

Résilience des Systèmes Homme-Machine - Application à la sécurité dans les transports

Liya GU^{1,2,3}, Simon ENJALBERT^{1,2,3}, Frédéric VANDERHAEGEN^{1,2,3}

¹ Univ Lille Nord de France, F-59000 Lille, France

² UVHC, LAMIH, F-59313 Valenciennes, France

³ CNRS, UMR 8530, F-59313 Valenciennes, France

guliya0000@hotmail.com, simon.enjalbert@univ-valenciennes.fr

Résumé – Dans ce papier, nous nous intéressons à l'évaluation de la résilience des Systèmes Homme-Machine (SHM). Un Etat de l'Art sur le concept de résilience dans différents domaines scientifiques est proposé. La définition caractérisant la résilience d'un SHM comme sa capacité à poursuivre son fonctionnement lors de perturbations est retenue. Le modèle Bénéfice Coût Déficit (BCD), qui permet de transformer les données qualitatives et quantitatives issues de l'évolution d'un SHM, est ensuite présenté. Ces données transformées sont utilisées pour analyser et contrôler le comportement d'un SHM. L'analyse de ce comportement est rendue possible par la construction d'indicateurs. Une illustration est proposée par l'interprétation de l'évolution d'un indicateur appliqué à la sécurité permettant de caractériser la résilience d'un SHM. Une application au domaine du transport ferroviaire est envisagée dans la dernière partie.

Abstract – In this paper, we aim to evaluate the resilience of Human-Machine Systems (HMS). A State of the Art based on the resilience concept in different scientific fields is proposed. The definition which characterises HMS resilience as its ability to maintain functioning when disturbances occur is accepted. The Benefit Cost Deficit model (BCD), which allows converting qualitative and quantitative data from HMS evolution, is then introduced. These converted data are used to analyse and supervise HMS behaviour. This behavioural analysis is possible thanks to indicator construction. An illustration is proposed with the interpretation of the evolution of an indicator applied to safety allowing the HMS resilience characterisation. In last part, an application to the railway field is considered.

1. Introduction

Les Systèmes Homme-Machine (SHM) sont des systèmes dans lesquels les fonctions de l'opérateur humain et de la machine sont interdépendantes afin de garantir le fonctionnement du système étudié. De nombreux travaux ont porté sur la conception, la modélisation et l'analyse de ces systèmes, mais peu de recherches ont été menées pour étudier les capacités de réaction et de récupération de ces systèmes dans le cadre de perturbations. Celles-ci se sont principalement intéressées à la partie technique (machine) alors que nous proposons d'étudier la capacité de réaction de l'ensemble Homme-Machine. Le concept de résilience emprunté au domaine de l'ingénierie résiliente est ici à l'étude dans le cadre des SHM. Dans la seconde partie de cet article, un Etat de l'Art sur la résilience dans différentes sciences utilisant ce concept est présenté.

Dans la troisième partie, les principes du modèle Bénéfice, Coût, Déficit (BCD) sont explicités. Le modèle BCD peut être utilisé pour définir des indicateurs permettant l'évaluation des performances (selon les critères étudiés, *i.e.* la qualité, la productivité, etc.) des SHM à l'aide de données qualitatives et quantitatives. Ce modèle a

été utilisé pour l'évaluation et la prédiction de comportements dans le cadre du franchissement de barrières par des opérateurs humains.

Par la suite, nous souhaitons identifier les données issues du modèle BCD permettant la caractérisation de la résilience des SHM pour le critère de sécurité. Un indicateur associé est explicité.

Enfin, une application dans les transports ferroviaire est envisagée. La dernière section présente une conclusion sur la pertinence de ces travaux et des perspectives sont évoquées.

