Méthode d'évaluation de la réactivité et de l'adaptabilité humaines dans le contrôle des risques

Stephen Quéva

▶ **To cite this version:**

Stephen Quéva. Méthode d'évaluation de la réactivité et de l'adaptabilité humaines dans le contrôle des risques : Application à la conduite de transport urbain guidé. Interface homme-machine [cs.HC]. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2008. Français. NNT : 2008VALE0020 . tel-03009913

HAL Id: tel-03009913
https://uphf.hal.science/tel-03009913

Submitted on 17 Nov 2020

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.

Numéro d'ordre :

THÈSE

Présentée à

L'Université de Valenciennes

et du Hainaut-Cambrésis

Pour l'obtention du

DOCTORAT

Spécialité

Automatique Industrielle et Humaine

présentée par

Stephen QUÉVA

Ingénieur ENSIAME

METHODE D'EVALUATION DE LA REACTIVITE ET DE L'ADAPTABILITE HUMAINES DANS LE CONTROLE DES RISQUES

Application à la conduite de transport urbain guidé

---

outenue à Valenciennes, le 30 juin 2008 devant le jury composé de :

MM

rançoise ANCEAUX	Examinatrice	Maître de conférences à l'Université de Valenciennes
uy BOY	Rapporteur	Directeur de recherche EURISCO Toulouse
ernard DEHAUT	Invité	Expert RATP de l'unité CGS/MRE
ernard RIERA	Examinateur	Professeur à l'Université de Reims
Valter SCHÖN	Rapporteur	Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne
acques VALANCOGNE	Responsable	Retraité RATP / Ex - responsable d'unité CGS/MRE
rédéric VANDERHAEGEN	Directeur	Professeur à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambré

Numéro d'ordre : 08/15

THÈSE

Présentée à

L'Université de Valenciennes

et du Hainaut-Cambrésis

Pour l'obtention du

DOCTORAT

Spécialité

Automatique Industrielle et Humaine

présentée par

Stephen QUÉVA

Ingénieur ENSIAME

METHODE D'EVALUATION DE LA REACTIVITE ET DE L'ADAPTABILITE HUMAINES DANS LE CONTROLE DES RISQUES

Application à la conduite de transport urbain guidé

Soutenue à Valenciennes, le 30 juin 2008 devant le jury composé de :

MM

Françoise ANCEAUX	Examinatrice	Maître de conférences à l'Université de Valenciennes
Guy BOY	Rapporteur	Directeur de recherche EURISCO Toulouse
Bernard DEHAUT	Invité	Expert RATP de l'unité CGS/MRE
Bernard RIERA	Examinateur	Professeur à l'Université de Reims
Walter SCHÖN	Rapporteur	Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne
Jacques VALANCOGNE	Responsable	Retraité RATP / Ex - responsable d'unité CGS/MRE
Frédéric VANDERHAEGEN	Directeur	Professeur à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

Avant - Propos

Le travail présenté dans ce mémoire est le résultat d'une collaboration entre le groupe de recherche Systèmes Homme-Machine, dirigé par le Professeur Frédéric Vanderhaegen, du Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH) de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis et l'unité Maîtrise des Risques d'Entreprise du Contrôle Général de Sécurité, dirigée par Jacques Valancogne, de la RATP. Je tiens ici à leur témoigner toute ma gratitude pour avoir dirigé mes travaux.

Je suis très reconnaissant envers messieurs Guy Boy, directeur de recherche et PDG de la société EURISCO à Toulouse et Walter Schön, Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne du laboratoire HEUDIASYC pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire et d'en être les rapporteurs.
Je remercie également Françoise Anceaux, Maître de conférences à l'université de Valenciennes, Bernard Dehaut du Contrôle Générale de Sécurité de la RATP et Bernard Riera, Professeur à l'université de Reims pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Je tiens à remercier tous les membres de l'unité Maîtrise des Risques d'Entreprise de la RATP pour la découverte du monde du ferroviaire mais aussi et plus simplement pour toutes les discussions qui ont largement dépassé le domaine des transports urbains guidés. Ce travail de thèse s'est nourri de ces échanges.
Ma présence au laboratoire m'a permis de rencontrer et de travailler avec un grand nombre de personnel du LAMIH. Je pense notamment à Jean-Marc, Benoît, Stéphane, Jérôme, Philippe P., Nico, Ludovic, Bako, Karine, Philippe R. et Rudy. Ces années de thèse resteront associées à une grande série d'anecdotes.

Je ne peux oublier ici ma famille, un grand merci à mes parents (c'est grâce à vous que j'en suis là), mes beaux-parents (merci pour votre soutien, vos précieux conseils ainsi que pour l'objet de ma prochaine thèse en molinologie !), ma sœur Karen (pour ton aide) et mon beau-frère Jean-baptiste (pour tes conseils 'Sly-like').
Je ne pourrais finir cette liste sans toi Hortense. Tu es la mieux placée pour connaître les efforts que cette thèse a demandés. Tu as su me soutenir tout au long de cette aventure. Merci.

« L'homme et sa sécurité doivent constituer la première préoccupation
de toute aventure technologique »
[Albert Einstein]

À mon grand-père Jacques,

À Hortense et Louis,

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE 6

CHAPITRE 1 : PROBLEMATIQUE DES SYSTEMES HOMME MACHINE 10

1 INTRODUCTION 10
2 SURETE DE FONCTIONNEMENT DANS LES SYSTEMES HOMME MACHINE 11
2.1 DEFINITIONS ET ELEMENTS 11
2.2 LES MOYENS DE LA MAITRISE DES RISQUES 14
2.3 L'ANALYSE DE RISQUE D'UN SYSTEME HOMME MACHINE 22
3 LE COMPORTEMENT HUMAIN 23
3.1 L'INTERACTION DE L'HOMME AVEC LE SYSTEME 23
3.2 L'ANALYSE DE RISQUE DU COMPORTEMENT HUMAIN 27
3.3 MODELISATION DE LA CONTRIBUTION HUMAINE 30
CONCLUSION 34

CHAPITRE 2 : LA CONDUITE DE TRANSPORT URBAIN GUIDE 36

1 INTRODUCTION 36
2 PROBLEMATIQUE DU TRANSPORT FERROVIAIRE 37
2.1 DESCRIPTION DU TRANSPORT FERROVIAIRE 37
2.2 L'HOMME DANS LE TRANSPORT FERROVIAIRE 47
3 L'ACTIVITE DE CONDUITE 52
3.1 CARACTERISTIQUES DE LA CONDUITE DE TRANSPORT URBAIN GUIDE 52
3.2 PROBLEMATIQUES DE LA CONDUITE DE TRANSPORT URBAIN GUIDE 59
4 CONCLUSION 66

CHAPITRE 3 : MODELISATION ET PRISE EN COMPTE DE L'ADAPTABILITE ET DE LA REACTIVITE HUMAINES 68

1 INTRODUCTION 68
2 L'ADAPTABILITE ET LA REACTIVITE HUMAINES 69
2.1 L'ADAPTABILITE ET LA REACTIVITE HUMAINES : UNE FORME DE RESILIENCE ? 69
2.2 MADREH : MODELISATION DE L'ADAPTATION ET DE LA REACTION HUMAINES 73
3 DEMARCHE D'ANALYSE DE L'ADAPTABILITE ET DE LA REACTIVITE HUMAINES 81

3.1 ETAPE 1 : IDENTIFICATION DE L'ADAPTATION ET DE LA REACTION HUMAINES 81
3.2 ETAPE 2 : IDENTIFICATION DES DERIVES 86
3.3 ETAPE 3 : ANALYSE DE L'ADAPTABILITE ET DE LA REACTIVITE HUMAINES 91
4 CONCLUSION 93

CHAPITRE 4 : APPLICATION A L'EVALUATION DE L'ADAPTABILITE ET DE LA REACTIVITE HUMAINES DANS LA CONDUITE DE TRANSPORT URBAIN GUIDE 96

1 INTRODUCTION 96
2 APPLICATION A UNE BASE D'INCIDENTS 97
2.1 PRESENTATION DE LA BASE REX 97
2.2 APPLICATION DE LA DEMARCHE 97
3 APPLICATION A UN ENREGISTREMENT DES PARAMETRES D'EXPLOITATION 107
3.1 PRESENTATION DE LA PLATEFORME COR&GEST 107
3.2 PRESENTATION DE L'EXPERIMENTATION 109
3.3 APPLICATION DE LA DEMARCHE 115
4 CONCLUSION 127

