser la capacité de l'intégrale en utilisant deux types d'indices : indices d'importance de Shapley et indices d'interaction.

Table 4. IDENTIFICATION DES PARAMETRES DE L'OPERATEUR

	cd_1	cd_2	cd_3	cd_4	cd_5	cd_6	Score
$séq_3$	118.0	102.0	0.50	68.15	4.75	24.50	0.85
$séq_1$	80.00	67.0	0.57	77.28	3.25	20.50	0.80
$séq_2$	100.0	84.0	0.50	77.05	4.25	20.50	0.75
$séq_8$	61.00	42.0	0.25	30.74	1.75	17.00	0.70
$séq_{19}$	141.0	104.0	0.45	58.02	5.00	31.50	0.60
$séq_{14}$	117.0	95.0	0.33	39.09	3.00	25.00	0.50
$séq_{21}$	179.0	132.0	0.43	55.68	5.00	34.50	0.35

La capacité de l'intégrale de Choquet est donc identifiée par apprentissage et la "Fig. 11" présente les valeurs de Shapley qui donnent l'importance d'un critère par rapport à ses contributions pour l'ensemble de la capacité. En effet, le pourcentage des actions automatiques a un poids important par rapport aux autres critères.

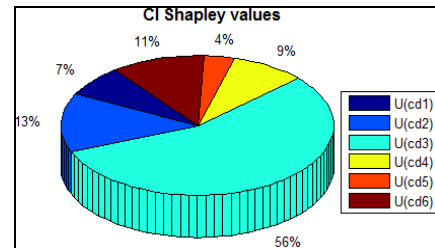


Figure 11. Paramètres de l'opérateur *IC* : Indices de Shapley.

La "Fig. 12" 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 négative de l'interaction entre une paire d'utilité (e.g. U_{cd2} , U_{cd3}) correspond à la configuration où le poids de U_{cd2} , lorsque U_{cd3} est satisfait, est inférieur au poids de U_{cd2} lorsque U_{cd3} n'est pas satisfait. Cette synergie traduit une tendance à compenser les évaluations faibles sur U_{cd3} en augmentant le poids de U_{cd2} . Pour une valeur positive de l'interaction (e.g. U_{cd3} , U_{cd6}), une interprétation opposée est possible. Nous parlons donc d'un comportement redondant.

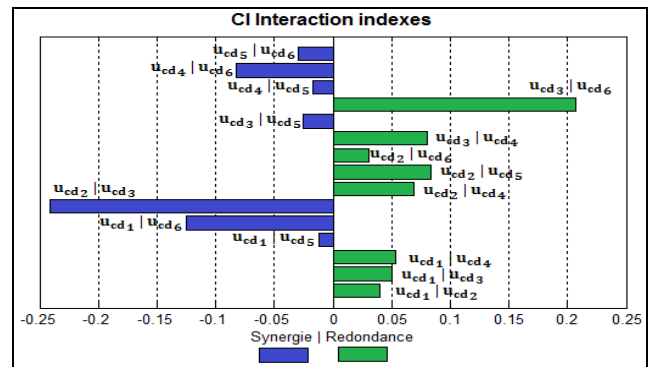


Figure 12. Paramètres de l'opérateur *IC* : Indices d'Interaction.

À présent, nous vérifions le modèle de classement pour les valeurs de la Table 3. La "Fig. 13" présente les scores et le classement obtenus avec l'IC pour le fonctionnement nominal du système. Nous nous attendons à ce que le classement par l'opérateur IC est conforme avec les préférences de l'expert pour les séquences évaluées de la Table 4 et les ensembles de séquences des trois lignages.

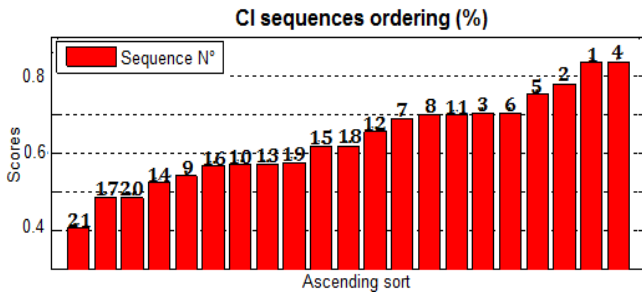


Figure 13. Classement des séquences d'actions.

