



HAL
open science

Définir la fiabilité de l'opérateur humain pour concevoir les futurs systèmes autonomes : un regard des Facteurs Organisationnels et Humains

Paglia Christopher, Richard Philippe, Carli Yanna, Boussif Abderraouf

► To cite this version:

Paglia Christopher, Richard Philippe, Carli Yanna, Boussif Abderraouf. Définir la fiabilité de l'opérateur humain pour concevoir les futurs systèmes autonomes : un regard des Facteurs Organisationnels et Humains. Congrès Lambda Mu 23 " Innovations et maîtrise des risques pour un avenir durable " - 23e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2022, Paris Saclay, France. hal-03968262

HAL Id: hal-03968262

<https://hal.science/hal-03968262>

Submitted on 1 Feb 2023

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.

Définir la fiabilité de l'opérateur humain pour concevoir les futurs systèmes autonomes : un regard des Facteurs Organisationnels et Humains

Define human reliability to design the future autonomous systems: a view from Organizational and Human Factors

PAGLIA Christopher
IRT Railenium
180 rue Louis-Joseph
Lagrange, Famars, France
christopher.paglia@railenium.eu

RICHARD Philippe
IRT Railenium
180 rue Louis-Joseph
Lagrange, Famars, France
philippe.richard@railenium.eu

CARLI Yanna
IRT Railenium
180 rue Louis-Joseph
Lagrange, Famars, France
yanna.carli@railenium.eu

BOUSSIF Abderraouf
IRT Railenium
180 rue Louis-Joseph
Lagrange, Famars, France
abderraouf.boussif@railenium.eu

Résumé — L'intégration de systèmes autonomes dans les transports continuent de progresser afin d'atteindre, à terme, des systèmes entièrement autonomes. Le domaine du transport ferroviaire ne fait pas exception et de nombreux projets, nationaux ou internationaux, sont en cours ou voient le jour. Le transport ferroviaire est réputé sûr. Cela passe notamment par des processus de certification des systèmes ferroviaires déployés. Un principe fondamental de l'assurance de sécurité ferroviaire est : *l'intégration d'une nouvelle fonction ou la modification d'une fonction ne doit pas péjorer le niveau de sécurité*. Pour vérifier ce principe, le projet TA-SV a fait le choix de réaliser une comparaison par rapport aux systèmes existants. Cela impose de connaître le niveau de sécurité (et de fiabilité humaine) du conducteur actuel vis-à-vis des événements redoutés qui seront à la charge du futur système technique. L'objet des activités présentées dans ce papier est de proposer une méthodologie permettant d'atteindre cet objectif.

Mots-clés — *Fiabilité humaine, systèmes autonomes, transport ferroviaire, assurance de sécurité*

Abstract — The integration of autonomous systems in transport continues to progress with the aim of eventually achieving fully autonomous systems. The field of rail transport is no exception and many projects, both national and international, are underway or being developed. Rail transport is known to be safe. This is achieved through certification processes for the railway systems deployed. A fundamental principle of safety assurance is: *the integration of a new function or the modification of a function must not reduce the safety level*. To ensure this principle, the project has chosen to make a comparison with existing systems. This requires knowing the safety and the human reliability levels of the current driver with respect to the hazardous events that will be on the responsibility of

the future technical system. The purpose of the activities presented in this paper is to propose a methodology to achieve this objective.

Keywords — *Human reliability, autonomous systems, railway, safety assurance*

I. INTRODUCTION

Le déploiement de systèmes automatiques dans le domaine ferroviaire a débuté dans les années 80 [1]. Les systèmes automatiques jouaient et continuent de jouer un rôle de protection permettant d'assurer la sécurité et sont, le plus souvent, regroupés sous la dénomination ATP (Automatic Train Protection). Ces systèmes visent avant tout à protéger le système lors d'une potentielle erreur humaine par exemple, par le calcul de courbe de vitesse avec généralement un freinage d'urgence, en cas de dépassement de la vitesse calculée ou lors du franchissement d'un signal restrictif. Les trains, notamment en France, sont considérés comme étant des trains circulant en mode GoA1 (Grade of Automation, voir [2] pour plus d'informations sur les modes d'autonomisation ferroviaire). D'autres fonctions de sécurité sont aujourd'hui assurées par l'Homme. Avec le futur déploiement des systèmes autonomes, une partie (modes GoA2 et GoA3) ou l'intégralité (mode GoA4) de ces fonctions de sécurité, en plus des fonctions de conduite, seront allouées au système technique. Des problématiques d'assurance de sécurité vont se poser. En effet, lors du déploiement de nouvelles technologies ou fonctions dans le système ferroviaire, il est interdit de dégrader le niveau de sécurité [3]. Pour préparer la démonstration de ce principe dans le cadre du train autonome, le projet Train Autonome – Service Voyageur (TA-SV) [4], dans lequel ces travaux sont réalisés, a fait le choix d'utiliser

la méthode de comparaison par rapport à un système existant par l'utilisation du principe GAME (Globalement Au Moins Équivalent). Pour appliquer le principe GAME, il est nécessaire d'évaluer le niveau de fiabilité du système actuel, dont celui de l'opérateur humain, pour ne pas le dégrader, et ce quelles que soient les estimations que l'on peut en faire préalablement. En effet, même si aujourd'hui des véhicules autonomes ont pu être évalués comme étant plus fiables que l'humain, rien ne permet de démontrer que le niveau de sécurité du futur système autonome sera forcément supérieur à celui du système actuel incluant l'humain. Effectivement, le système n'existe pas encore complètement et il n'est pas possible d'identifier au préalable toutes les nouvelles situations dégradées propres au TA qui pourront survenir. Ce défi constitue une question de recherche majeur pour le déploiement des futurs trains autonomes et constitue le cœur d'activité de nombreuses recherches dont [5]. Cela va dans le sens de [6], qui mentionne le manque de données en lien avec la probabilité d'erreur humaine dans le ferroviaire.

Pour atteindre cet objectif, nous avons généré une hypothèse méthodologique, basée sur [7], comme support à la réflexion. Celle-ci a permis de soulever des questionnements auxquels il semblait pertinent de répondre. Cela a permis de centrer l'étude de la littérature autour de la fiabilité humaine et des SIL (Safety Integrity Level) afin d'identifier les éléments nécessaires à l'atteinte de l'objectif.

Il est à noter que, bien qu'elle soit conçue pour le domaine ferroviaire, cette méthodologie se veut générique et peut être facilement adaptée à d'autres domaines.