CHAPITRE 5 : DISCUSSION ET PERSPECTIVES 130

1 INTRODUCTION 130
2 DISCUSSION 131
2.1 APPLICATION AUX BASES D'INCIDENTS 131
2.2 APPLICATION AUX ENREGISTREMENTS DES PARAMETRES D'EXPLOITATION 132
2.3 VALIDATION DE LA DEMARCHE 132
3 PERSPECTIVES 134
3.1 PERSPECTIVES POUR LES SYSTEMES HOMME MACHINE 137
3.2 PERSPECTIVES POUR LES SYSTEMES DE TRANSPORT URBAIN GUIDES 135
4 CONCLUSION 140

CONCLUSION GENERALE 141

BIBLIOGRAPHIE 143

Introduction générale

Les systèmes de transport guidés sont des modes de déplacement qui se développent actuellement en raison des avantages qu'ils offrent à une société cherchant tout à la fois à développer sa mobilité et à réduire ses émissions de gaz à effet de serre. En effet le chemin de fer comme tous les transports guidés, du fait de ses conditions physiques d'exploitation, possède sur ses principaux concurrents, l'avion pour le transport de passagers sur moyenne distance, la voiture sur courte distance ou encore le camion pour le transport de fret, un avantage important en matière de consommation énergétique. Cette évolution correspond également à plus d'avantages pour le passager en terme de : qualité de service, prix, confort et bien entendu aussi de sécurité. Tout ceci fait que le système ferroviaire est l'objet actuellement de fortes évolutions techniques et institutionnelles. De nouvelles infrastructures sont en projet ou vont être mises en service, de nouveaux types d'exploitation se développent, faisant appel notamment à de nouvelles technologies. Ces évolutions placent l'opérateur humain, qui possède encore un rôle important dans les systèmes de transport guidés, face à des contextes de conduite en constants changements. Lors de ces situations, les capacités de réactivité et d'adaptabilité de l'opérateur sont essentielles dans le choix des procédures à appliquer.

Cette étude propose de prendre en compte les capacités d'adaptabilité et de réactivité humaines dans la démarche d'analyse des risques. L'objectif est d'améliorer l'analyse du facteur humain concourant à la sécurité dans l'exploitation d'un système de transport. Cet objectif fait suite au constat laissant apparaître que les approches actuelles de la fiabilité humaine n'intègrent pas le facteur humain comme, à la fois, facteurs de fiabilité et sources d'erreur potentielles. De plus, l'évaluation probabiliste des dérives comportementales ne procède pas aujourd'hui d'une démarche d'analyse fiable : une même méthode appliquée par plusieurs analystes peut donner des résultats hétérogènes ; de même, des méthodes différentes utilisées par un même analyste peuvent produire des résultats différents.

Ce mémoire se compose de cinq chapitres.
Le premier chapitre présente la problématique des systèmes Homme Machine. La sûreté de fonctionnement y est définie comme une évaluation du fonctionnement du système et l'existence du concept de risque y est présentée. Ce chapitre aborde ensuite la manière de

maîtriser les risques par son évaluation d'abord puis par la mise en place de moyens de défense. C'est à ce moment que l'importance de l'homme dans le système va apparaître. La suite du chapitre sera consacrée aux objectifs, mécanismes et moyens d'analyse du comportement humain. La contribution de l'opérateur sera présentée comme positive pour le système par la régulation de son activité ou source d'infiabilité par l'existence d'erreurs humaines. Au final, l'absence de méthodologie d'évaluation pertinente pour prendre en compte le double aspect de la contribution humaine sera montrée et la conséquence sera la recherche d'une modélisation de l'activité humaine. Cette recherche aboutira à la conclusion : l'étude des systèmes Homme Machine nécessite une modélisation prenant en compte notamment la variabilité du comportement humain par rapport au système de défense.

Le deuxième chapitre se focalise plus spécifiquement sur la conduite de transport urbain guidé qui est au centre de notre étude. Le constat est d'abord fait que dans les systèmes de transport guidés, l'homme occupe encore une place centrale pour la maîtrise des risques. C'est notamment le cas dans la fonction particulière de conduite de transport urbain guidé. L'étude de nombreux travaux scientifiques traitant de cette fonction fait apparaître une démarche commune qui s'attache d'abord à modéliser l'activité pour ensuite l'évaluer. L'objectif de la deuxième partie du chapitre est donc de montrer les particularités de la conduite de transport urbain guidé afin de mettre en évidence les capacités humaines pertinentes pour modéliser le comportement du conducteur.

Le troisième chapitre définit les concepts d'adaptabilité et de réactivité en établissant un parallèle avec les concepts de commande adaptatives et de système réactifs. La modélisation MAdRéH (Modélisation de l'Adaptation et de la Réaction) est ensuite décrite avant de proposer une démarche d'évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité humaines. Cette démarche est articulée autour de trois étapes : l'identification de l'adaptation et de la réaction, l'identification des dérives et l'analyse de l'adaptabilité et de la réactivité humaines. L'objectif de cette démarche est de permettre d'analyser le comportement de l'opérateur humain de conduite puis de l'évaluer pour le système de transport.

Le chapitre quatre présente l'application de la démarche à deux ensembles de données. Le premier est une base d'incidents, issue d'un Retour d'Expérience effectué au sein de la RATP, qui répertorie les franchissements de signaux fermés. La deuxième application concerne un enregistrement des paramètres d'exploitation obtenu par une expérimentation effectuée sur la

plateforme CoR&GesT du LAMIH. Cet outil développé au sein de l'équipe Systèmes Homme Machine (SHM), permet de simuler la conduite de transport guidé à travers une interface informatique agissant sur un réseau ferroviaire miniature composé de locomotives échelle H0m équipées de caméra. Le protocole sera présenté de manière à définir les changements étudiés dans l'optique d'une évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité humaines. Ensuite, la démarche sera appliquée et les résultats seront analysés.

Le cinquième chapitre commence par une discussion sur les résultats de l'application de la démarche aux deux ensembles de données. Puis les apports et critiques de la démarche vont être exposés. Les perspectives sont ensuite évoquées en distinguant celles spécifiques aux futures applications de la démarche par un exploitant de transport urbain guidé et celles généralisables à l'étude des systèmes Homme Machine.

Chapitre 1 : Problématique des systèmes Homme Machine

1 INTRODUCTION **10**

2 SURETE DE FONCTIONNEMENT DANS LES SYSTEMES HOMME MACHINE **11**

2.1 DEFINITIONS ET ELEMENTS 11

2.1.1 Définition du système Homme Machine 11

2.1.2 Eléments de la sûreté de fonctionnement 11

2.1.3 Définition du risque dans un système Homme Machine 12

2.2 LES MOYENS DE LA MAITRISE DES RISQUES 14

2.2.1 Le processus de maîtrise des risques 14

2.2.2 Défenses basées sur le principe de redondance 15

2.2.3 Défenses basées sur la coopération Homme Machine 16

2.2.4 Défenses basées sur la mise en place de barrières 17

2.2.5 Défense en profondeur 19

2.3 L'ANALYSE DE RISQUE D'UN SYSTEME HOMME MACHINE 22

3 LE COMPORTEMENT HUMAIN **23**

3.1 L'INTERACTION DE L'HOMME AVEC LE SYSTEME 23

3.1.1 La régulation humaine au centre de la fiabilité 23

3.1.2 Erreur et fiabilité humaine 25

3.2 L'ANALYSE DE RISQUE DU COMPORTEMENT HUMAIN 27

3.2.1 L'identification et la quantification de l'erreur humaine 27

3.2.2 Limite des méthodes d'analyse de l'erreur humaine 29

3.3 MODELISATION DE LA CONTRIBUTION HUMAINE 30

3.3.1 Les modèles issus de la psychologie 30

3.3.2 La variabilité du comportement humain 32

CONCLUSION **34**

Chapitre 1 : Problématique des systèmes Homme Machine

1 Introduction

Dans un système Homme Machine la sûreté de fonctionnement ne peut en aucun cas se limiter à l'étude des défaillances de composants techniques ; il est en effet primordial d'intégrer la contribution des opérateurs humains dans le contrôle et la supervision du système étudié, en intégrant ces derniers non seulement comme facteurs de fiabilité mais aussi sources d'erreurs potentielles.

L'objectif de ce chapitre est d'expliquer la nécessité de prendre en compte de double aspect de la contribution humaine dans la sûreté de fonctionnement. Pour cela il définit en premier lieu un système Homme Machine et les éléments de la sûreté de fonctionnement qui permettent d'évaluer son fonctionnement. Dans ce cadre, l'évaluation qui est faite, est basée sur l'étude des dysfonctionnements ce qui nous amènera à définir la notion de risque. Ensuite ce chapitre traite de la manière de maîtriser les risques en abordant notamment la notion de barrière. C'est dans cette partie que l'importance de la place de l'homme dans le système Homme Machine va apparaître.