2. État de l'Art sur la résilience

Le concept de résilience a été largement abordé et discuté dans différentes communautés scientifiques : en psychologie, en psychiatrie [2], en sociologie, en économie, en biologie ([3], [4] et [5]), en informatique [6], ou encore en automatique [7]. Il est lié à différentes théories :

- En psychologie ou psychiatrie, ce concept apparaît en théorie de l'invulnérabilité, *i.e.* capacité à résister aux attaques,

- En biologie, il est développé dans la théorie de la viabilité, i.e. capacité à survivre. Un des moyens de subsistance est le mécanisme d'absorption qui consiste à anéantir les effets d'une perturbation,
- En ingénierie, plusieurs approches peuvent être déclinées. Par exemple, la théorie de la sûreté de fonctionnement associe la résilience à la tolérance aux fautes ou aux erreurs. La théorie de l'élasticité interprète la résilience comme une résistance aux chocs.

Dans le cadre des SHM que nous étudions, la définition proposée par Hollnagel et Woods [1] peut être adoptée : « la résilience est la capacité intrinsèque d'une organisation (d'un système) à conserver ou à retrouver un état stable qui lui permette de poursuivre son fonctionnement après une perturbation majeure ou en présence d'une pression continue ». Le concept de résilience peut ainsi s'appliquer aux problématiques de la Sûreté de Fonctionnement. La résilience est la capacité de l'Homme, d'un composant, d'un groupe ou de l'environnement à récupérer ou s'adapter sans problème face à des agressions ou des perturbations externes. Une perturbation ou une agression peut être un choc physique ou psychologique, une erreur, une faute ou une violation. Différentes approches peuvent être concernées ([8], [9] et [10]) :

- La résistance du système face aux défaillances,
- La récupération des défaillances courantes,
- La minimisation de leurs effets et leurs propagations,
- La migration du système vers un état satisfaisant pour délivrer le service requis.

La prévention de risques ou de crises par anticipation permet à partir d'efforts a priori de déterminer un plan de gestion afin de réduire la pression sur l'opérateur humain lors de l'occurrence d'un événement déclencheur de risque ou de crise. Lorsque ces mesures d'anticipation sont insuffisantes, la résilience peut être définie comme la capacité de contrôle des risques nécessitant chez les opérateurs humains sur le terrain un degré de liberté d'action pour improviser et récupérer des situations imprévues, l'improvisation dépendant ici des capacités d'apprentissage et de partage d'expérience entre individus d'une organisation. La résilience, en opposition avec l'anticipation, met alors en œuvre des efforts de récupération, de compensation ou de confinement des effets d'un risque ou d'une crise [11].

Hollnagel et Woods estiment que la résilience d'un système ne peut pas être mesurée ; il est seulement possible de déterminer le potentiel d'une organisation à être résiliente. D'autres auteurs ont proposé différentes méthodes de calcul. Toutes ces mesures sont liées à l'évaluation d'un critère au cours du temps (la sécurité dans nos exemples) et à un seuil de performance minimale acceptable (qui est généralement fixé par le concepteur ou l'utilisateur du système). Lors de l'occurrence d'une perturbation, le système doit s'assurer un niveau de performance supérieur à ce seuil. Un système résilient est un système capable de retourner rapidement à une valeur supérieure à ce seuil dans le cas où il serait franchi.

Pour Martin [3], l'intensité maximale d'une force absorbable par le système sans perturbation sur son fonctionnement ou sur ses mécanismes de régulation peut être une mesure de la résilience. Sur la figure 1, considérons l'évolution de la sécurité de deux systèmes étudiés ; à l'instant initial ($t=0$), les deux courbes sont à une situation de base et l'indicateur de sécurité est satisfaisant (supérieur au seuil minimum acceptable). Ces deux systèmes vont connaître une ou plusieurs perturbations d'intensité maximale identique notée E_{max} .

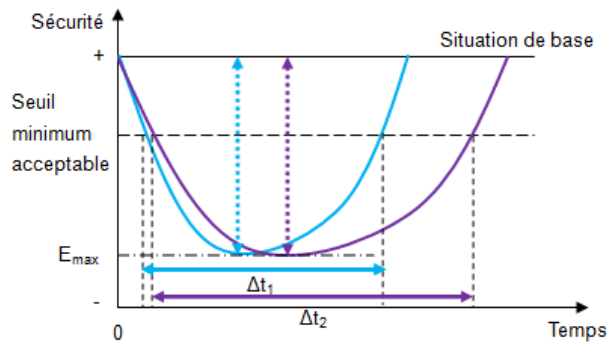


FIG. 1: Evolution de la sécurité de deux systèmes et mesure de la résilience selon Martin.