II. L'HYPOTHESE METHODOLOGIQUE

Cette hypothèse est le support à la réflexion autour de la future méthodologie. Elle est considérée comme la donnée d'entrée permettant de construire notre réflexion et notre investigation. Elle a été définie au début des travaux sur la base des connaissances des experts FOH (Facteurs Organisationnels et Humains) et trouve son origine dans le processus en 7 étapes défini par [7] :

1. L'analyse des tâches vise à déterminer en détail le rôle des opérateurs et leurs interactions avec les systèmes (analyse hiérarchisée de tâche, diagramme de décision-action) ;
2. L'identification des erreurs humaines est jugée, par [8], comme l'étape la plus difficile et vise à lister les potentielles erreurs humaines sur les tâches préalablement définies. Elle peut s'appuyer sur des méthodes type THERP - Technique for Human Error Rate Prediction [9], Human Error HAZOP - HAZard and OPerability, SHERPA – Simulator for Human Error Probability Analysis [10], approche SRK SRK - Skills Rules Knowledges, CREAM – Cognitive Reliability and Error Analysis Method [11] ;
3. La représentation des erreurs humaines vise à construire une modélisation des erreurs humaines en relation avec d'autres défaillances matérielles. Cette représentation peut prendre la forme d'un arbre de défaillance ou d'un arbre d'événements ;
4. L'évaluation de la criticité des erreurs vise à évaluer l'impact des erreurs sur la sécurité du système. Elle permet de repérer des erreurs critiques pour la sécurité ;

5. L'analyse et la quantification des risques associés aux erreurs se basent sur un ensemble de méthodes, par exemple : THERP, TESEO, HEART ... ;
6. La réduction des risques associés aux erreurs s'applique aux causes des erreurs identifiées ou sur les facteurs de performance utilisés dans la phase de quantification ;
7. Le document et l'assurance de la qualité consistent à documenter les méthodes et résultats obtenus. Les méthodes et résultats doivent pouvoir être audités par une équipe d'évaluation indépendante.

À partir de ces éléments, une méthodologie hypothétique a été définie. Elle comporte 3 étapes :

1. Définir les facteurs potentiels générateur d'erreur. Cette étape est inspirée des étapes 1 à 4 de [7]. Elle vise, par des observations de terrain et de l'étude du prescrit à identifier et comprendre les tâches demandées et les erreurs humaines potentiellement associées ;
2. Définir la probabilité d'erreur humaine (fiabilité humaine). Elle est le miroir de l'étape 5 défini par [7] ;
3. Traduire la probabilité d'erreur humaine en une grandeur susceptible d'être traduite en un niveau de SIL. Cette étape est directement liée à la problématique de l'étude. Elle est présente pour répondre aux attentes des experts sécurité impliqués dans la future démonstration de sécurité.

Les étapes 6 et 7 de [7] ont été écartées de la conception de notre hypothèse méthodologique, car elles traitent d'éléments qui ne sont pas étudiés dans le cadre de notre étude. Chaque étape de la méthodologie propose des méthodes pouvant être utilisées pour atteindre l'objectif de l'étape. Elles sont présentées dans la Figure 1.

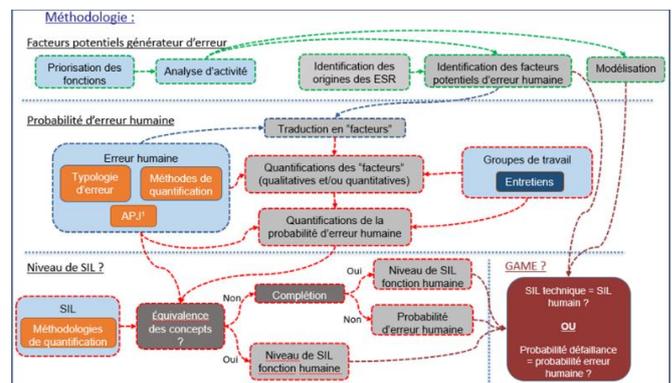


Figure 1 : Hypothèse méthodologique support à l'étude

La première étape consiste à identifier les ESR (Événement de Sécurité Remarquable) aux travers des REX (Retour d'Expérience) et obtenir de premières informations sur les causes via la description des événements.

Il est, selon nous, nécessaire de s'assurer que les REX sont suffisamment exhaustifs en termes de recensement d'événements mais également au regard de la ou les cause(s) les ayant engendrés. Cette première étude est complétée par une approche « ergonomie de l'activité » définie par l'IEA (Association Internationale d'Ergonomie) qui permet de comprendre et de modéliser la prescription et l'activité telle

qu'elle est effectuée. Il est alors possible de relier les facteurs générateurs d'erreurs identifiés avec les étapes de l'activité modélisée. Néanmoins, la mise en place d'une analyse d'activité est couteuse en temps. Sans préjuger en amont de la pertinence ou non de cette méthode, nous pensons qu'il est nécessaire d'investiguer si d'autres méthodes moins couteuses sont envisageables et de définir leurs avantages / inconvénients afin d'orienter les futurs utilisateurs de la méthodologie. Il est d'ailleurs, selon nous, aussi nécessaire de questionner l'impact du contexte (lignes, matériel utilisé...) sur la fiabilité de l'opérateur humain.

La seconde étape concerne la quantification de la fiabilité humaine. La littérature montre une utilisation accrue des méthodes HRA pour réaliser cette quantification. Cette étape semble indispensable car la probabilité d'erreur humaine paraît être ce qui se rapproche le plus d'une probabilité de défaillance. Cela nous amène à nous interroger sur la possibilité de transposer une valeur de fiabilité humaine vers un SIL (ou équivalent).

La troisième étape consiste donc à transposer la donnée de fiabilité humaine dans une unité compatible avec la démonstration de sécurité. Il est donc nécessaire de s'interroger sur cette démonstration de sécurité et les données utilisées. Cela nous amène à nous questionner sur l'utilisation des méthodes HRA, leur avantages / inconvénients et leur applicabilité dans notre contexte, ainsi que sur les données utilisées dans le cadre de la démonstration de sécurité.

Sur la base de ces questionnements, 4 thèmes principaux sont prépondérants :

1. Qu'est-ce que la fiabilité humaine dans les systèmes complexes ?
2. Quelles sont les méthodes alternatives à l'analyse d'activité pour définir le niveau de fiabilité de l'opérateur humain ?
3. Quelles sont les méthodes HRA et quels sont leurs avantages et inconvénients ?
4. Que représente un SIL et quels sont les concepts associés ?

Pour apporter des réponses à ces questions, un état de l'art a été réalisé autour de 2 thématiques principales : la fiabilité humaine et les SIL.

III. UN ÉTAT DE L'ART

Le concept central pressenti de la méthodologie est la fiabilité humaine. La fiabilité humaine est définie par [12] comme la probabilité qu'une personne exécute correctement une activité requise dans un délai requis (si le temps est un facteur limitant) et ne réalise aucune activité complémentaire (sans rapport avec la tâche) qui pourrait dégrader le système.

A. La fiabilité humaine et sa quantification

Dans un rapport pour la Fondation pour une culture de la sécurité industrielle (FONCSI) , [13] décrit les attentes du « fiabiliste » par rapport à l'humain. Il indique que « *le fiabiliste est friand de contributions des spécialistes de l'Homme au travail sous forme de probabilité (de fréquence ou de taux) d'erreurs humaines, [...] les cas où des régularités statistiques de ce type sont avérées sont plutôt rares et relèvent surtout de tâches simples et répétitives, [...] les connaissances issues des sciences humaines et sociales permettent plus*

souvent, plus directement, de construire, d'améliorer un système du point de vue des risques que de calculer ceux-ci ». Cette réflexion amène à se poser des questions sur les méthodes permettant de quantifier la fiabilité humaine.

Les méthodes d'analyse de fiabilité humaine (HRA) ont été proposées pour intégrer systématiquement les facteurs humains dans le cadre d'une activité d'analyse probabiliste des risques [14][15]. Ces méthodes ont évolué avec le temps et sont classifiées en 3 générations.