La suite du chapitre sera consacrée aux objectifs, mécanismes et moyens d'analyse du comportement humain. Le rôle de l'homme au sein des systèmes Homme Machine va apparaître comme un facteur de fiabilité au niveau de la régulation de son activité. Mais au travers la définition de l'erreur humaine, ces dysfonctionnements seront également mis en évidence. L'absence de prise en compte de ce double aspect de la contribution humaine sera le principal défaut des méthodes d'évaluation dont il sera fait une revue d'ensemble. Le besoin d'une méthodologie insistant sur le double aspect de la contribution humaine sera exprimé en recherchant des modélisations issues de la psychologie cognitive. Malheureusement aucune de celles-ci ne présente la contribution de l'homme en lien avec les moyens de maîtrise des risques. Ceci fera l'objet d'un dernier point présentant le concept de variabilité du comportement humain et son positionnement par rapport au système de défense en profondeur.

2 Sûreté de fonctionnement dans les systèmes Homme Machine

2.1 Définitions et éléments

2.1.1 Définition du système Homme Machine

Un système Homme Machine est une organisation complexe composée à la fois d'hommes et de systèmes techniques reliés entre eux par des moyens de communication et travaillant pour atteindre un but commun en fonction des contraintes de l'environnement [SPERANDIO, 1988].

Le système Homme Machine est un système qui doit être vu comme dynamique mettant en jeu à la fois des compétences techniques et humaines. Les interactions entre l'opérateur humain et le système technique influencent les paramètres de la sûreté de fonctionnement et toute analyse de risque doit tenir compte de l'ensemble du système Homme Machine.

L'occurrence d'un événement redouté dans ce système Homme Machine peut avoir des conséquences négatives sur le système, les opérateurs humains ou l'environnement. Il est donc indispensable d'effectuer une étude de sûreté de fonctionnement dans ces systèmes tout en définissant les éléments de cette étude.

2.1.2 Eléments de la sûreté de fonctionnement

Le vocabulaire courant mélange souvent sécurité et sûreté. La sécurité, au sens « safety » que l'on peut traduire par innocuité, est l'aptitude d'un système (comme celui des transports) à prévenir les évènements redoutés non intentionnels d'origine technique ou humaine. La sûreté ou intégrité est la traduction de « security » dans le sens où elle concerne la capacité du système à prévenir les évènements malveillants d'origine intentionnelle [EPSF, 2007].
La confusion entre ces termes provient sans aucun doute de l'utilisation qui est ensuite effectuée dans différents domaines comme la sûreté nucléaire ou la sécurité informatique.

Afin de préciser les choses il convient de définir clairement la sûreté de fonctionnement aussi appelée la science des défaillances. Elle consiste en l'étude des défaillances définies comme des événements particuliers qui conduisent à la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise [POLET, 2002].

Un système Homme Machine est défaillant si ses capacités fonctionnelles sont interrompues (panne ou arrêt volontaire par action d'un système interne de protection ou une procédure manuelle équivalente).

La sûreté de fonctionnement, prise au sens restreint du terme, repose sur quatre aptitudes : la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité (FMDS) [VILLEMEUR, 1988]:

- la fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise dans des conditions données et pendant une durée donnée ;
- la maintenabilité est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise ;
- la disponibilité est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant donné ;
- la sécurité est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître dans des conditions données des événements critiques ou catastrophiques.

La sûreté de fonctionnement dans les systèmes Homme Machine est donc étroitement liée à l'étude des défaillances dans le système. Il convient maintenant de présenter la notion associée à l'évaluation du danger induit par ces dysfonctionnements pour le système : le risque.

2.1.3 Définition du risque dans un système Homme Machine

Dans les systèmes Homme Machine comme dans l'entreprise, le risque se résume à tout élément qui peut avoir un impact sur la capacité à atteindre ses objectifs [PLANCHETTE et al., 2002]. Le risque et le danger sont deux notions différentes mais complémentaires. Le risque naît de l'existence d'un danger et le danger est l'événement redouté pour lequel correspond un risque.

Le risque est un concept qu'il est possible d'exprimer comme une fonction de la probabilité d'occurrence P et de la gravité d'occurrence de l'événement indésiré G [GOGUELIN, 1988] [VILLEMEUR, 1988] [VALANCOGNE et NICOLET, 2002].

$$R = f(P,G)$$

Équation 1 : Expression du risque en fonction de la probabilité d'occurrence et de la gravité

Le risque est donc une combinaison de deux aspects importants qui sont :

- l'aspect redouté du risque renvoyant à la notion de danger, de péril, d'inconvénient auquel un objet ou un individu est exposé. Il s'agit de la conséquence redoutée d'un événement ou d'une action ;
- l'aspect incertain du risque par l'association à son caractère éventuel pouvant être le fruit du hasard. Le risque appartient au domaine du possible du probable.

Cette relation simple peut permettre d'évaluer différemment le risque associé à un événement courant présentant une gravité faible avec celui d'évènements plus rares mais dramatiques.

Afin de mieux appréhender les mécanismes sous-jacents à la notion de risque, ce dernier peut être représenté par un élément agresseur émettant un ou plusieurs flux agressifs en direction d'une cible ou éléments sensible (cf. Figure 1).

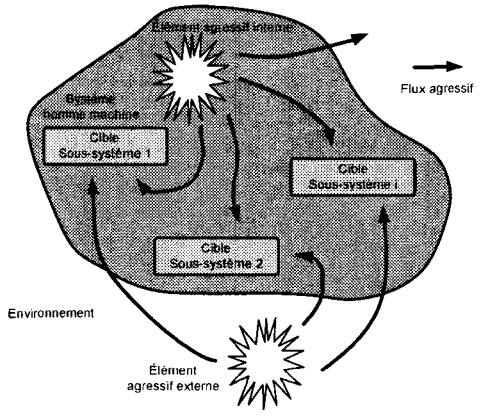


Figure 1 : Modélisation du risque dans un système Homme Machine

L'élément agressif peut être issu de l'environnement ou être une sous-partie du système. Les flux agressifs peuvent présenter différentes formes (matériel, psychologique, financier etc.). Enfin la cible fait partie du système lui-même ou de son environnement. Elle peut être matérielle (humain, équipement, etc.) ou purement immatérielle (image de marque, valeur boursière etc.). Le risque est certes un risque d'intégrité physique pour l'homme (qu'il soit opérateur ou client) ou pour le matériel d'exploitation mais il s'agit aussi pour une entreprise d'un risque financier (suite à l'arrêt du service à une détérioration, de son image de marque...).

Le risque est donc multiple. Par exemple pour un système de transport, l'entreprise qui le gère se doit d'évaluer et de maintenir sa sécurité. C'est l'objet de la démarche de maîtrise des risques qui est exposée dans la partie suivante.

2.2 Les moyens de la maîtrise des risques

2.2.1 Le processus de maîtrise des risques

L'objectif de la maîtrise des risques est double il s'agit de rendre le système insensible aux "agressions" auxquelles il peut être soumis qu'elles soient internes ou externes. Il s'agit également de l'empêcher d'aller agresser son environnement.

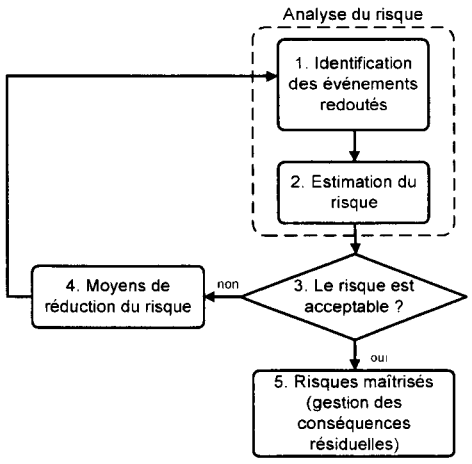


Figure 2 : Processus de maîtrise des risques

Cette démarche s'articule autour de cinq activités [BEUGIN, 2006] présentées dans la figure ci-dessus :

1. L'identification des événements redoutés : il s'agit de rechercher des événements redoutés susceptibles de se produire durant le fonctionnement du système ;
2. L'estimation du risque : cette étape se concentre sur l'obtention d'une valeur du risque obtenue par des techniques généralement probabilistes issues des méthodes de sûreté de fonctionnement pour une gravité donnée ;
3. L'acceptabilité du risque : cette étape est un nœud décisionnel s'appuyant sur les résultats des activités précédentes constituant l'analyse du risque.
4. La réduction du risque qui s'appuie sur la proposition de différentes alternatives pour contrôler et réduire le risque notamment par des moyens de prévention et de protection des accidents.