Cette mesure nous offre un moyen simple d'évaluer la résilience d'un système mais ne considère pas le temps nécessaire à un retour à un état acceptable de fonctionnement. Le temps Δt_1 est nécessaire pour un retour à l'acceptable dans un cas contre Δt_2 dans le second cas. Ces deux systèmes n'ont la même capacité de résilience, il est indispensable d'ajouter la dimension temporelle.

Pour Luo [9], le temps moyen de récupération des erreurs est une mesure de la résilience. Un autre exemple de mesure a été proposé par Orwin et Wardle [4] et est présenté sur la figure 2.

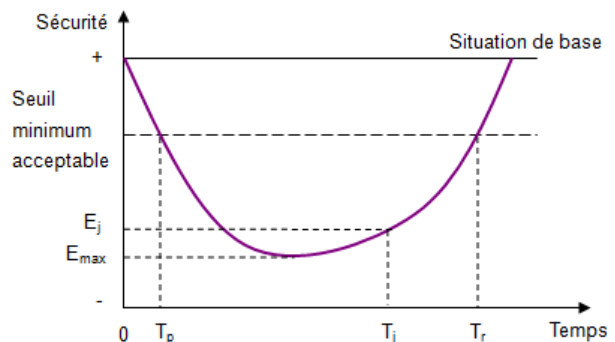


FIG. 2: Représentation graphique de la fonction sécurité pour la mesure de la résilience d'un SHM.

La résilience instantanée est liée à la vitesse de récupération à la perturbation. Cette mesure, qui varie entre -1 et +1, est donnée par l'équation 1.

$$\text{résilience}(T_j) = \left[\frac{2 \times |E_{\max}|}{|E_{\max}| + |E_j|} \right] - 1 \quad (1)$$

La valeur +1 correspond à la résilience maximale quand les effets de la perturbation ont été totalement récupérés.

Nous constatons que ces propositions prennent en compte soit les notions d'intensité de la perturbation, soit de temps de récupération, mais pas les deux simultanément.

Perez-España et Arreguín-Sanchez [5] ont défini la résilience comme l'inverse de la tangente du résultat du ratio entre la résistance et le temps de récupération à une perturbation. La valeur de la résilience varie entre 0 et 90 degrés où 90 représente la résilience maximale dans l'équation 2.

$$\text{résilience} = \tan^{-1} \left[\frac{1}{\frac{|E_{\max}|}{T_r - T_p}} \right] \quad (2)$$

Cette proposition de mesure nous apparaît néanmoins insuffisante dans le cadre de l'étude de Systèmes Homme-Machine car elle ne peut être effectuée que sur un intervalle et ne permettra pas de prendre en compte l'évolution générale d'un système qui peut être amené à franchir à plusieurs reprises le seuil minimal d'acceptabilité. C'est pourquoi, dans les sections suivantes, nous proposons de définir les principes du modèle Bénéfice Coût Déficit afin de déterminer un indicateur basé sur une fonction sécurité pour caractériser la résilience des SHM.

3. Principes du modèle Bénéfice Coût Déficit (BCD)

Dans la littérature ([12] et [13]), toute perturbation ou attaque d'un système technique ou d'un opérateur humain peut être interprétée en termes de :

- *B*, Bénéfices espérés en relation avec les nouveaux savoirs générés par le contrôle de cette perturbation,
- *C*, Coûts acceptables générés par le succès d'un franchissement de barrière ou la création d'une parade à cette perturbation,
- *D*, Déficit ou dangers potentiels si le contrôle est un échec.