La première génération est centrée sur l'erreur humaine assimilant l'individu à un élément parmi d'autres du système technique (TESEO [16], THERP [9]...). La deuxième génération s'intéresse aux processus cognitifs permettant d'expliquer et prédire les défaillances humaines (CREAM [11], ATHEANA – A Technique for Human Event Analysis [17]). La troisième génération, quant à elle, est beaucoup plus récente et souffre, selon les experts du domaine, d'une faible quantité de publications. Les méthodes de troisième génération sont basées sur la méthode HEART de première génération et s'intéressent à l'environnement organisationnel de travail susceptible de conduire et contraindre l'individu à l'erreur (WPAM – Work Process Analysis Model [18], BORA – Barrier and Operational Risk Analysis [19]...).

Il serait réducteur de ne présenter que la classification des méthodes par génération. [20] et [21] considèrent que cette classification n'est pas suffisante. [22] a proposé une classification par types d'approches :

1. Le niveau de détail des analyses réalisées ;
2. Le type de modélisation cognitive prise en compte ;
3. La manière dont sont pris en compte la dimension temporelle, les facteurs contextuels et les données de fiabilité utilisées.

La variabilité des méthodes HRA présentée dans la littérature doit permettre à l'évaluateur d'identifier la méthode permettant de répondre à ses objectifs en fonction de l'activité réalisée par l'opérateur humain.

Cette variabilité se retrouve notamment dans la multitude des méthodes disponibles. De nombreuses méthodes d'identification et de quantification de la fiabilité humaine sont disponibles mais peu ont fait l'objet d'une réelle validation [23][24][25]. L'étude de [23] a permis d'identifier 72 méthodes et acronymes concernant la fiabilité humaine. [26] mentionnent une quarantaine de méthodes alors que [25] indiquent, quant à eux, environ 70 méthodes. De notre point de vue, cela traduit un manque de consensus et nous amène à émettre l'hypothèse suivante : la création de notre méthodologie doit se baser sur plusieurs entrées et sorties en fonction des données d'entrée disponibles, de la tâche étudiée et de la précision de la fiabilité humaine souhaitée sur la tâche.

Il semblerait que le choix d'une méthode parmi le panel de méthodes disponibles dépende avant tout du projet de l'analyste et de l'efficacité recherchée par la méthode.

Pour rappel, l'hypothèse méthodologique initiale s'inspire, dans sa structure, de la démarche décrite par [7]. Il nous paraît pertinent de conserver une structure similaire pour la méthodologie finale. De notre point de vue, 3 types d'approche sont envisageables pour déterminer la fiabilité humaine :

1. Une approche hypothétique, théorique ou normative. Il existe, dans la littérature scientifique, des tables qui présentent des valeurs de fiabilité humaine en fonction de tâches génériques types (ex : tâche simple / tâche complexe) et du contexte dans lequel elles sont réalisées (ex: contexte calme / contexte stressant). L'idée est d'associer la tâche / l'activité étudiée à une de ces tâches génériques. Cependant, ces tâches ne tiennent pas compte de la variabilité des situations rencontrées par un Agent de Conduite au cours de sa mission et ne tient pas compte des mesures mises en place par un Agent de Conduite afin d'améliorer sa fiabilité. Cette approche peut cependant être utilisée comme une première approximation.
2. Une approche basée sur le REx. [27] indique que, dans les études de sécurité ferroviaire, l'évaluation quantitative brute des erreurs (et par extension, la fiabilité humaine) peut être intéressante, mais risque aussi d'amener les dirigeants à se focaliser sur des chiffres dénués de pertinence. [28] indiquent que l'analyse de la fiabilité humaine, dans le but d'estimer une probabilité de défaillance, doit se faire de préférence à l'aide des données issues des REx. Le retour d'expérience est jugé comme une approche pertinente pour la définition de la fiabilité d'un opérateur humain. Le REx a l'avantage de se baser sur un contexte clairement défini, dans un environnement clairement défini et doit être complété à chaque fois qu'un événement se produit. L'étude de la littérature indique que les retours d'expérience devraient être la meilleure approche, même si les données peuvent être difficile à obtenir.
3. Une approche basée sur les méthodes HRA. L'utilisation des méthodes HRA ne permet pas d'obtenir, pour une même situation, la même valeur de fiabilité de l'opérateur humain en fonction de la méthode utilisée et en fonction de l'analyste. La méthode HEART ne semble pas applicable au ferroviaire selon [29]. Globalement, les méthodes développées dans un contexte autre que le domaine ferroviaire permettront d'obtenir des données de fiabilité que nous ne pouvons pas garantir comme fiables. En effet, les tâches et le contexte (temps pour réaliser la tâche, par exemple) varient et peuvent impacter négativement le taux de fiabilité de l'opérateur humain.

Il est maintenant question, comme précisé plus haut, de déterminer s'il est nécessaire de transposer la donnée de fiabilité humaine pour l'utiliser dans une éventuelle démonstration de sécurité.

B. SIL et THR

Le postulat de départ est l'application du principe GAME, permettant de respecter le principe suivant : il est interdit de dégrader le niveau de sécurité [3]. L'hypothèse de départ du projet était d'allouer un niveau de SIL (Safety Integrity Level) aux tâches / fonctions sécuritaires humaines. Nous nous sommes donc penchés sur le concept de SIL. La notion d'intégrité de sécurité du système caractérise l'aptitude du système à remplir les fonctions de sécurité requises et servent à caractériser la hauteur de l'effort consenti pour réduire le risque encouru [30]. La notion de SIL a fait l'objet de plusieurs normes dont une des déclinaisons concerne les systèmes

ferroviaires [31]. Les SIL sont caractérisés par des indicateurs discrets et matérialisés par une échelle à 4 niveaux (de 1 : impact mineur sur les installations et la production, à 4 : impact catastrophique [32]). Une table de transposition permet d'allouer un niveau de SIL en fonction d'une probabilité de défaillance à l'heure ce qui nous amène à la notion de THR (Tolerable Hazard Rate). Il s'agit d'un objectif de sécurité quantifié qui se rapporte à un mode de défaillance d'une fonction relative à la sécurité [33]. Le niveau d'intégrité de sécurité (SIL) est attribué à cette fonction sur la base des THR répartis sur les différentes fonctions et par la correspondance THR(TFFR) / SIL présenté dans la norme CENELEC, NF EN 50126 [34].

Les auteurs de [35] indiquent que la prise en compte des facteurs humains n'a pas été associée au mouvement normatif (IEC 61508, EN 50126/28/29). Les normes ferroviaires ne couvrant pas ou peu les aspects liés aux facteurs humains, il ne sera pas possible d'extraire, *a priori*, des données directement issues de ces normes. L'intégration des aspects facteurs humains dans les normes semblent être une préoccupation importante. Les activités menées dans le projet pourraient apporter une contribution pour les instances normatives qui visent l'intégration des facteurs humains dans le processus normatif.

Au niveau Européen, pour couvrir le principe GAME cité précédemment et uniformiser les démonstrations de sécurité au niveau Européen, l'EURA a développé des guides permettant d'appliquer les directives Européennes, autour des méthodes appelées Méthodes de Sécurité Communes (Common Safety Methods – CSM) [36][37].

[37] indique que l'acceptabilité des risques peut être évaluée selon 3 principes :

- Les codes de bonne pratiques (COP), qui fait référence à la méthode MSC1 ;
- La comparaison à un système existant (MSC2) et / ou ;
- Une estimation explicite du risque (MSC3).

Le choix réalisé par le projet est d'utiliser une approche basé sur la MSC2.