5. La maîtrise des risques résiduels qui est en fait la gestion des conséquences résiduelles des risques maîtrisés constitue la dernière étape. Elle instaure, par exemple, une traçabilité des actions et événements lors du fonctionnement du système.

Afin de maîtriser les risques du système Homme Machine, différentes stratégies de défense existent. Celles-ci font l'objet de la partie suivante qui traite des défenses basées sur le principe de la redondance, des défenses basées sur la coopération Homme Machine et des défenses basées sur la mise en place de barrières.

2.2.2 Défenses basées sur le principe de redondance

La redondance est un des moyens qui permet d'accroître la sûreté de fonctionnement d'un système Homme Machine en améliorant sa disponibilité ou sa fiabilité. Elle consiste à utiliser plusieurs ressources pour réaliser une même tâche [PARK, 1997] [VILLEMEUR, 1988].

Un système redondant est un système qui se base sur des configurations parallèles. Dans une configuration en parallèle un système a au moins deux éléments. Le système fonctionne normalement si au moins un des deux éléments fonctionne normalement. Parmi les configurations redondantes nous pouvons rencontrer des configurations particulières telles que :

- les redondances actives où tous les composants redondants sont actifs simultanément. La généralisation des ces redondances est la redondance m/n (ou à vote majoritaire) où le système fonctionne si au moins m composants sur n fonctionnent ;
- les redondances passives qui permettent d'activer un composant (jusqu'alors inactif) lorsque son homologue est défaillant.

Un exemple de redondance m/n est celui du cas des freins sur un matériel roulant comme un tramway par exemple. Le système fonctionne si au moins un nombre défini (différent selon les types de matériels roulant) des équipements de freinage est en état de fonctionnement.
Un exemple de redondance passive est celui du cas de la veille automatique installée sur les tramways, les métros et les trains depuis le moment où, sur ces matériels, l'exploitation n'a plus été opérée que par un seul conducteur. Sa fonction vise à garantir l'arrêt du véhicule, par le déclenchement du freinage d'urgence, en cas de défaillance totale du conducteur, du type endormissement profond ou malaise. Dans ce cas, la veille automatique est à la fois le

commutateur intelligent qui identifie la défaillance du conducteur et le composant qui vient remplacer l'homme dans sa tâche de conduite.

2.2.3 Défenses basées sur la coopération Homme Machine

Une autre forme de défense est celle basée sur la coopération Homme Machine qui est issue de l'interaction entre l'opérateur humain et le système technique.

Dans le cadre de la coopération Homme Machine, une tâche n'est plus attribuée à une seule entité mais peut être partagée entre l'Homme et la Machine appelés aussi agents. Trois formes de coopération sont proposées [SCHMIDT, 1991] : la forme augmentative, la forme intégrative et la forme confrontative. Ces trois formes sont aussi liées aux notions de facilitation et d'augmentation.

1. La forme augmentative: sous cette forme de coopération, les agents possèdent des savoir-faire similaires. La tâche est décomposée en sous-tâches identiques, chacune des sous-tâches est réalisée par un des agents.
2. La forme intégrative: sous cette forme de coopération, les savoir-faire des agents sont différents mais complémentaires. La tâche est décomposée en sous-tâches chacune d'elles est réalisable par un des agents.
3. La forme confrontative: dans cette forme, les agents ont les mêmes savoir-faire et la tâche n'est pas décomposée. Chaque agent réalise la tâche et confronte ses résultats avec ceux des autres agents.

La coopération entre les agents a pour but l'amélioration de leurs performances, la prévention des erreurs humaines ou leurs récupérations par l'optimisation des échanges d'informations, l'aide à la décision et le partage des tâches.

Les outils d'aide à la décision peuvent illustrer l'intérêt de la coopération dans la sûreté de fonctionnement des systèmes Homme Machine. En effet un outil d'aide à la décision peut prendre en compte les besoins de l'Homme et lui apporter de l'aide. Il peut ainsi présenter une aide préventive ou régulatrice des erreurs humaines [JOUGLET, 2000]:

- l'aide préventive pour éviter les erreurs humaines : la coopération consiste ici à présenter à l'opérateur humain une information pertinente, intelligible et compréhensible ;
- l'aide régulatrice pour corriger les erreurs humaines : la coopération consiste à proposer une aide à la décision ou à l'action.

Dans les systèmes de transport, les outils d'aide à la décision sont présents par exemple dans les interfaces Homme Machine qui aident l'opérateur humain à traiter les défauts matériels. Dans le cas de la conduite de tramway [IMR-CIT-03], les défauts sont signalisés et associés à une couleur de procédure (cf. Figure 3) qui précise en fonction du degré d'urgence, la démarche à suivre pour résoudre le problème : c'est un exemple d'aide préventive.

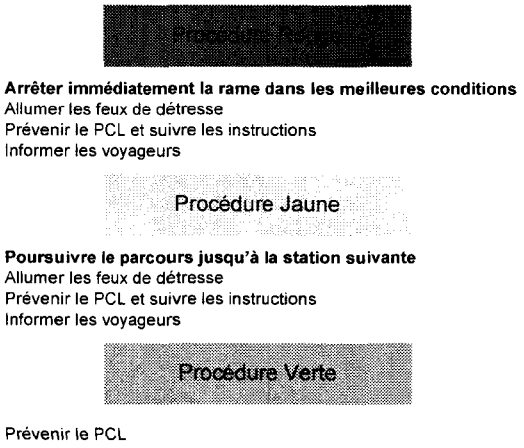


Figure 3 : Exemple d'outil d'aide à la gestion des défauts matériels dans le cas du tramway.

Les défenses conçues pour les systèmes Homme Machine qu'elles soient basées sur le principe de la redondance ou de la coopération sont des défenses qui améliorent la sûreté de fonctionnement. D'une part elles augmentent la fiabilité et la disponibilité du système et d'autre part elles préviennent et corrigent les erreurs humaines. Mais le contrôle de l'occurrence et des conséquences des erreurs humaines peut également être assuré par la mise en place de barrières.

2.2.4 Défenses basées sur la mise en place de barrières

Une barrière peut être définie comme un obstacle, une obstruction ou une gêne qui peut soit prévenir l'exécution d'une action ou l'apparition d'un événement, soit prévenir ou limiter des conséquences en limitant l'extension de celle-ci ou en les affaiblissant d'une autre manière [HOLLNAGEL, 1999].

Si l'on reprend la modélisation du risque, présentée dans le paragraphe §2.1.3, celle-ci est constituée d'un élément venant "agresser" une cible, la barrière peut être considérée comme un élément prévenant ou limitant les effets du flux agressif sur la cible (Figure 4).

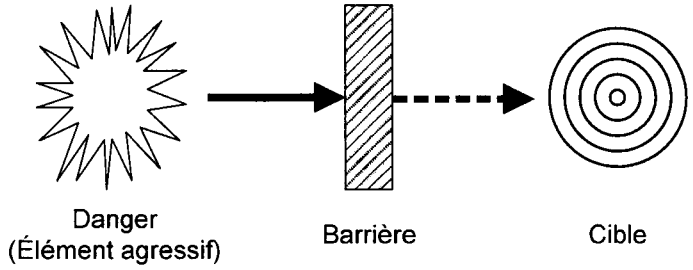


Figure 4 : Modèle Danger - Barrière - Cible

On distingue deux caractéristiques principales pour une barrière : sa nature bien sûr qui va nous permettre par la suite de mettre en place une typologie et son fonctionnement c'est-à-dire l'action qui va être mise en place afin d'éviter l'apparition de l'évènement redouté.

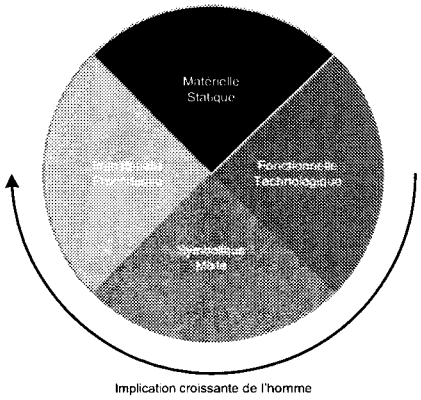


Figure 5 : Typologie des barrières par nature

Ces barrières peuvent donc être classifiées en quatre catégories (cf. Figure 5):

- les barrières matérielles sont des barrières physiques qui luttent contre les actions risquées des opérateurs humains. Elles n'ont pas besoin d'être perçues ou interprétées par l'opérateur humain pour qu'elles accomplissent leur fonction. Par exemple les rails qui guident un train ;
- les barrières fonctionnelles sont des barrières qui gênent l'exécution de l'action en établissant par exemple une dépendance logique ou temporelle pour les activer. Ces barrières nécessitent la présence de pré conditions qui doivent être vérifiées avant d'obtenir un résultat mais qui n'ont pas besoin d'être perçues par l'opérateur. Les barrières fonctionnelles peuvent faire intervenir l'homme (demande d'autorisation ou de mot de passe) ou non (coupure de courant suite à détection d'un court-circuit) ;

- les barrières symboliques sont des barrières qui nécessitent une interprétation pour qu'un opérateur humain puisse réagir ou répondre aux messages qu'elles contiennent. Par exemple les panneaux et les affiches représentant un casque sur les chantiers. Les barrières symboliques demandent à l'homme d'effectuer une action pour éviter l'événement redouté (respect d'une signalisation) ;
- les barrières immatérielles ou procédurales qui sont des barrières qui ne sont pas nécessairement présentes ou représentées dans la situation de travail mais demandent d'être connues par l'opérateur pour être activées. Par exemple les procédures opérationnelles.