L'analyse des paramètres et des scores obtenus permet de constater que pour les six critères, la préférence de l'expert est clairement axée sur le pourcentage des actions automatiques au sein de la séquence ($U_{cd3} = 0.56$). Pour les 7 alternatives évaluées (a priori) par l'expert, 6 sont classées de façon identique par l'intégrale de Choquet avec un écart de score inférieur à 0.06. Seule la séquence N°3 n'est pas classée correctement ; ce résultat peut être expliqué par le score élevé donné par l'expert. Aussi, si nous analysons les trois lignages, toutes les séquences du lignage N°1 sont ordonnées dans les 10 premières meilleures séquences. En effet, ce sont celles qui ont un pourcentage élevé des actions automatiques et un degré de contamination faible. Par conséquent, les résultats de classement donnés par l'intégrale de Choquet sont très proches des préférences de l'expert.

VI. 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 multicritères basée sur la notion de bilan de santé et la théorie de l'utilité multi-attributs, 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 plate-forme 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.

En termes de perspectives, plusieurs pistes se dégagent pour envisager d'étendre ces travaux. En effet, à court terme, nous envisageons une prise en compte plus fine des courbes de fiabilité des équipements et des caractéristiques intrinsèques des interventions de maintenance dans la définition des critères sécuritaires.

Par ailleurs et à moyen terme, il nous semble intéressant d'analyser les résultats du modèle de classement pour différents scénarii de fonctionnement pouvant par exemple correspondre à des modes de dégradation ou de redondance de routes. Ceci afin de quantifier l'impact des choix effectués sur l'état de santé des équipements en particulier et celui de l'installation plus généralement.

Enfin, 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 telle perspective, 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 [19].

REFERENCES

- [1] AFNOR, "Statistique et Qualité : introduction à la fiabilité," X-NF, 06-501, Norme. 1977.
- [2] A. Villemeur, "Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels," Eyrolles, Collection de la direction des études et recherches d'Électricité de France, Paris (ISSN 0399-4198). 1988.
- [3] B. Tarride, "Physique, fonctionnement et sûreté des REP," EDP sciences, Collection Génie Atomique, ISBN 978-2-7598-0738-3, France. 2013.
- [4] R. Amalberti, "La conduite des systèmes à risques," PUF, Collection. Paris, France. 2001.
- [5] E. M. Clarke, O. Grumberg, A. Peled, "Model checking," MIT Press, Cambridge, MA, USA. 2000.
- [6] A. Valmari, "The state space explosion problem," In Advances in Petri Nets. Springer-Verlag, 1999.
- [7] C.S. Byington, M. Watson, D. Edwards, "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. 2004.
- [8] B. Abichou, "Contribution à la formalisation de bilans/états de santé multi-niveaux d'un système pour aider à la prise de décision en maintenance," PhD thesis, Université de Lorraine, Cran Nancy, France. 2013.
- [9] P. Kalgren, C. Byington, M. Roemer, M. Watson, "Defining PHM, A Lexical Evolution of Maintenance and Logistics," IEEE Autotestcon Conference Record, Anaheim, California, pp. 353-358. 2006.
- [10] M. F. Bouaziz, "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. 2012.

[11] A. Mathur, K. Cavanaugh, K. Pattipati, P. Willet, T. Galie, "Reasoning and Modeling Systems in Diagnosis and Prognosis," In SPIE Aerosense Conference, Orlando, USA. 2001.

[12] M. Öztürk, A. Tsoukiàs, Ph. Vincke, "Preference modelling," In M. Ehrgott, S. Greco, and J. Figueira, editors, Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, pp. 27–73. 2005.

[13] P. C. Fishburn. "Utility Theory for Decision Making," Wiley, New York, USA. 1970.

[14] C. Zopounidis, M. Doumpos, "Multicriteria classification and sorting methods: A literature review," European Journal of Operational Research. 138. 229–246. 2002.

[15] M. Grabisch, P. Perny, "Agrégation multicritère," In B. Bouchon and C. Marsala, editors, Utilisations de la logique floue, Hermès. 2007.

[16] G. Beliakov, A. Pradera, T. Calvo, "Aggregation functions: A guide for practitioners," Springer Berlin Heidelberg. 2007.

[17] M. Grabisch, J. L. Marichal, R. Mesiar, E. Pap, "Aggregation functions: Means," Information Sciences, Elsevier, 181 (1), pp. 1–22. 2009.

[18] M. F. Bouaziz, P. Marangé, A. Voisin, J. F. Pétin, "Prise en compte de l'état réel d'un système complexe pour l'aide à la décision de séquences de conduite," 10^{ème} Conference on Modeling, Optimization & SIMulation, paper N°141, 10p, Nancy, France. 2014.

[19] U. Chajewska, D. Koller, "Utilities as random variables: density estimation and structure discovery," C. Boutilier, M. Goldszmidt (Eds.), Proceedings of the Sixteenth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, Stanford, CA, pp. 63–71. 2000.