Sur la base de cet état de l'art et des objectifs du projet, une méthodologie **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** est proposée.

IV. PROPOSITION METHODOLOGIQUE

La méthodologie proposée est issue des conclusions de l'état de l'art et se décompose en 4 étapes (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) :

- L'étape 0 est ainsi numérotée car il s'agit d'une étape facultative ayant pour objectif principal d'apporter la connaissance de l'événement aux experts qui utiliseront la contribution méthodologique. Si les experts ont déjà cette connaissance, il n'est pas requis de l'appliquer.
- L'étape 1 consiste à générer les données d'entrée qui permettront ensuite à l'étape 2 de déterminer un niveau de fiabilité humaine ;

- L'étape 2 permet donc de déterminer un niveau de fiabilité humaine sur l'événement / la situation étudié ;

niveau de probabilité de survenu de l'événement étudié en lien avec l'activité humaine. L'intégrité des données est une condition sine qua none à la réussite de la démarche. À ce

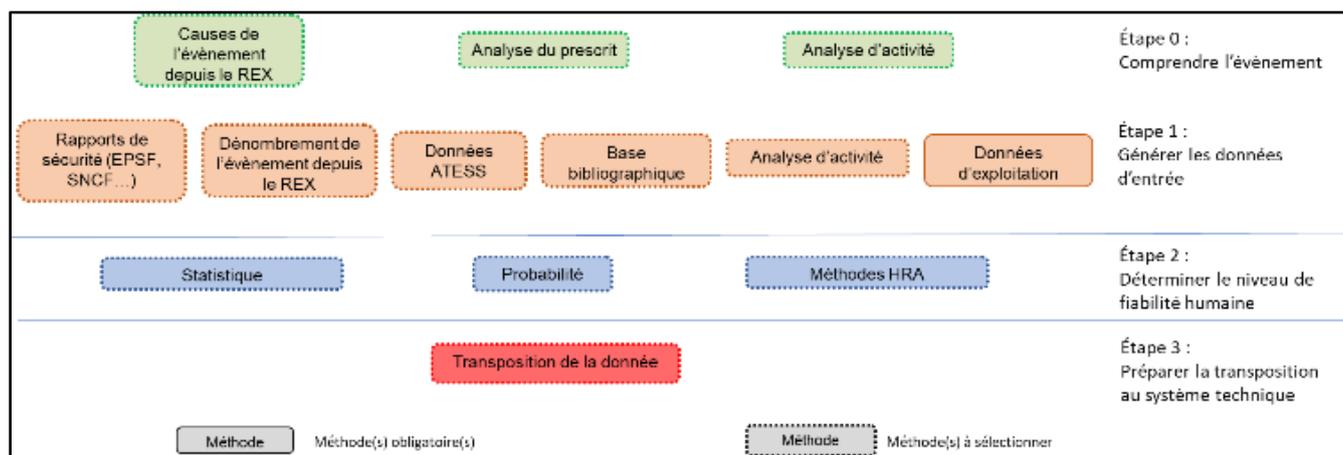


Figure 2 : Proposition méthodologique

- L'étape 3, quant à elle, permet de transposer la donnée générée à l'étape 2 dans une unité correspondant aux besoins des experts sécurité qui devront spécifier le type d'unité attendu en fonction des technologies couvrant l'événement.

Chaque étape propose un ensemble de méthodes pouvant être appliquées. Celles-ci peuvent être utilisées individuellement ou couplées en fonction des besoins. Pour aider dans le choix, les avantages et inconvénients ont été définis pour chaque méthode et une première vision du ou des contextes d'utilisation a été donnée). Les avantages ou inconvénients sont souvent en relation avec la disponibilité de la données, sa précision, le temps nécessaire pour l'obtenir ou mettre en œuvre la méthode.

A. Étape 0 : Comprendre l'événement

Il s'agit d'une étape facultative en préambule à la contribution méthodologique. Elle vise à développer les connaissances de l'évaluateur sur l'événement ou la situation à analyser. Par conséquent, nous incitons, les utilisateurs de la méthodologie à inclure, dans la démarche, une personne portant la voix du métier étudié. Cela permet d'éviter l'utilisation d'une image erronée de l'activité, qui est souvent centrée uniquement sur le prescrit.

Dans cette étape, l'évaluateur peut utiliser différentes méthodes (étape 0) lui permettant d'appréhender l'événement / la situation dans le but de définir notamment, dans les étapes suivantes, les méthodes les plus adaptées pour l'étude de cet(te) événement / situation. Nous distinguons, pour cette étape, trois méthodes : l'analyse du prescrit, l'analyse ergonomique de l'activité (observations ouvertes, pour être plus précis) et l'analyse du REx de l'exploitant. Il est à noter que l'analyse de la prescription et l'analyse ergonomique de l'activité ne peuvent pas se faire indépendamment puisque les deux approches permettent de s'éclairer et de comprendre le travail des opérateurs concernés par l'étude. Le REX permet à l'évaluateur de s'appropriier l'événement ou la situation étudiée afin d'identifier les causes de l'infirmité humaine.

B. Étape 1 : Générer les données d'entrée

La création du corpus d'étude est une étape clé de la méthodologie. Elle va permettre, dans les étapes suivantes, de définir le niveau de fiabilité de l'opérateur humain ou le

stade de la conception de la contribution méthodologique, nous envisageons différentes méthodes permettant de générer les données d'entrée : REx de l'exploitant ferroviaire, rapports de sécurité (EPSF – Établissement Public de Sécurité Ferroviaire, SNCF – Société Nationale des Chemins de Fer français ...), données ATESS (Acquisition et Traitement des Événements de Sécurité en Statique), avis d'experts, base bibliographique, analyse d'activité. Dans tous les cas, cette étape doit permettre de constituer un ensemble de données suffisamment robuste pour répondre aux besoins de l'étape suivante (étape 2).

1) REx de l'exploitant ferroviaire

Utilisation : Si cette méthode est choisie, l'évaluateur doit filtrer et comparer les événements afin de s'assurer qu'aucun élément n'est doublé dans le fichier d'analyse. Plusieurs sources peuvent permettre d'accéder aux données souhaitées : l'exploitant ferroviaire (service sécurité, open data ...); l'utilisation de la base SCOTES (Système COMMun de Traitement des Événements de Sécurité, source EPSF, base qui, depuis 2017, recense l'ensemble des événements remontés par les exploitants ferroviaires) s'il est possible d'extraire uniquement les événements de l'exploitant ferroviaire concerné. L'objectif est de dénombrer les situations et les catégoriser, *a posteriori*, selon différentes variables propres à l'évaluateur ou à la situation à évaluer. Par exemple, il peut être judicieux de séparer les événements qui se sont produits en conduite voyageurs et en conduite fret. En effet, dans [38] et [39], un écart significatif du nombre signaux rencontrés fermés entre l'activité Fret et l'activité Voyageurs est pointé. Il peut également être intéressant de distinguer les variables propres à l'événement de sécurité. Prenons l'exemple du franchissement intempestif d'un signal d'arrêt fermé, il peut s'avérer utile de distinguer les carrés violets, les sémaphores, etc. L'évaluateur doit être en mesure de maîtriser cette granularité d'analyse afin de répondre aux objectifs qui lui sont demandés d'atteindre.