Des indicateurs liés aux performances humaines et techniques sont sélectionnés pour comparer les situations Un seuil d'acceptabilité du Coût est défini. Ce seuil est supposé linéaire et constant. Il est intéressant de comparer une situation pour différents utilisateurs ou pour différents niveaux décisionnels pour une organisation. Par exemple, une situation donnée peut être acceptable pour un utilisateur mais inacceptable pour un autre. Deux indications peuvent être relevées : la perte de contrôle et le contrôle de la situation. Les conséquences peuvent être

aussi bien positives que négatives. Les positives font référence à un Bénéfice alors que les négatives à des Coûts acceptables quand l'événement non désiré est sous contrôle ou à un Déficit si la situation n'est plus contrôlée. En d'autres termes, un coût est une conséquence négative acceptable quand le comportement de l'opérateur humain est un succès et le déficit est une conséquence inacceptable lorsque son comportement met en échec le système.

La valeur logique des fonctions *B*, *C* et *D* pour un critère d'évaluation donné quand il est subjectif ou qualitatif peut être transformée en valeur numérique ou en donnée objective par la fonction $K_{J,i}(a,b)$ donnée dans l'équation 3.

$$K_{J,i}(a,b) = s_i(b(t_b)) - s_i(a(t_a))$$

$$K_{J,i}(a,b) = \begin{cases} K_{B,i}(a,b) & \text{si } B_i(a,b) \\ K_{C,i}(a,b) & \text{si } C_i(a,b) \\ K_{D,i}(a,b) & \text{si } D_i(a,b) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3)$$

- *a* et *b* sont des situations données aux instants respectifs t_a et t_b
- $s_i(x(t_x))$ est le critère de sévérité associé à la situation *x* au temps t_x .

L'avantage de ce modèle est qu'il permet la transformation de données qualitatives en valeurs quantitatives en mettant l'accent sur les objectifs opérationnels et organisationnels. Ces données sont utilisées pour analyser et contrôler les erreurs humaines et pour prévoir certains comportements humains [14].

Dans la quatrième section, nous proposons d'identifier une fonction de sécurité construite avec ces données et qui servira d'indicateur pour établir la caractérisation de la résilience des SHM.

4. Résilience d'un système Homme-Machine

Les indicateurs utilisés pour caractériser la résilience et pour évaluer les performances des SHM avec le modèle BCD sont souvent identiques (productivité, sécurité, qualité, etc.). Dans cet article, différentes données relatives au SHM étudié sont prises en compte à l'aide du modèle BCD pour construire un indicateur de sécurité. Seules les données utiles à la construction de cet indicateur sont ici utilisées. Cet indicateur repose sur la somme des influences de ces données comme indiqué dans l'équation 4 :

$$\text{Sécurité}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \varpi_i a_i(t) \sum_{k=0}^{m-1} \gamma_{ik} \quad (4)$$

- *n* : le nombre de données différentes considérées. Ces données peuvent être à l'origine qualitatives ou quantitatives mais ont été transformées en valeur numériques. Il est ainsi possible de considérer des éléments tels que la vitesse, la distance de freinage, la

fatigue du conducteur, etc. pour des exemples traitant du domaine des transports.

- m_i : le nombre de niveaux définis pour une donnée i , un niveau correspondant à une plage de valeurs pour la donnée étudiée. Si nous prenons l'exemple des données relatives à la vitesse, il est possible de considérer un niveau de survitesse correspondant à une augmentation supérieure à 10% de la vitesse maximale autorisée, un niveau correct et un niveau de sous-vitesse si la vitesse est inférieure à 10% de la vitesse maximale autorisée, soit trois niveaux.
- a_i : la valeur de la donnée $i > 0$, exprimée, en fonction du type de donnée, par la valeur absolue de l'écart entre la valeur attendue de la donnée prise en compte et celle mesurée ou par la valeur brute mesurée.
- ϖ_i : le poids affecté à la donnée i , qui permet de limiter l'impact des différentes données traitées. En effet, une donnée, par sa valeur a_i , peut s'avérer trop importante au regard des autres données. Si nous prenons l'exemple des données relatives à la vitesse, le poids peut être défini comme l'inverse des vitesses moyennes mesurées.
- γ_{ik} : l'influence de la donnée i , définie comme une variable entre 0 et R_{ik} où R_{ik} est une variable qui suit une loi de distribution uniforme et qui représente l'influence la plus importante probable pour la donnée i de niveau k . L'influence permet de considérer l'importance relative de la valeur de la donnée dans le cadre de l'indicateur que nous essayons de définir. Si nous prenons l'exemple des données relatives à la vitesse, l'influence sera une variable plus importante si la valeur d'un excès de vitesse dépasse largement la limite fixée par le niveau m_i .