Les barrières peuvent être définies par [POLET et al., 2002a] [CHAALI, 2007] :

- le concepteur : suite aux études de risque mais également en respectant des normes et des règles de sécurité ;
- l'exploitant : suite à l'installation dans un environnement de travail existant ;
- l'opérateur humain : suite à un retour d'expérience par rapport à son activité ;

Les barrières sont donc des défenses qui peuvent être conçues par plusieurs intervenants dans le but d'assurer la sécurité du système Homme Machine et de son environnement. Cependant la définition des barrières n'est pas l'essentiel, c'est aussi et surtout leurs dispositions organisées qui constitue un moyen efficace de défense. C'est l'objet de la partie suivante qui traite de la défense en profondeur.

2.2.5 Défense en profondeur

Un système de défense en profondeur est un ensemble cohérent de dispositions et moyens organisés, et structurés en plusieurs lignes de défense contribuant à la maîtrise des effets finaux potentiels susceptibles d'être créés par toutes formes d'agressions sur des éléments sensibles (hommes, système, entreprise et/ou environnement) [COINTET et LAVAL, 2006]. Le nucléaire constitue le premier domaine où a été développé le concept de défense en profondeur [ZHANG, 2004]. Par la suite il a été élargi et exploité pour d'autres systèmes comme celui des transports urbains guidés [PLANCHETTE et al., 2002] [VALANCOGNE et NICOLET, 2002].

Un système de défense en profondeur est constitué d'éléments de défense répondant à une logique en trois niveaux (A, B et C) s'apparentant à une démarche d'ingénierie système.

Niveau A

A ce niveau, les éléments de défense sont décrits selon leurs contributions aux finalités de défense. Trois types de lignes de défense sont décrits :

- les lignes de prévention mises en place pour éviter (ou limiter la probabilité de) la survenue d'un évènement susceptible de créer un effet final non souhaité ;
- les lignes de protection mises en place pour assurer le maintien des effets finaux dans les limites acceptables, que l'évènement redouté se produise ou non. On agit alors sur la gravité des effets potentiels et sur l'occurrence du contexte redouté ;
- les lignes de sauvegarde mises en œuvre pour limiter l'ampleur des effets finaux dans les cas où le contexte redouté ne peut être évité. On agit essentiellement ici sur la gravité de l'effet final et la non-combinaison avec d'autres effets finaux.

Niveau B

A ce niveau, les éléments de défense sont décrits en regard de leurs actions attendues. Cette approche assure une identification des éléments de défense par détermination :

- des principes d'action mis en œuvre ;
- des interactions entre éléments de défense d'une même ligne ;
- des fonctions attendues par ligne de défense.

Qu'il s'agisse d'un élément de prévention, de protection ou de sauvegarde, le point de vue est ici le mode d'action retenu (ou à retenir) vis-à-vis du contexte d'agression : ce mode d'action, déterminant l'action attendue de l'élément de défense, permet à la fois de spécifier son but, de l'identifier, et le nommer de manière concrète.

Les principes d'action se déduisent des constituants génériques de tout contexte d'agression potentielle, à savoir :

- l'agresseur ;
- l'élément sensible ;
- le flux et ses caractéristiques : nature, valeur, trajectoire (sens et direction).

Niveau C

A ce niveau, les éléments de défense sont décrits en regard de leurs dispositifs mis en œuvre. Cette approche assure une définition de chaque élément de défense par mise en évidence :

- des moyens d'action mis en œuvre ;
- des modes d'activation et contrôle de ces moyens ;

- des fonctions attendues par l'élément de défense.

Pour un élément de défense identifié, qu'il soit de prévention, de protection ou de sauvegarde, le point de vue est ici lié aux moyens qu'il doit mettre en œuvre pour satisfaire le principe d'action auquel il participe. Certaines caractéristiques des moyens d'action apparaissent intéressantes à mettre en exergue :

- le positionnement du moyen, par rapport au système (moyen interne, externe ou mixte) ;
- la nature du moyen, qu'il s'agisse d'un équipement, d'un homme ou groupe d'hommes, de procédures, d'un automatisme, ou d'une combinaison de ces éléments.

La Figure 6 présente un arbre des différents moyens d'action, on y retrouve :

- le terme « Homme » qui désigne ici un homme seul ou un groupe d'hommes, agissant dans un cadre organisationnel (responsabilités au sein de l'organisation), avec ou sans aide de type procédures lui décrivant un mode opératoire (logique d'exécution) : on parlera d'action humaine ;
- le terme « Equipement » qui désigne un élément technique, réalisant des fonctions spécifiées par mise en œuvre des composants essentiellement matériels (au sein du système ou vis-à-vis du système) : on parlera d'action réflexe (de type actionneur) ;
- le terme « Automatisme » qui désigne un élément réalisant des fonctions spécifiées par mise en œuvre de processus : on parlera d'action autonome (de type automatisme) ;

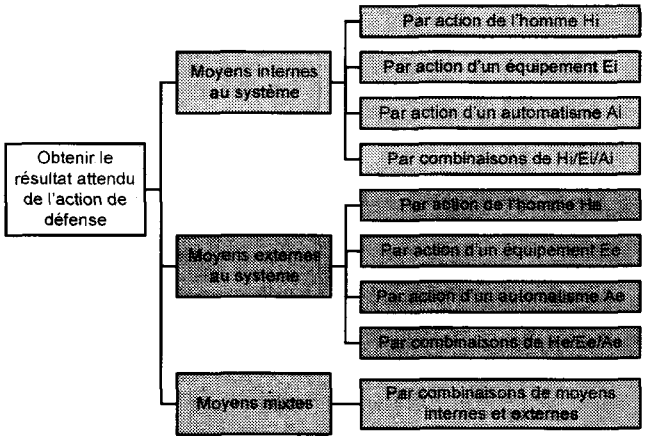


Figure 6 : Eléments de défense – Arbre des Moyens actifs

2.3 L'analyse de risque d'un système Homme Machine

Après avoir vu les moyens de la maîtrise des risques, il est important de s'attacher désormais à l'analyse de risque qui est préalable (comme nous l'avons vu au paragraphe §2.2.1) à la mise en places de ces moyens.

L'analyse de risque se focalise sur les événements non sûrs. Du fait de la composition du système Homme Machine, elle se doit de tenir compte à la fois des défaillances techniques et des défaillances humaines

L'objectif des méthodes d'analyse de risque est d'obtenir une estimation du risque à partir de l'identification des défaillances. Plusieurs méthodes existantes permettent cette démarche et font l'objet de nombreux ouvrages [WHITLOCK et al., 2005] [FADIER, 1990].

On distingue les démarches inductives (qualifiées d'analyse bottom-up) qui partent de la défaillance et cherchent à mettre en évidence les effets sur le système. A ce titre, on peu citer :

- l'Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC ou FMEA – Failure Mode and Effect Analysis) qui est une méthode d'analyse systématique de chaque composant du système concerné par l'étude. Elle a pour but d'identifier les modes de défaillances dont les effets négatifs sont observables au travers de la diminution de la fiabilité, de la disponibilité ou de la sécurité du système ;
- HAZOP (Hazard and Operability Studies). Il s'agit d'une étude systématique, structurée et planifiée des processus ou opérations afin d'identifier et évaluer les dangers et le risque correspondant. Cette technique a été initialement développée pour l'industrie chimique mais elle peut s'étendre à tous les systèmes complexes ;
- la Méthode de l'Espace des Etats (MEE) qui permet de tenir compte de l'évolution temporelle des composants. De ce fait elle est par excellence dédiée aux systèmes à composantes réparables.