TABLE 2. QUANTIFICATION DES CRITERES DE DECISION

	cd_1	cd_2	cd_3	cd_4	cd_5	cd_6
$séq_1$	80.00	67.00	0.57	77.28	3.25	20.50
$séq_2$	100.00	84.00	0.50	77.05	4.25	20.50
$séq_3$	118.00	102.00	0.50	68.15	4.75	24.50
$séq_4$	80.00	67.00	0.57	77.28	3.25	20.50
$séq_5$	98.00	85.00	0.56	68.31	5.25	24.50
$séq_6$	118.00	102.00	0.50	68.15	4.75	24.50
$séq_7$	136.00	120.00	0.50	63.27	4.50	28.50
$séq_8$	61.00	42.00	0.25	30.74	1.75	17.00
$séq_9$	81.00	59.00	0.17	30.42	2.75	17.00
$séq_{10}$	99.00	77.00	0.29	36.36	3.25	21.00
$séq_{11}$	61.00	42.00	0.25	30.74	1.75	17.00
$séq_{12}$	79.00	67.00	0.33	36.56	2.25	21.00
$séq_{13}$	99.00	77.00	0.29	36.36	3.25	21.00
$séq_{14}$	117.00	95.00	0.33	39.09	3.00	25.00
$séq_{15}$	123.00	79.00	0.44	61.68	4.50	27.50
$séq_{16}$	143.00	96.00	0.40	61.50	5.50	27.50
$séq_{17}$	161.00	114.00	0.42	57.89	6.00	31.50
$séq_{18}$	123.00	79.00	0.44	61.68	4.50	27.50
$séq_{19}$	141.00	104.00	0.45	58.02	5.00	31.50
$séq_{20}$	161.00	114.00	0.42	57.89	6.00	31.50
$séq_{21}$	179.00	132.00	0.43	55.68	5.00	34.50

ANNEXE

TABLE 1. DÉFINITION DES SÉQUENCES D' ACTIONS DE CONDUITE¹

	Route N°	Équipement actionné ¹	N°	
Ligne N°1	$séq_1$	$\{R_1, R_1\}$	$\perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\} \perp\{VM_1\}$ $\perp\{VR_1\}$	$\top : 0$ $\perp : 7$
	$séq_2$	$\{R_1, R_2\}$	$\perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\} \vee\{VM_2\}$ $\perp\{VV_2\} \perp\{VE_2\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 7$
	$séq_3$	$\{R_1, R_1, R_2\}$	$\perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\} \perp\{VM_1\}$ $\perp\{VR_1\} \vee\{VM_2\} \perp\{VV_2\} \perp\{VE_2\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 9$
	$séq_4$	$\{R_1, R_3\}$	$\perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\} \perp\{VM_3\}$ $\perp\{VR_3\}$	$\top : 0$ $\perp : 7$
	$séq_5$	$\{R_1, R_1, R_3\}$	$\perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\} \perp\{VM_1, VM_3\}$ $\perp\{VR_1, VR_3\}$	$\top : 0$ $\perp : 9$
	$séq_6$	$\{R_1, R_2, R_3\}$	$\perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\} \vee\{VM_2\}$ $\perp\{VV_2, VM_3\} \perp\{VE_2, VR_3\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 9$
	$séq_7$	$\{R_1, R_1, R_2, R_3\}$	$\perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\} \vee\{VM_2\}$ $\perp\{VM_1, VV_2, VM_3\} \perp\{VR_1, VE_2, VR_3\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 11$
Ligne N°2	$séq_8$	$\{R_5, R_1\}$	$\top\{VM_{51}\} \perp\{VM_{52}, VM_1\} \perp\{VR_1\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 3$
	$séq_9$	$\{R_5, R_2\}$	$\vee\{VM_{52}, VM_{51}\} \perp\{VM_{52}, VV_2\} \perp\{VE_2\}$	$\vee\top : 2$ $\perp : 3$
	$séq_{10}$	$\{R_5, R_1, R_2\}$	$\vee\{VM_{51}, VM_2\} \perp\{VM_{52}, VM_1, VV_2\} \perp\{VR_1, VE_2\}$	$\vee\top : 2$ $\perp : 5$
	$séq_{11}$	$\{R_5, R_3\}$	$\vee\{VM_{51}\} \perp\{VM_{52}, VM_3\} \perp\{VR_3\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 3$
	$séq_{12}$	$\{R_5, R_1, R_3\}$	$\vee\{VM_{51}\} \perp\{VM_{52}, VM_1, VM_3\} \perp\{VR_1, VR_3\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 5$
	$séq_{13}$	$\{R_5, R_2, R_3\}$	$\vee\{VM_{51}, VM_2\} \perp\{VM_{52}, VV_2, VM_3\} \perp\{VE_2, VR_3\}$	$\vee\top : 2$ $\perp : 5$
	$séq_{14}$	$\{R_5, R_1, R_2, R_3\}$	$\vee\{VM_{51}, VM_2\} \perp\{VM_{52}, VM_1, VV_2, VM_3\}$ $\perp\{VR_1, VE_2, VR_3\}$	$\vee\top : 2$ $\perp : 7$
Ligne N°3	$séq_{15}$	$\{R_1, R_5, R_1\}$	$\vee\{VM_{51}\} \perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\}$ $\perp\{VM_{52}, VM_1\} \perp\{VR_1\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 8$
	$séq_{16}$	$\{R_1, R_5, R_2\}$	$\vee\{VM_{52}, VM_{51}\} \perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\}$ $\perp\{VM_{52}, VV_2\} \perp\{VE_2\}$	$\vee\top : 2$ $\perp : 8$
	$séq_{17}$	$\{R_1, R_5, R_1, R_2\}$	$\vee\{VM_{51}, VM_2\} \perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\}$ $\perp\{VM_{52}, VM_1, VV_2\} \perp\{VR_1, VE_2\}$	$\vee\top : 2$ $\perp : 10$
	$séq_{18}$	$\{R_1, R_5, R_3\}$	$\vee\{VM_{51}\} \perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\}$ $\perp\{VM_{52}, VM_3\} \perp\{VR_3\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 8$
	$séq_{19}$	$\{R_1, R_5, R_1, R_3\}$	$\vee\{VM_{51}\} \perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\}$ $\perp\{VM_{52}, VM_1, VM_3\} \perp\{VR_1, VR_3\}$	$\vee\top : 1$ $\perp : 10$
	$séq_{20}$	$\{R_1, R_5, R_2, R_3\}$	$\vee\{VM_{51}, VM_2\} \perp\{VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\} \perp\{PO\}$ $\perp\{VM_{52}, VV_2, VM_3\} \perp\{VE_2, VR_3\}$	$\vee\top : 2$ $\perp : 10$
	$séq_{21}$	$\{R_1, R_5, R_1, R_2, R_3\}$	$\vee\{VM_{51}, VM_2\} \perp\{VM_{52}, VM_{41}, VM_{42}\} \perp\{VE_{41}, VE_{42}\}$ $\perp\{PO\} \perp\{VM_1, VV_2, VM_3\} \perp\{VR_1, VE_2, VR_3\}$	$\vee\top : 2$ $\perp : 12$