La fonction ainsi définie permet de représenter l'évolution de l'indicateur sécurité. La caractérisation de la résilience est alors envisageable en fonction du temps passé par le système au-delà du seuil d'acceptabilité et de la valeur de la perturbation subie. La surface ainsi représentée sur la figure 3 correspond alors à la résilience de notre système.

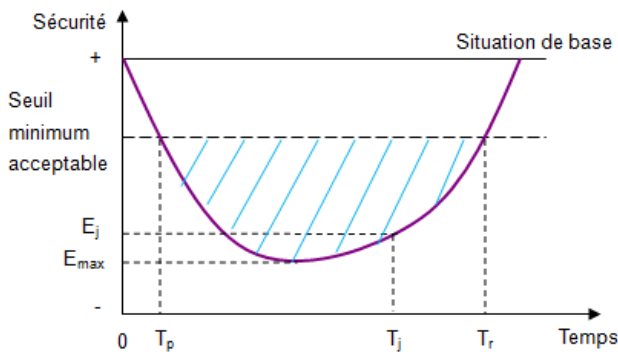


FIG. 3: Evaluation de la résilience d'un SHM par la surface en dessous du seuil minimum acceptable.

Moins cette surface est importante, meilleure est la résilience de notre système pour l'indicateur de sécurité. Il

est ainsi possible de comparer la résilience de différents SHM.

5. Application aux systèmes de transports

La plateforme de CONduite sur Rails et GESTion de Trafic (COR&GEST), développée au LAMIH à Valenciennes, a été utilisée pour simuler un Système Homme-Machine de conduite de trains. Cette plateforme consiste à commander les trains d'une station de départ à un point arrivé. Les opérations de conduite, comme par exemple accélérer, freiner, respecter la signalisation, etc., doivent être exécutées par un opérateur humain. Deux données qui influencent la sécurité du SHM étudié sont prises en compte : la vitesse du train V_t , qui est supposée ne pas dépasser une limite maximale, et le temps de réaction du conducteur T_r , qui correspond à la prise en compte par celui-ci d'un changement de consigne. L'indicateur de sécurité défini dans la section précédente repose dans cet exemple sur ces deux données.

Le train peut être considéré comme en sécurité lorsque la donnée correspondant à la vitesse du train est égale à la vitesse prédéfinie par le concepteur (ou par la signalétique) notée V_p . Plus la vitesse est grande, plus le danger est important. Dans cet exemple, nous ne prenons pas en compte les vitesses inférieures à la préconisation car très peu d'accidents sont liés à ces valeurs dans le domaine ferroviaire. Le temps de réaction correspond à la durée nécessaire pour le conducteur afin de diminuer la vitesse du train en accord avec la consigne. Lors d'un changement de terrain, dans un virage serré par exemple, le conducteur doit rapidement diminuer la vitesse du train. La durée nécessaire pour passer de la vitesse initiale mesurée jusqu'à la consigne donnée est ainsi mesurée et ne doit pas dépasser une limite théorique de temps disponible, noté T_d , définie par le concepteur.

Les données V_t et T_r varient en fonction des situations rencontrées par le conducteur. La fonction de sécurité associée à notre exemple est donnée par l'équation (5).

$$Sécurité(t) = \gamma_v \varpi_v (V_t(t) - V_p(t)) + \gamma_t \varpi_t T_r(t) \quad (5)$$