A l'opposé, les démarches déductives (qualifiées d'analyse top-down) cherchent à mettre en évidence les causes d'une défaillance donnée. C'est les cas des méthodes suivantes :

- la méthode de l'arbre des causes (MAC) également connue sous les noms d'arbre des défauts ou d'arbre des défaillances. Elle se base sur une représentation graphique de combinaisons logiques de causes conduisant à l'événement redouté ou événement sommet (Top event) correspondant au sommet de l'arbre ;

- l'analyse des causes communes de défaillance qui cherche à identifier les défaillances susceptibles d'entraîner plusieurs défaillances simultanées.

Enfin, certaines méthodes sont mixtes, c'est le cas, par exemple, de la méthode très connue du nœud papillon [INERIS, 2004]. Elle permet de visualiser concrètement des scénarios de défaillance en partant des causes initiales possibles de l'accident (démarche déductive) jusqu'aux conséquences au niveau des cibles identifiées (démarche inductive).

Dans tous les cas, ces méthodes se basent sur une décomposition structurale du système en composants élémentaires afin d'identifier les différentes défaillances et d'étudier leurs combinaisons. En revanche dans un système Homme Machine, l'opérateur est un élément qu'on ne peut pas décomposer. Ses erreurs sont difficilement analysées directement par ce type de méthode. Il est donc nécessaire de recourir à une analyse prenant en compte des facteurs humains.
Dans la suite de ce mémoire, nous nous limiterons à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement liée à la composante humaine du système Homme Machine.

3 Le comportement humain

Avant de chercher à analyser le risque induit par la partie humaine du système Homme Machine, il est nécessaire de s'intéresser au comportement humain afin d'en comprendre les objectifs, les mécanismes et les moyens existants d'analyse.

3.1 L'interaction de l'homme avec le système

3.1.1 La régulation humaine au centre de la fiabilité

A l'intérieur du système, l'opérateur humain est perçu comme source de défaillance mais aussi comme un élément assurant la sécurité du système. Dans les deux cas il est certain que son rôle est central. Dans un système comme celui du transport, l'homme reste encore un élément majeur dans la régulation du système.

L'opérateur humain exécutant une tâche est un système complexe et adaptatif constitué d'interconnexions entre des sous-systèmes partiellement observables et commandables [MILLOT, 1988]. La Figure 7 représente ce système constitué d'entrées relatives aux objectifs de l'opérateur, de perturbations externes qui influencent l'exécution de la tâche ainsi

que des paramètres relatifs à l'état de l'opérateur. La performance est évaluée en sortie à l'aide de critères qualitatifs et/ou quantitatifs.

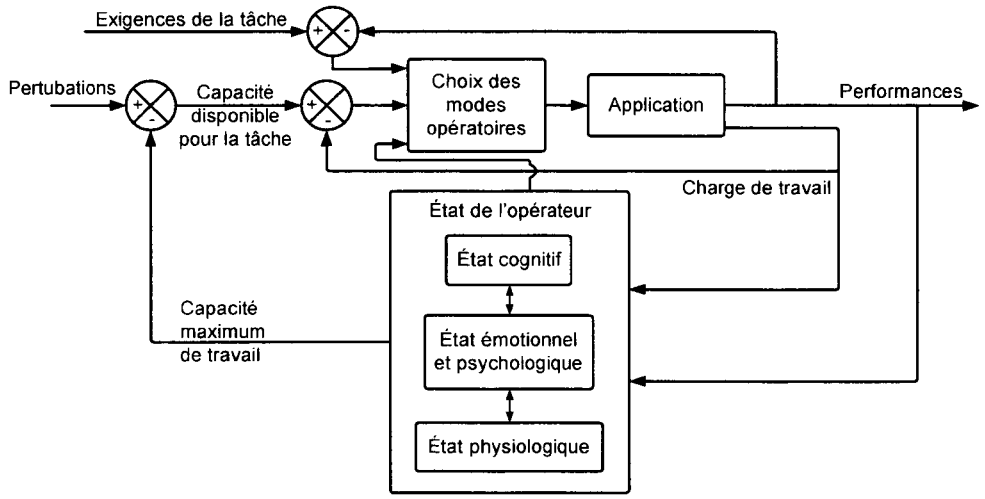


Figure 7 : Modèle de régulation de l'activité humaine [MILLOT, 1988]

Le mécanisme de régulation va consister à choisir les procédures adéquates en fonction de trois boucles :

- la première boucle compare les exigences de la tâche avec la performance actuelle. L'évaluation de la performance peut s'effectuer suivant plusieurs critères (sécurité productivité qualité…) ;
- la seconde boucle concerne la charge de travail. Celle-ci est comparée à la capacité de travail de l'opérateur. Cette boucle permet de réguler l'activité future à partir de la charge de travail engendrée par l'activité courante ;
- la troisième boucle de régulation prend en compte l'état de l'opérateur du point de vue cognitif, émotionnel, psychologique et physiologique. Ces différents états dépendent de facteurs liés à l'opérateur, à l'organisation et à la tâche à effectuer.

On constate ainsi que les comportements sont fonction de beaucoup de paramètres internes ou externes à l'opérateur qu'il est plus ou moins difficile d'évaluer de manière quantitative. Il est notamment très difficile d'évaluer le risque induit par l'opérateur humain par l'évaluation de l'occurrence des états internes. Il convient donc de s'attacher à analyser la contribution de l'homme dans le système, c'est l'étude de la fiabilité dont les concepts fondamentaux sont maintenant exposés.

3.1.2 Erreur et fiabilité humaine

A l'image de la fiabilité technique définie comme l'aptitude d'une entité technique à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant une durée donnée [VILLEMEUR, 1988] la fiabilité humaine peut être vue comme l'aptitude d'un opérateur humain à accomplir une mission requise dans des conditions données pendant une durée donnée.

Néanmoins cette définition est incomplète puisqu'elle considère l'opérateur uniquement comme un simple composant technique du système alors qu'il réagit aux situations diverses qui peuvent se présenter à lui. A la différence du composant technique, l'opérateur possède un rôle beaucoup plus complexe. En effet il se doit [MILLOT, 1988] :

- de prendre les décisions adéquates pour optimiser le fonctionnement du procédé dont il a la charge ;
- de récupérer les dérives anormales de fonctionnement du procédé ou de lui-même ;
- d'éviter l'occurrence d'événement catastrophique ;
- de réguler sa propre activité.

La fiabilité humaine doit donc être vue comme l'aptitude à accomplir une mission requise dans des conditions données et à ne pas exécuter de tâches supplémentaires nuisibles au bon fonctionnement du système Homme Machine [SWAIN et GUTTMANN, 1983].

La particularité du terme "fiabilité" (technique ou humaine) est qu'il désigne à la fois une capacité et la mesure de cette capacité [VILLEMEUR, 1988]. En l'occurrence la fiabilité humaine est également définie comme la probabilité d'accomplir une mission requise dans des conditions données et de ne pas exécuter de tâches supplémentaires nuisibles au bon fonctionnement du système Homme Machine.

L'erreur humaine est définie comme son contraire : l'infiabilité. On peut donc la définir comme le complémentaire de la mesure de la fiabilité humaine. Ainsi elle est vue comme la probabilité d'un opérateur humain à ne pas accomplir une mission dans des conditions données ou à exécuter des tâches supplémentaires nuisibles au bon fonctionnement du système Homme Machine.

Dans son modèle générique de l'erreur humaine (GEMS – Generic Error Modelling System) [REASON, 1990] identifie 3 types d'erreurs distincts (ratés, lapsus et fautes) auxquelles il est intéressant d'ajouter les violations qui sont définies comme des actes volontaires.