Contextes favorables : L'utilisation du REX de l'exploitant ferroviaire est favorable pour toutes les analyses se basant sur un événement de sécurité repris dans le REx de l'exploitant, par exemple : les franchissements intempestifs d'un signal

d'arrêt fermé, les dépassements de vitesse limite de plus de 40 km/h.

Avantages : Le REx doit, en principe, reprendre l'intégralité des événements. Certaines situations d'analyses sont donc censées être couvertes intégralement par cette donnée d'entrée. Cette reprise, en principe, de l'intégralité des événements doit permettre d'identifier facilement l'origine des événements et écarter ceux qui n'entrent pas dans le cadre de l'étude menée.

Inconvénients : Le REx souffre d'un manque d'homogénéité dans sa rédaction [40]. Il ressort de l'analyse que nous avons pu en faire (sur la base des données présentes dans SNCF open data) que la finesse de la description de l'événement varie en fonction du rédacteur. De plus, certains événements sont attribués à l'opérateur humain (ou semble l'être) ou à un système technique sans qu'il ne soit possible de d'en définir avec certitude les causes et origines en raison d'une description incomplète ou orientée par le rédacteur. Par exemple, la description peut être focalisée sur les minutes / secondes précédant l'événement sans s'attarder à décrire l'ensemble des erreurs latentes ou les situations ayant pu conduire à la survenue de l'événement. Bien que le REX recense la totalité ou la quasi-totalité des événements repris dans cette base de données, il ne permet pas de définir le nombre de sollicitations pouvant générer l'événement. Prenons l'exemple du franchissement intempestif d'un signal fermé, l'évaluateur a la capacité de définir le nombre de franchissements mais il n'est pas en mesure de définir le nombre de fois où un signal fermé est présenté à un AdC (Agent de Conduite). Il est possible d'accéder à cette dernière donnée en se basant sur une estimation du nombre de signaux présentés fermés et sur le temps total de conduite, informations pouvant être obtenues auprès de l'exploitant ferroviaire (cf. *Données d'exploitation*). Si le REx est envisagée pour élaborer les données d'entrée, il est nécessaire de s'assurer que le recensement est au plus proche de la réalité. La méthode ATESS pourrait permettre de s'assurer que ces données (ou certaines données, les auteurs ne connaissant pas l'intégralité des données enregistrées dans les bandes ATESS) sont proches de la réalité. Une association des 2 méthodes pourraient être pertinentes.

2) *Rapports de sécurité*

Utilisation : Les rapports de sécurité permettent d'obtenir rapidement des données sur un événement ou une situation particulière. Les rapports de sécurité de l'EPSF ou de la SNCF sont édités tous les ans. Cela permet d'étudier la variation des événements d'une année sur l'autre. Les rapports de sécurité ne nécessitent pas un grand traitement par l'analyste. Celui-ci peut prendre connaissance de l'évolution des chiffres en consultant les rapports précédents.

Contextes favorables : Les rapports de sécurité sont particulièrement utiles pour obtenir des données concernant les événements de sécurité qui sont suivis par les différentes instances françaises et européennes. Nous pouvons citer par exemple : le nombre relatif de collisions, le nombre relatif de déraillements, le nombre relatif de franchissements de signaux fermés.

Avantages : Il est possible de suivre l'évolution de certains événements ou situations sur les dernières années et ainsi étudier les chiffres sur un « empan temporel glissant ». L'intégrité des données est censée être garantie.

Inconvénients : Dans la littérature scientifique, les unités des données présentées dans les rapports sont critiquées [41] et ne permettent pas une comparaison fiable avec un futur système. Ces unités sont souvent en lien avec un volume d'activité, par exemple : train-km ; train de voyageurs-km. De plus, les chiffres communiqués sont décontextualisés et ne permettront pas à l'évaluateur de construire des variables d'étude *a posteriori*. Certains rapports peuvent englober plusieurs entreprises ferroviaires notamment les rapports de l'EPSF. L'utilisation de l'ensemble des données peut biaiser l'évaluation réalisée pour une seule entité.

3) *Données ATESS*

Utilisation : Les données ATESS constituent des données brutes à analyser. Elles permettent de comprendre le comportement du train en réponse à des actions de l'AdC ou des systèmes d'aide. Chaque AdC s'identifie en amont de sa conduite et l'ATESS enregistre les actions. Ces actions sont horodatées. Il est ensuite possible de reconstruire la mission à partir des données. Le BEA-TT (Bureau d'Enquête et d'Accidents – Transports Terrestres), dans un rapport d'enquête, indique que l'outil ATESS permet d'étudier *a posteriori* les principaux paramètres de la rame et de la conduite afin de comprendre les événements qui ont été susceptibles de compromettre la sécurité. Parmi ces événements on retrouve par exemple : le franchissement d'un PN (Passage à Niveaux), l'activation des SAL (Signal d'Alerte Lumineux) – SAR (Signal d'Alerte Radio) , les vitesses de circulation.

Contextes favorables : Les données ATESS semblent (les auteurs insistent sur le verbe « sembler » puisqu'ils n'ont pas eu la possibilité d'étudier un enregistrement complet et n'ont pas eu accès à l'ensemble des données enregistrées) utilisables pour l'ensemble des événements où au moins une variable d'analyse en lien avec l'événement est enregistrée. Par exemple, les données ATESS sont intéressantes pour étudier finement les dépassements de vitesse limite, le nombre de franchissement de signal d'arrêt.

Avantages : Les événements enregistrés dans les ATESS sont les données les plus exhaustives auxquelles il est possible d'avoir accès et qui représentent le plus fidèlement la réalité.

Inconvénients : Le traitement de masse des données ATESS est compliqué. Il est nécessaire d'utiliser / développer un outil d'analyse qui permette de traiter les données souhaitées sur un grand volume d'enregistrement. Le traitement des données ne permet pas de définir si un événement de sécurité est causé exclusivement par la conduite de l'opérateur humain ou si un système technique l'a provoqué. L'association des données ATESS de l'événement étudié à celles issues des REx pour ce même événement permettrait d'aider à identifier les causes de ce dernier (si cette association est possible).

4) *Base bibliographique*

Utilisation : La base bibliographique consiste à directement identifier la fiabilité de l'opérateur ou la probabilité de survenue d'un événement de sécurité dans la littérature scientifique. L'objectif est d'obtenir, dans un délai réduit, cette valeur en se basant sur les travaux antérieurs publiés.

Contextes favorables : Cette méthode ne doit pas être la première envisagée puisqu'elle présente de nombreux inconvénients. Cependant, elle peut être utilisée si une valeur est demandée dans un temps restreint à l'évaluateur. La

littérature scientifique est assez riche concernant les franchissements de signal d'arrêt. Il semble que ce soit la situation la plus favorable mais l'évaluateur peut investiguer rapidement, sur la base des moteurs de recherche existants, la littérature scientifique en lien avec l'événement qu'il analyse.

Avantages : Cette méthode a l'avantage de pouvoir donner rapidement une valeur de la fiabilité. Elle permet d'obtenir une valeur cible plutôt qu'une valeur réelle de la fiabilité ou de la probabilité de survenue d'un événement.

Inconvénients : Il est peu probable d'obtenir une valeur fiable dans la mesure où les recherches présentées dans la littérature peuvent différer du cas d'application. Par exemple, les contextes peuvent être différents (train de fret VS train de voyageurs), l'activité peut être différente (franchissement des signaux d'arrêt lors de manœuvre VS franchissement des signaux d'arrêt en circulation).