TABLE 3. VALEURS DES UTILITES

	U_{cd1}	U_{cd2}	U_{cd3}	U_{cd4}	U_{cd5}	U_{cd6}
$séq_1$	0.8712	0.7778	1.00	0.2000	0.7176	0.8400
$séq_2$	0.7356	0.6267	0.86	0.2039	0.5294	0.8400
$séq_3$	0.6136	0.4667	0.86	0.3559	0.4353	0.6571
$séq_4$	0.8712	0.7778	1.00	0.2000	0.7176	0.8400
$séq_5$	0.7492	0.6178	0.98	0.3531	0.3412	0.6571
$séq_6$	0.6136	0.4667	0.86	0.3559	0.4353	0.6571
$séq_7$	0.4915	0.3067	0.86	0.4392	0.4824	0.6114
$séq_8$	1.0000	1.0000	0.36	0.9945	1.0000	1.0000
$séq_9$	0.8644	0.8489	0.20	1.0000	0.8118	1.0000
$séq_{10}$	0.7424	0.6889	0.44	0.8986	0.7176	0.8171
$séq_{11}$	1.0000	1.0000	0.36	0.9945	1.0000	1.0000
$séq_{12}$	0.8780	0.7778	0.52	0.8952	0.9059	0.8171
$séq_{13}$	0.7424	0.6889	0.44	0.8986	0.7176	0.8171
$séq_{14}$	0.6203	0.5289	0.52	0.8520	0.7647	0.6343
$séq_{15}$	0.5797	0.6711	0.74	0.4663	0.4824	0.5200
$séq_{16}$	0.4441	0.5200	0.66	0.4694	0.2941	0.5200
$séq_{17}$	0.3220	0.3600	0.70	0.5310	0.2000	0.3371
$séq_{18}$	0.5797	0.6711	0.74	0.4663	0.4824	0.5200
$séq_{19}$	0.4576	0.4489	0.76	0.5288	0.3882	0.3371
$séq_{20}$	0.3220	0.3600	0.70	0.5310	0.2000	0.3371
$séq_{21}$	0.2000	0.2000	0.72	0.5688	0.3882	0.2000

¹ \perp / \top : équipement actionné (ouvert) / équipement non actionné (fermé).
 $\vee\perp / \vee\top$: équipement vérifié (ouvert) / équipement vérifié (fermé).