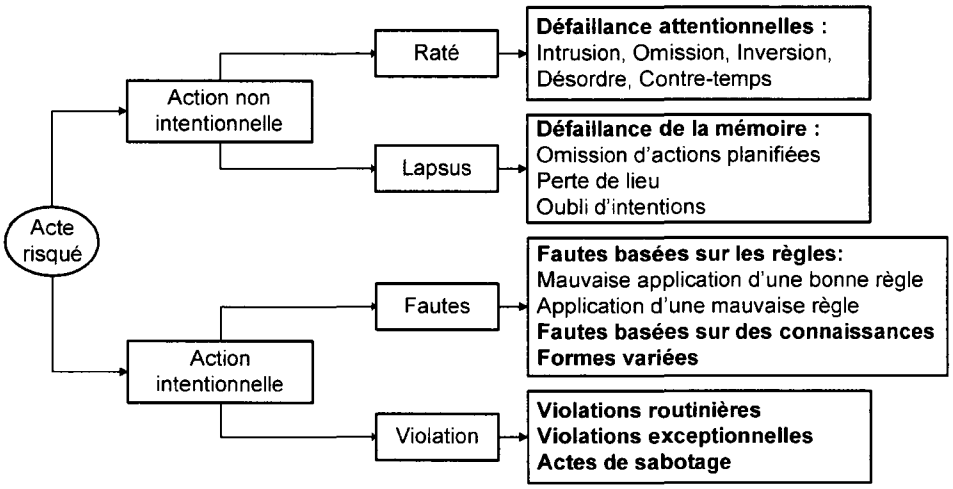


Figure 8 : Modes d'erreur chez l'opérateur humain [REASON, 1990]

Dans la Figure 8, on constate que les ratés et les lapsus sont des actions non intentionnelles, c'est-à-dire qu'il existe un écart entre ce que l'opérateur avait prévu et le résultat obtenu. Elles peuvent être mises en parallèle avec les comportements automatiques (ou habiletés).
Les fautes relèvent de comportements intentionnels c'est-à-dire qu'il n'y pas d'écart entre le résultat obtenu et ce qu'avait prévu l'opérateur. Elles relèvent de comportements de plus hauts niveaux basés sur les règles et les connaissances. En effet, contrairement aux ratés et aux lapsus l'erreur associée aux fautes se situe plus volontiers dans les niveaux de choix d'une règle ou d'élaboration de plan d'actions à partir des connaissances.
Enfin la violation se distingue des autres formes d'erreur classiques parce qu'il y a intention de ne pas suivre les règles et que l'action et le comportement associé sont intentionnels.

Maintenant que les concepts d'erreur et de fiabilité humaines ont été définis, il faut s'intéresser aux moyens de prise en compte du comportement humain dans la maîtrise des risques. C'est l'objet de la partie suivante qui présente l'analyse de risque du comportement humain.

3.2 L'analyse de risque du comportement humain

Lorsque l'on cherche à analyser le risque induit par le comportement humain, on trouve des méthodes d'évaluation de la fiabilité humaine dont l'objectif est triple [SWAIN et GUTTMANN, 1983] [KIRWAN, 1997] :

- identifier l'impact des erreurs et leurs conséquences ;
- quantifier la probabilité d'erreur et de récupération ;
- réduire la probabilité d'erreur ou en diminuer les conséquences.

Ce sont les deux premières étapes qui permettent une analyse de risque, au sens de la démarche de maîtrise des risques et qui font l'objet de la partie suivante.

3.2.1 L'identification et la quantification de l'erreur humaine

La première étape de l'analyse du comportement humain est celle de l'identification de l'erreur humaine. Un grand nombre de méthodes existent, une classification en cinq catégories est proposée par [KIRWAN, 1998]. La classification est la suivante :

- les approches taxonomiques (THERP [SWAIN et GUTTMANN, 1983] – Technique for Human Error Rate Prediction – partie identification par exemple) ou GEMS [REASON, 1990]. Elles présentent des listes de mode d'erreur où l'efficacité de la méthode repose sur la capacité de l'analyste à interpréter le contexte de la tâche ;
- les outils basés sur des approches psychologiques comme SHERPA [EMBREY, 1986]– Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach. Ces outils sont basés sur la compréhension des facteurs influençant la performance humaine. Ils sont caractérisés par la prise en compte des PSF (Performing Shaping Factors) et/ou des mécanismes d'erreur ;
- les modélisations cognitives comme CREAM [HOLLNAGEL et EMBREY, 1994]– Cognitive Reliability and Error Analysis Method. Il s'agit d'outils qui essaient de modéliser les aspects cognitifs de la performance aussi bien dans la relation entre les éléments de la connaissance et les caractéristiques des événements que dans l'étude des nombreux facteurs qui affectent la performance cognitive ;
- les simulations cognitives comme DYLAM [AMENDOLA et al., 1985]– DYnamic Logical Analysing Methodology ou COSIMO [CACCIABUE et al., 1992]– COgnitive SImulation MOdel. Ce sont généralement des simulations informatiques de la performance de l'opérateur. La plupart de ces outils s'attachent à modéliser et prédire les performances cognitives plutôt que psychomotrices car celles-ci apparaissent

comme contribuant de manière plus importante au risque dans les systèmes complexes.

- les techniques fiabilistes. Ces techniques dérivent des approches qui ont prouvé leur efficacité sur des problèmes de fiabilité technique principalement HAZOP – Hazard and Operability Study, FMEA – Failure Mode and Effect Analysis et Event Tree Analysis.

La deuxième étape est celle de la quantification de l'erreur humaine. Son but est de fournir la probabilité d'erreur humaine pour la tâche considérée. L'idée est ici de présenter trois d'entre elles afin de comprendre les différentes démarches possibles de quantification.

THERP [SWAIN et GUTTMANN, 1983] :

Les éléments clés du processus de quantification défini par THERP sont les suivants :

- décomposition de la tâche en actions élémentaires ;
- affectation d'une probabilité d'erreur humaine à chaque action élémentaire ;
- détermination des effets des facteurs de performance sur chaque action élémentaire ;
- calcul des effets de dépendance entre les tâches ;
- modélisation de la fiabilité humaine par un arbre des événements ;
- quantification de la probabilité d'erreur humaine pour la tâche donnée.

Deux difficultés semblent émerger quand à l'efficacité de THERP. La première concerne la qualité de l'expertise qui est nécessaire. En effet à plusieurs étapes de THERP (notamment dans le choix des facteurs de performance), il est nécessaire d'effectuer des choix dont on peut se poser la question de la constance dans le cas d'experts différents. La deuxième difficulté concerne les tables de probabilités et leurs capacités à s'adapter aux tâches du domaine étudié.

HEART [WILLIAMS, 1986] [WILLIAMS, 1992] :

Les éléments clés du processus de quantification défini par HEART sont les suivants :

- classification de la tâche dans une catégorie ;
- affectation d'une probabilité d'erreur humaine nominale à chaque tâche ;
- identification des facteurs de performance pouvant affecter la fiabilité de la tâche ;
- calcul de l'influence de chaque facteur de performance ;
- calcul de la probabilité d'erreur humaine de la tâche.

La question centrale qui se pose avec HEART est de savoir, lors de son application, si les catégories de tâches, les probabilités nominales d'erreurs et les niveaux d'influence des facteurs de performance sont pertinents pour le domaine considéré. La question se pose également de l'indépendance des facteurs dans l'évaluation.

JHEDI [KIRWAN et JAMES, 1989] :
Les éléments clés du processus de quantification défini par JHEDI sont les suivants :

- classification de la tâche ou de l'erreur dans une catégorie ;
- identification du descripteur de tâche ou d'erreur le plus adéquate ;
- réponse aux questions concernant les facteurs de performance (la probabilité d'erreur humaine est calculée automatiquement) ;
- application des valeurs limites de la performance humaine aux arbres de fautes.

Enfin dans JHEDI, les mêmes questions posées pour THERP ou HEART sont valables. Celles-ci concernent la pertinence des catégories de tâches et des probabilités d'erreur humaine utilisées et l'influence de la qualité de l'expertise nécessaire. De plus, il convient de s'interroger sur les réponses aux questions concernant les facteurs de performance. Quelle est l'influence de la qualité des réponses sur le calcul automatique des probabilités d'erreur ?

3.2.2 Limite des méthodes d'analyse de l'erreur humaine

Malheureusement pour l'utilisation que l'on souhaite en faire dans l'analyse de risque du système global, i.e. l'analyse du risque induit par l'homme, ces méthodes présentent trois points faibles :

- elles nécessitent la connaissance des probabilités associées aux erreurs humaines qui sont difficiles à déterminer et très variables selon les domaines d'étude ;
- elles n'assurent pas les mêmes résultats lorsqu'elles sont appliquées à des études différentes [KIRWAN, 1997] ;
- elles ne sont pertinentes que dans l'expression des erreurs humaines et ne prennent pas en compte l'aspect fiabiliste de l'opérateur humain.

C'est ce dernier point qui fait le plus défaut dans ces analyses portant sur le comportement humain. Il met en évidence un besoin de modélisation de la contribution humaine (au sens du double rôle de facteur de fiabilité et de source d'erreur humaine).
L'objet de la prochaine partie va chercher à répondre à ce besoin en regardant les différentes modélisations de l'activité humaine en commençant par les modèles de la psychologie cognitive.

3.3 Modélisation de la contribution humaine

3.3.1 Les modèles issus de la psychologie

Depuis plus de 15 ans la communauté des chercheurs en psychologie aéronautique en particulier nord-américains, présente le concept de Conscience de la Situation (CS) comme un élément clé des processus cognitifs en environnement dynamique et comme un facteur psychologique essentiel contribuant à la sécurité et à l'efficacité du couple Homme Machine.