5) Analyse d'activité

Utilisation : L'analyse ergonomique du travail vise à confronter les exigences de la tâche (ce qui est à faire par un opérateur – application réglementaire par exemple) et les attitudes et séquences opérationnelles, appelées « activité » (comment l'opérateur fait-il pour réaliser la tâche ?) [43]. L'objectif de l'analyse d'activité est donc de comprendre comment un opérateur atteint l'objectif fixé dans un contexte donné (en tenant compte de la tâche prescrite), et s'il n'y parvient pas, d'en identifier la (les) raison(s). Il est donc nécessaire, pour cette méthode, d'organiser des observations en accompagnant des agents. L'analyse d'activité se fait en 4 temps : observation ouverte (compréhension globale de l'activité), création d'hypothèses et pré diagnostic, observation systématique (analyse fine de certaines phases de l'activité), diagnostic.

Contextes favorables : L'analyse d'activité peut se faire pour l'ensemble des événements étudiés, l'ensemble des contextes d'exploitation. Elle va permettre de comprendre l'activité de conduite, d'appréhender les gestes métiers et définir les éléments qui pourraient péjorer la sécurité dans le cadre de l'automatisation de la conduite.

Avantages : L'analyse de l'activité permet de comprendre l'activité telle qu'elle est réalisée sans se focaliser uniquement sur la prescription. Elle permet également de comprendre ce qui est mis en place pour assurer la sécurité des circulations en complément de la prescription.

Inconvénients : L'analyse d'activité est longue à mettre en place tout comme son analyse. Elle ne permet pas de définir, sans mise en place d'une autre méthode, un niveau de fiabilité ou de la probabilité de survenue d'un incident. Elle ne permet pas d'observer systématiquement les événements de sécurité.

6) Données d'exploitation

Utilisation : Ces données sont requises pour l'étape 3 de la méthodologie en fonction des besoins formulés par les utilisateurs de cette dernière et en fonction des événements étudiés. Il peut s'agir par exemple : du temps de conduite moyen annuel, du nombre de signaux présentés fermés sur une année.

Contextes favorables : Il n'y a pas de contexte favorable à préciser, cette orientation étant requise.

Avantages : Il s'agit de données qui proviennent du terrain et sont réputées fiables. Ces données devraient être accessibles.

Inconvénients : En fonction des besoins de l'étape 3, les données d'exploitation pourraient ne pas être disponibles dans l'unité requise ou être basées sur des estimations, toute mesure n'étant pas disponible. Les données peuvent également englober des situations annexes à notre étude.

C. Étape 2 : Déterminer le niveau de fiabilité humaine

Cette étape consiste à utiliser les données générées à l'étape précédente pour définir la fiabilité de l'opérateur humain dans une situation donnée, ce qui revient à définir la probabilité d'erreur de l'opérateur humain face à une situation particulière / événement particulier. Le but est ici non pas de quantifier le niveau de fiabilité sur la base d'un ou de quelques opérateur(s) mais, idéalement, sur la base de données d'exploitation qui englobent l'ensemble des activités de l'exploitant ferroviaire sur le territoire national, ceci dans le but d'obtenir une valeur crédible. Différentes approches sont possibles. Sans définir l'ensemble des méthodes pouvant être mises en œuvre au cours de cette étape, la suite de cette partie vise à décrire les méthodes et orienter les évaluateurs vers l'une d'entre elles lorsque cela est possible en présentant leurs avantages et inconvénients. Dans le cadre des activités réalisées, 3 méthodes ont été identifiées.

1) Les statistiques

Utilisation : Les statistiques vont être utilisées à partir des données d'entrées générées à l'étape 1. Du point de vue des auteurs, les méthodes de l'étape précédente les plus pertinentes pour réaliser des statistiques sont « Dénombrement depuis le REX de l'exploitant », « Rapport de sécurité » et « Données ATESS ». La méthode statistique revient alors à recenser le nombre d'événements redoutés ayant été dénombrés dans les bases de données à l'étape 1

Contextes favorables : L'utilisation des statistiques utilisant des données directement issues du terrain permet d'obtenir une vision représentative de la réalité. Il s'agit d'une orientation à privilégier, selon les auteurs lorsque ces données sont disponibles. Seule la méthode « Probabilité » pourrait apporter un meilleur compromis temps / précision, mais nous verrons dans la section correspondante que les données disponibles sont peu nombreuses et qu'elles sont rarement appliquées dans un champ comparable pour permettre une utilisation pertinente de cette méthode.

Avantages : Les études statistiques sur les données de terrain permettent d'avoir la meilleure vision de la réalité.

Inconvénients : Pour mettre en place cette méthode, il est nécessaire de connaître le nombre de situations totales pouvant générer l'événement étudié. Cette donnée peut être difficilement accessible. De plus, les données statistiques peuvent requérir une transposition en fonction des besoins des experts sécurité.

2) Les probabilités

Utilisation : Le calcul des probabilités peut se réaliser sur la base de données statistiques ou par l'extraction des probabilités d'occurrence de l'événement redouté depuis les méthodes de génération des données « Base bibliographie », « Rapports de sécurité » de l'étape 1.

Contextes favorables : Lorsque les données concernant l'événement redouté sont disponibles, il est préférable d'utiliser cette orientation pour aboutir à une probabilité d'erreur humaine.

Avantages : Le temps nécessaire à l'obtention de la donnée est réduit. Il s'agit, selon nous, du meilleur compromis temps / précision lorsque l'information est disponible dans la littérature. Lorsque la probabilité est directement une traduction d'une étude statistique, cela permet d'être parfaitement en adéquation avec le contexte dans lequel l'étude se déroule et permet à la probabilité d'être une représentation la plus fidèle possible du terrain.

Inconvénients : Le nombre d'événements pour lesquels l'information est disponible dans la littérature est très limité. En fonction des études, les résultats peuvent varier. De plus, il est à noter que la description du contexte des études semble assez limitée et qu'il est requis de s'assurer que celui-ci est bien conforme à l'étude en cours. Même si pour les auteurs, les probabilités présentent le meilleur compromis temps / précision, la précision peut toutefois s'avérer insuffisante pour la future démonstration de sécurité. En outre, les probabilités peuvent requérir une transposition en fonction des besoins des experts sécurité afin d'être exprimées dans une unité qui est comparable au niveau de fiabilité du futur système / situation étudié.

3) Les méthodes HRA

Utilisation ; L'application d'une méthode HRA nécessite l'implication d'un groupe d'experts. En effet, ces méthodes reposent sur des expertises permettant d'identifier de manière qualitative des facteurs affectant la performance. Ces facteurs peuvent être identifiés par des experts ou au cours de l'analyse d'activité de l'étape 0 et de l'étape 1. Ces méthodes sont nombreuses et quelques-unes ont été présentées au cours de cette publication.

Contextes favorables : Cette méthode est à utiliser, selon nous, en dernier recours, lorsqu'aucune autre voie ne propose les éléments requis pour couvrir l'événement étudié.

Avantages : Cette méthode permet d'offrir une solution pour tous les événements qui ne sont pas analysables et quantifiables par les autres méthodes.

Inconvénients : Le nombre de méthodes disponibles, la création d'un panel d'experts, le coût de la mise en œuvre de ce type de méthodes (coût variable en fonction de la méthode et de la précision de la valeur obtenue) [8], la variabilité des résultats pour un même événement étudié par la même méthode appliquée par différents experts ainsi que la variabilité des résultats obtenus entre les différentes méthodes [29] sont les principaux inconvénients des méthodes HRA.