Où γ_v et γ_t sont respectivement l'influence de la vitesse et du temps de récupération. Ces influences sont des variables en fonction de la valeur de ces données. Deux niveaux sont définis pour chaque donnée avec une valeur limite qui les sépare. La partie en deçà de cette limite est appelée niveau 1 et celle au-delà niveau 2. La valeur limite pour la vitesse est définie par les limites techniques de la plateforme de simulation et prend la valeur V_p+10 . Si on s'intéresse à présent au système KVB (contrôle de vitesse par balises) utilisé dans le domaine ferroviaire, quand la vitesse du train est supérieure à V_p , une alarme sonore retentit et le panneau de contrôle indique au conducteur l'ajustement sans délai qu'il doit effectuer sur sa machine. Si la vitesse dépasse une valeur d'urgence, le KVB freine automatiquement le train. Dans le cadre du temps de

réaction, la limite séparant les deux niveaux est définie par le concepteur à 80% du temps disponible T_d . Si, respectivement, les valeurs V_i et T_r appartiennent au niveau 1, leur influence γ_v et γ_t est calculée comme une variable déterminée par une loi de distribution uniforme entre 0 et 1. Dans le cas contraire, si ces mêmes valeurs appartiennent au niveau 2, leur influence est calculée comme une variable déterminée par une loi de distribution uniforme entre 0 et 3. Une influence plus importante signifie que le système est moins sûr et que la sécurité se dégrade. Enfin, ϖ_v et ϖ_t correspondent au poids des données de la vitesse et du temps de récupération. Ils sont proposés pour équilibrer l'importance de ces données dans le cadre de la sécurité des systèmes. Ils sont donnés par les équations (6) et (7).

$$\varpi_v = \frac{1}{\overline{V_i - V_p}} \quad (6)$$

$$\varpi_t = \frac{1}{T_d} \quad (7)$$

Où $\overline{V_i - V_p}$ est la moyenne de la différence entre la vitesse mesurée V_i et celle prédéfinie V_p .

Durant la simulation, différents événements peuvent se produire. En effet, le superviseur du système peut modifier des consignes afin de tester la réactivité du conducteur. A chaque occurrence d'une perturbation de ce type, nous avons enregistré les différents paramètres du système et avons extrait les données relatives à la vitesse et au temps de récupération afin de tracer la courbe, présentée en figure 4, de l'indicateur de sécurité grâce à la fonction définie précédemment.

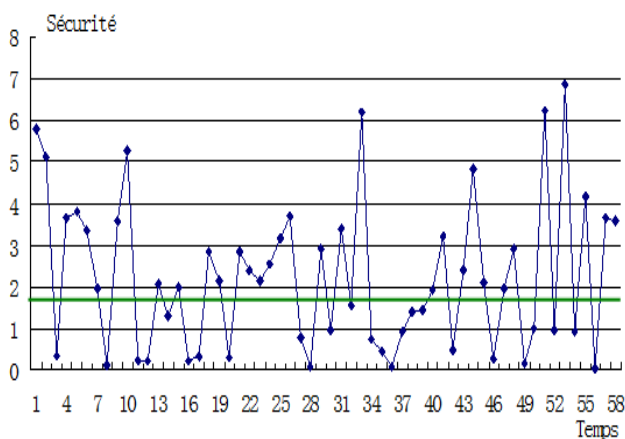


FIG. 4: Evolution de la sécurité lors de la simulation.

Dans cette représentation, les valeurs les plus basses correspondent à un indice de sécurité (sans unité) correct et les plus grandes peuvent mettre en danger l'intégrité du SHM considéré. Les valeurs limites entre les deux niveaux (V_p+10 et $0,8 T_d$) ont été prises en compte pour déterminer

le seuil « maximal » acceptable, représenté dans notre exemple par un seuil linéaire et constant égal à 1,85.

La situation rencontrée et traitée par le conducteur de la manière la plus sûre est la 56^{ème} avec une valeur de 0,03 alors que la plus dangereuse correspond au 53^{ème} cas avec une valeur de 6,8. A partir de cet indicateur, il est à présent possible d'envisager l'évaluation de la surface au dessus du seuil maximal acceptable et de la comparer avec d'autres SHM. Les SHM peuvent ainsi être analysés afin de déterminer la combinaison assurant la meilleure résilience.