D. Étape 3 : Préparer la transposition au système technique

Cette étape consiste à utiliser les données générées dans l'étape 2 et les transposer dans une unité permettant aux experts sécurité de réaliser une comparaison entre la fiabilité du système existant et celle pouvant être atteinte par le futur système autonome pour un même événement.

Utilisation : Il s'agit ici de transposer la valeur de fiabilité obtenue lors de l'étape 2, qu'elle soit issue de la méthode « Statistique », « Probabilité » ou « Méthodes HRA » dans une unité pertinente pour la future comparaison dans le cadre de la démonstration de sécurité.

Cette étape est optionnelle mais doit être discutée systématiquement avec les experts sécurité en charge de la démonstration de sécurité de l'événement redouté. Si les experts considèrent que les éléments obtenus lors de l'étape 2

sont suffisants, il n'est pas requis de procéder à cette étape. Dans le cas contraire, la transposition devra être réalisée.

Il est nécessaire de préciser que les processus de certification / démonstration de sécurité de toutes les « nouvelles » technologies permettant la conception d'un train autonome ne sont pas encore définis. Il est possible que l'unité de transposition varie en fonction de la technologie utilisée pour couvrir l'événement. Dans le cadre des activités sécurité du projet TA-SV, les travaux réalisés s'orientent vers un équivalent THR permettant de réaliser une approche dite « GAME conducteur ». Dans ce cadre, la transposition des valeurs obtenues précédemment doit se réaliser afin d'obtenir une probabilité d'occurrence à l'heure.

Contextes favorables : Cette étape doit être systématique dès que les experts sécurité en ont identifié le besoin.

Avantages : Cette étape permet d'obtenir une valeur la plus facilement exploitable par les experts sécurité.

Inconvénients : Comme indiqué précédemment, certaines unités utilisées dans certaines données d'entrées pourraient être difficilement voire non transposables dans l'unité requise. Dans ce cas, des solutions ou approches alternatives devraient être discutées et identifiées.

E. Synthèse

Pour toutes les situations étudiées, lorsque cela est possible, les auteurs invitent les utilisateurs de la méthodologie à utiliser des données d'entrée (étape 1) issues du terrain et à se focaliser en priorité sur le REX et / ou les données ATESS et, à défaut, sur les rapports de sécurité. Ces données sont toutes issues du terrain et sont, par conséquent, les plus représentatives. De plus, elles peuvent être liées à un contexte d'exploitation. En effet, ce contexte devrait avoir une influence sur le résultat (lignes, pays...) et la comparaison avec le futur train autonome devrait se réaliser uniquement dans un contexte identique. Les données ATESS ne peuvent pas être utilisées sans un outil d'analyse. En effet, pour chaque train, toutes les données d'exploitation sont enregistrées dans ces « boîtes noires » et la quantité de données est très grande. Comme précisé plus haut, les REX sont également une excellente source d'entrées même s'ils doivent être utilisés avec prudence notamment lors de l'identification du contexte et par conséquence des causes ayant engendré l'événement.

Les données d'exploitation sont également très importantes et une grande précision est requise. Ces données sont nécessaires dès qu'une transposition de la fiabilité humaine est nécessaire. Pour l'instant, cela est requis pour tous les événements étudiés.

Concernant l'étape 2, si des données issues du terrain sont disponibles en données d'entrées, les statistiques ou les probabilités sont à privilégier pour déterminer la fiabilité de l'opérateur humain. L'étude menée préconise l'utilisation des méthodes HRA uniquement pour les cas où les autres méthodes ne peuvent pas apporter un niveau de fiabilité suffisamment robuste. Les raisons de leur utilisation en dernier recours découlent directement de l'état de l'art sur ces méthodes et de leur limite d'utilisation.

Les méthodes de détermination de la fiabilité de l'opérateur humain sont donc à sélectionner en fonction de la disponibilité des données, de la précision recherchée dans le résultat, du temps et des moyens disponibles pour réaliser l'étude... Cette sélection est directement à la charge de

l'analyste. Le contexte opérationnel de l'étude est également important.

V. CONCLUSION

Le train autonome est « sur les rails ». Cela conduit les experts en sécurité à s'interroger sur la démonstration de sécurité de ce futur système. Une méthode de démonstration de la sécurité consiste à comparer le nouveau système avec celui qu'il remplace et à s'assurer que le niveau de sécurité n'en est pas dégradé.

Le transfert de l'activité d'un opérateur humain vers un système technique conduit à s'interroger sur le niveau de sécurité actuel de l'opérateur humain. C'est dans ce contexte qu'une méthodologie visant à déterminer ce niveau de sécurité sur des événements redoutés a été proposée. Elle est composée de plusieurs étapes allant de la génération de données d'entrée sur l'événement à la quantification de la probabilité d'erreur humaine sur cet événement avant sa transposition en une valeur exploitable pour la future démonstration de sécurité. À chaque étape, plusieurs méthodes peuvent être utilisées. Le choix doit être fait par les experts appliquant la méthodologie en fonction de la disponibilité des données, de la précision des résultats souhaités, du temps disponible.

Il est nécessaire de définir le contexte dans lequel la quantification de la fiabilité de l'opérateur humain sera réalisée. En effet, celui-ci doit être le même que celui dans lequel évoluera le futur train autonome. Il semble nécessaire au moins de travailler en distinguant les activités (Voyageurs, Fret) et potentiellement les zones géographiques voire les lignes.

Les données d'entrée doivent être précises. Cela ne semble pas toujours être le cas parmi celles collectées. Les REX auxquels nous avons eu accès n'offraient pas une description suffisamment détaillée et harmonisée pour identifier les causes et pouvoir associer une potentielle erreur humaine à l'événement étudié. Ils ne sont pas exhaustifs. Les données d'exploitation sont également peu contextualisées, ce qui pose un problème pour la comparaison avec le futur système.

La méthodologie proposée devrait pouvoir couvrir l'ensemble des événements redoutés nécessaires à la réalisation de notre projet et être utilisée, avec d'éventuelles légères adaptations, dans d'autres domaines.

Une application est prévue dans la suite du projet. Dans cette application, nous explorerons plus en détail la littérature, travaillerons sur le retour d'expérience et appliquerons deux méthodes HRA, une développée pour le domaine ferroviaire (RARA) et une autre non spécifique au ferroviaire (CREAM).

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche est financé par le programme français "Investissements d'Avenir" et fait partie du projet collaboratif français TA-SV (Train Autonome - Service Voyageurs), avec la SNCF, Alstom Crespin, Thales, Bosch, et Spirops.

REFERENCES

[1] M. Palumbo, « La signalisation ferroviaire depuis la naissance jusqu'à ERTMS », 2015.
[2] NF EN 62290-1, « Applications ferroviaires - Systèmes de contrôle/commande et de gestion des transports guidés urbains - Partie 1 : principes système et concepts fondamentaux ». AFNOR éditions, novembre 2014.