6. Conclusion

Dans cet article, nous proposons de déterminer la résilience d'un Système Homme-Machine (SHM) pour la sécurité dans le cadre des transports. Un Etat de l'Art sur le concept de résilience a été développé et une définition dans s'est dégagée. Les principes du modèle Bénéfice Coût Déficit (BCD) ont été présentés. Ce modèle est utilisé pour définir des indicateurs pour l'évaluation des performances des SHM. Nous proposons de nous servir de ce modèle pour mesurer la sécurité, grâce à une fonction qui a été explicitée, et pour évaluer la résilience des SHM considérés. L'application à un système de transport a été évoquée.

La possibilité de considérer plusieurs seuils d'acceptabilité (définis par les utilisateurs ou par le concepteur) est à l'étude. Le calcul d'un ou plusieurs seuils, qui ne seraient plus linéaires ni constants, en fonction des événements précédemment rencontrés ou de l'expérience du conducteur, est aussi envisagé. Enfin, la probabilité de succès d'une action entreprise par un opérateur humain peut être évaluée par réseau Bayésien. L'application de ces probabilités à l'analyse du comportement résilient des SHM pourra être discutée dans une prochaine contribution.

7. Remerciements

Ces travaux de recherche ont été soutenus par le Campus International sur la Sécurité et l'Intermodalité des Transports, la Région Nord-Pas-de-Calais, la Communauté Européenne, la Délégation Régionale à la Recherche et à la Technologie, le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, le Centre Nationale de la Recherche Scientifique, et le Groupement d'Intérêt Scientifique Surveillance, Sûreté et Sécurité des Grands Systèmes.

Les auteurs remercient chaleureusement le support de ces institutions.

Références

- [1] E. Hollnagel and D.D. Woods. *Resilience Engineering: concepts and precepts, chapter Epilogue: Resilience Engineering Precepts*. Ashgate

- publishing, Ltd., Hollnagel, e. and woods, d.d. and leveson, n. edition, 2006.
- [2] V. Goussé. *Apport de la génétique dans les études sur la résilience : l'exemple de l'autisme*. Annales Médico-Psychologiques, 2005.
- [3] S. Martin. *La résilience dans les modèles de systèmes écologiques et sociaux*. Phd thesis, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2005.
- [4] K.H. Orwin and D.A. Wardle. *New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances*. Soil Biology & Biochemistry, 36, 1907-1912, 2004.
- [5] H. Perez-Espana and F. Arreguin-Sanchez. *An inverse relationship between stability and maturity in models of aquatic ecosystems*. Ecological Modelling, 145 (2-3):189-196, 2001.
- [6] C.M. Chen, C.W. Lin and Y.C.Chen. *Adaptive error-resilience transcoding using prioritized intra-refresh for video multicast over wireless networks*. Signal Processing: Image and Communication, 22, 277-297, 2007.
- [7] S. Zieba, P. Polet, F. Vanderhaegen and S. Enjalbert. *Autonomie ajustable et résilience pour une coopération Homme Robot*. Conference CIFA, Roumanie, 2008.
- [8] H. Nakayama, N. Ansari, A. Jamalipour and N. Kato. *Fault-resilient sensing in wireless sensor networks*. Computer Communication, 30, 2375-2384, 2007.
- [9] M.Y. Luo and C.S. Yang. *Enabling fault resilience for web services*. Computer communications, 25(3):198-209, 2002.
- [10] T. Numanoglu, B. Tavli and W. Heinzelman. *Energy efficiency and error resilience in coordinated and non-coordinated medium access control protocols*. Computer Communications, 29, 3493-3506, 2006.
- [11] F.R. Cheveau and J.L. Wybo. *Approche pratique de la culture de sécurité : pour une maîtrise des risques industriels plus efficace*. Revue Française de Gestion, 174, 171-198, 2007.
- [12] P. Polet, F. Vanderhaegen and R. Amalberti. *Modelling Borderline tolerated conditions of use (BTCUs) and associated risks*. Safety Science, 41, pp. 111-136, 2003.
- [13] F. Vanderhaegen. *Analyse et contrôle de l'erreur humaine*. Hermès Science, 2003.
- [14] A. Chaali-Djelassi. *Modélisation et prédiction des franchissements de barrière basées sur l'utilité espérée et le renforcement de l'apprentissage application à la conduite automobile*. Phd. Thesis. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2007.