[3] L. Cebulski, « Digital transformation of the rail sector: what impact on the regulator? », in *The International Railway Safety Council*, 2020, p. 01-06.
[4] SNCF, « Driverless trains: On track for a rail revolution. », 2022. <https://www.sncf.com/en/innovation-development/innovation-research/driverless-trains-to-run-in-2023>
[5] C. Harrison, J. Stow, X. Ge, J. Gregory, H. Gibson, et A. Monk, « At the limit? Using operational data to estimate train driver human reliability », *Appl. Ergon.*, vol. 104, p. 103795, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103795>.
[6] M. Hammerl et F. Vanderhaegen, « Human factors in the railway system safety analysis process. », *Rail Hum. Factors World Impacts People Success. Rail Oper.*, p. 73-84, 2012.
[7] B. Kirwan, *A guide to practical human reliability assessment*. 1994.
[8] R. Perinet, T. N. Vu, et F. Prats, « État de l'art des méthodes d'évaluation probabiliste de la fiabilité humaine », Rapport d'étude, 2011.
[9] A. D. Swain, « Method for performing a human-factors reliability analysis », Sandia Labs, No. SCR-685, 1963.
[10] V. D. Pasquale, S. Miranda, R. Iannone, et S. Riemma, « A Simulator for Human Error Probability Analysis (SHERPA) », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 139, p. 17-32, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.02.003>.
[11] E. Hollnagel, « Cognitive reliability and error analysis method », 1998.
[12] A. D. Swain et H. E. Guttmann, « Handbook of human-reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications », Sandia National Laboratories, NUREG/CR-1278, SAND80-0200, 1983. Consulté le: 22 mars 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.nrc.gov/docs/ML0712/ML071210299.pdf>
[13] Y. Mortureux, « Fondamentaux de l'analyse de risque, regard fiabiliste sur la sécurité industrielle. Les regards sur la sécurité industrielle, 2016-02 ». Fondation pour une culture de sécurité industrielle, 2016.
[14] US Nuclear Regulatory Commission, *Reactor safety study: An assessment of accident risks in US commercial nuclear power plants*, vol. 88. 1975.
[15] J. Zamanalli, « Probabilistic-risk-assessment applications in the nuclear-power industry », *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 47(3), p. SP361-SP364, 1998.
[16] G. C. Bello et V. Golombari, « The human factors in risk analysis of process plants: the control room model TESEO », présenté à 6th Advances in Reliability Technology Symposium, 1980.
[17] S. E. Cooper, A. M. Ramey-Smith, J. Wreathall, et G. W. Parry, « A technique for human error analysis (ATHEANA) », Nuclear Regulatory Commission, No. NUREG/CR--6350.
[18] K. Davoudian, J. S. Wu, et G. Apostolakis, « The work process analysis model (WPAM) », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 45(1-2), p. 107-125, 1994.
[19] T. Aven, S. Hauge, S. Sklet, et J. E. Vinnem, « Operational Risk Analysis – Total Analysis of Physical and Non-physical Barriers. », Preventor, Stavanger, Norway, Report 2004, 2004.

- [20] A. J. Spuring, *Human reliability assessment theory and practice*. CRC Press, 2009.
- [21] R. L. Boring, « Fifty Years of THERP and Human Reliability Analysis ». 2012.
- [22] P. Pyy, « Human reliability analysis methods for probabilistic safety assessment », Technical Research Center of Finland, 2000.
- [23] J. Bell et J. Holroyd, *Review of human reliability assessment methods*, HSE Book. Health & Safety Laboratory, 2009.
- [24] E. Fadier, B. Artigny, M.-G. Chollet, C. Garoff-Mercier, et C. Drozd-Verly, *L'état de l'art dans le domaine de la fiabilité humaine*, OCTARES Ed. 1994.
- [25] N. A. Stanton, P. M. Salmon, G. H. Walker, C. Baber, et D. P. Jenkins, *Human factors methods: a practical guide for engineering and design*, Ashgate Ed. 2005.
- [26] P. Salmon, N. A. Stanton, et G. Walker, *Human Factors Design Methods Review*. 2003.
- [27] C. Blatter, « Pratiques de fiabilité humaine et organisationnelle à la SNCF », présenté à 54ème Congrès de la SELF, Tours, France, 2019.
- [28] S. Chami et F. Jubert, « Limiter l'incertitude sur la défaillance humaine par le REX-retour sur un projet de quantification de l'erreur », présenté à Congrès Lambda Mu 19 de Maîtrise des Risques et Sécurité de Fonctionnement, Dijon, France, 2014.
- [29] J. Kim, W. Jung, S. C. Jang, et J. B. Wang, « A case study for the selection of a railway human reliability analysis method », présenté à International railway safety conference, 2006.
- [30] A. E. Summers, « Techniques for assigning a target safety integrity level », *ISA Trans.*, vol. 37(2), p. 95-104, 1998.
- [31] CENELEC, « EN 50129 : Railway Application – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronics systems for signalling ». 2003.
- [32] J.-L. Boulanger, « Maîtrise du SIL et gestion des certificats – Domaine Ferroviaire », *Tech. L'ingénieur*, 2011.
- [33] J. Beugin, K. A. Ouedraogo, E.-M. El-Kourssi, J. Clarhaut, D. Renaux, et F. Lisiecki, « Pratiques partagées ou divergentes d'allocation de niveaux d'intégrité de sécurité dans le domaine ferroviaire. », présenté à Congrès Lambda Mu 20 de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, Saint-Malo, France, 2016.
- [34] CENELEC, « EN 50126 : RRailways applications - The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) - Part 1 : basic requirements and generic process ». 2010.
- [35] F. Belmonte, W. Schön, J.-L. Boulanger, et R. Capel, « Évaluation du facteur humain dans le domaine de la supervision de trafic ferroviaire : Le projet SPICA-RAIL », présenté à 6ième Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, Avignon, France, 2008.
- [36] ERA, « Guide d'application du règlement de la commission concernant l'adoption d'une méthode de sécurité relative à l'évaluation et à l'appréciation des risques visée à l'article 6, paragraphe 3 de la directive sur la sécurité ferroviaire, ERA/GUI/01-2008/SAF », Agence Ferroviaire Européenne, Valenciennes, 2009.
- [37] EUAR, « Guideline for the application of harmonised design targets (CSM-DT) for technical systems as defined in (EU) Regulation 2015/1136 within the risk assessment process of Regulation 402/2013 », Reference ERA-REC-116-2015-GUI. Version 1.1, 2017.
- [38] R. Van der Weide, H. Frieling, et D. De Bruijn, « are Dutch cargo trains 2.6 times more often involved in SPADs compared to passenger trains », présenté à 3rd International Conference on Rail Human Factors, Lille, France, 2009.
- [39] Y. Zhao, J. Stow, et C. Harrison, « Estimating the frequency of trains approaching red signals: a case study for improving the understanding of SPAD risk », *Estim. Freq. Trains Approaching Red Signals Case Study Improv. Underst. SPAD Risk*, vol. 10 (9), p. 579-586, 2016.
- [40] A. Pernet, L. Karsenty, et C. Blatter, « Développer une vision proactive des incidents ferroviaires : l'approche Facteurs Organisationnels et Humains », présenté à 20 e Congrès de maîtrise des risques et de sûreté de fonctionnement, 2016.
- [41] G. Nikandros et D. Tombs, « Measuring Railway Signals Passed At Danger », *delaide*, Australia, 2007, vol. 86, p. 41-46.
- [42] A. Ombredane et J.-M. Faverge, *L'analyse du travail*, Facteur D'économie Humaine et de Productivité. Paris: PUF, 1955.