Du côté de la recherche, la littérature est assez homogène sur les fonctions principales associées à la Conscience de la Situation : donner une cohérence aux événements externes créer des attentes et orienter la prise d'information, servir d'ancrage aux décisions et actions ultérieures permettre l'anticipation des évolutions de la situation et des effets d'actions [ENDSLEY, 1995]

[CHALANDON, 2007] note que la notion de Conscience de la Situation est entourée d'un certain flou conceptuel mais qu'il est possible de dégager trois familles de modèles ::

- le modèle linéaire qui identifie la CS au produit de fonctions cognitives séquentiellement organisées (Perception – Compréhension – Anticipation) précédant la décision et l'action ;
- le modèle de régulation dans laquelle la CS peut être identifiée à une représentation fonctionnelle continuellement mise à jour;
- le modèle écologique qui associe la CS à l'intégration dans l'activité des valeurs adaptatives des contraintes et ressources externes.

.3.3.1.1 Le modèle linéaire

Ce modèle repose principalement sur les travaux de [ENDSLEY, 1995] qui propose la définition suivante de la Conscience de la Situation :

"La perception des éléments de l'environnement dans un volume de temps et d'espace la compréhension de leur signification et la projection de leur état dans le futur proche".

L'activité y est décrite par l'articulation de trois processus hiérarchiquement et temporellement organisés :

- la perception des éléments de l'environnement, étape consistant à percevoir les états les attributs et la dynamique des éléments de l'environnement ;
- la compréhension de la situation actuelle, étape concernant la compréhension de la signification de ces éléments en rapport avec les objectifs poursuivis ;
- l'anticipation des états futurs, capacité à anticiper les actions futures des éléments de l'environnement au moins pour le futur proche. Ceci est réalisé par la projection d'un modèle mental de comportement sur la connaissance des éléments et sur la compréhension de la situation.

Dans ce modèle, l'activité humaine est abordée en tant qu'état(s) instantané(s) de connaissances sur le monde intervenant de façon indépendante et sérielle en amont de la prise de décision et de l'action. La synchronisation avec la dynamique de l'environnement s'opère via une boucle de rétroaction qui est une "re-perception" de l'environnement après l'achèvement d'un cycle Perception – Compréhension – Anticipation – Décision – Action.

.3.3.1.2 Le modèle de régulation

Le deuxième type de modèle, celui de la régulation, envisage la compréhension non pas comme la construction d'une représentation en réaction à l'occurrence d'un événement particulier mais comme l'ajustement permanent d'une représentation en fonction de l'historique de la situation et des buts à atteindre Une des caractéristiques communes aux modèles de cette approche est de proposer des modèles représentationnels dynamiques multi-niveaux. Ce type de modèle peut-être directement rapproché du modèle de régulation de l'activité humaine présenté au § 3.1.1. [HOC et AMALBERTI, 1994] propose un modèle au centre duquel se trouve une représentation symbolique ou conceptuelle appelée "représentation occurrente" qui est alimentée en continu par des informations du processus et des connaissances générales.

.3.3.1.3 Le modèle écologique

Dans ce troisième type de modèle, dit écologique, l'activité humaine est interprétée en terme de couplage dynamique entre l'homme et l'environnement. Cette approche souligne la nécessité de l'adaptation de l'opérateur aux contraintes et ressources de l'environnement et propose la définition suivante [SMITH et HANCOCK, 1995] : "Une conscience adaptative dirigée vers l'externe". Ce modèle emprunte à la psychologie écologique [GIBSON, 1979] la notion d'affordance définie comme une entité mixte sujet / environnement qui spécifie les potentialités et contraintes d'interaction qui existent dans un environnement pour un organisme donné. Les affordances permettent de décrire l'environnement comme porteur de propriétés significatives déterminant en partie l'action les risques ou les obstacles. Cette approche a donné naissance à des méthodes de conception système et de conception d'interfaces dites écologiques qui se donnent pour objectif d'expliciter ces "affordances" et de les transférer au niveau perceptivo-gestuel.

Malgré la définition de la Conscience de la Situation, aucune des modélisations présentées ne permet de décrire l'impact du comportement humain sur la fiabilité du système Homme Machine. C'est l'objet de la dernière partie de ce chapitre qui présente la variabilité du comportement humain.

3.3.2 La variabilité du comportement humain

La vision de l'homme exclusivement comme source d'erreur est une impasse, car elle ne prend pas en compte son caractère indispensable dans l'exploitation normale ; elle ne prend pas en compte non plus les aspects liés aux multiples perturbations [MAGNE et VASSEUR, 2006]. Il existe un besoin de modèle de la variabilité de la performance humaine plutôt que de l'erreur humaine.

Le point de vue qui nous intéresse ici (celui de la fiabilité du système global), nous pousse à caractériser la variabilité de la performance de l'opérateur humain en la replaçant par rapport aux lignes de défense existantes. Celles-ci ainsi que les barrières les constituant sont considérées comme des éléments de référence de la fiabilité du système.

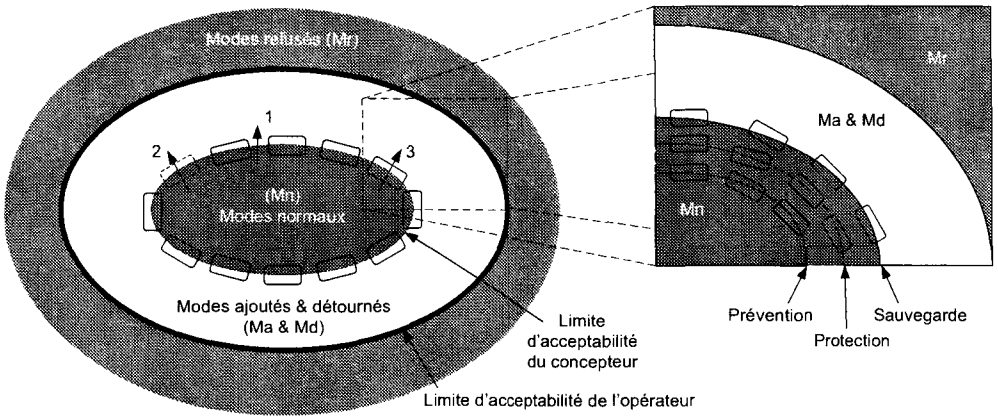


Figure 9 : Variabilité du comportement humain et positionnement par rapport au système de défense adapté de [POLET, 2002]

La Figure 9 représente les quatre types de modes opératoires applicables par l'opérateur. On retrouve ainsi :

- les modes refusés, situés au delà du seuil d'acceptabilité de l'opérateur, où celui-ci n'accepte pas les actions et/ou les conséquences que ces modes impliquent ;
- les modes normaux, prévus lors de la conception, sont encadrés par le système de défense composé de trois lignes de défense : les lignes de prévention, de protection et de sauvegarde ;
- les modes ajoutés, créés par l'opérateur ;
- les modes détournés, qui correspondent à la modification de procédures existantes.

Le fait de se trouver dans l'espace des modes ajoutés ou détournés résulte du franchissement du système de défense par l'opérateur, ce qui peut se faire selon trois cas de figures :

- une erreur de conception laisse la possibilité à l'opérateur de franchir le système de défense ;
- une défaillance technique empêche les éléments de défense de fonctionner correctement ;
- l'opérateur franchit intentionnellement les éléments de défense en accomplissant une violation.

Conclusion

Ce premier chapitre a répondu à l'objectif de présenter la problématique des systèmes Homme Machine. Il a commencé par définir le risque et son étude possible à travers la sûreté de fonctionnement. Par la suite les différents moyens de défenses utilisables dans le processus de maîtrise des risques ont été présentés avec notamment le concept de barrière à la base de la défense en profondeur.

Les méthodes d'analyse de risque nécessaires à l'étude des systèmes Homme Machine ont montré le manque de prise en compte du comportement humain. Ce dernier a été ensuite introduit en cherchant à caractériser son influence sur la fiabilité du système. Il en ressort que l'opérateur humain doit être vu à la fois comme un agent de fiabilité et source d'erreurs potentielles. Ces erreurs humaines peuvent être analysées et évaluées par différentes méthodes qui présentent néanmoins trois défauts principaux :

- la nécessité d'une connaissance des probabilités associées aux erreurs humaines difficiles à déterminer et très variables ;
- la non garantie des mêmes résultats lorsqu'elles sont appliquées à des études différentes
- leur application aux erreurs humaines ne prennent pas en compte l'aspect fiabiliste de l'opérateur humain.

A ce stade, la nécessité de modéliser la contribution humaine caractérisée par le double aspect – facteur de fiabilité et source d'erreur – est mise en évidence. Au final, les modélisations issues de la psychologie ne permettent pas de rendre compte de la variabilité du comportement humain au sein du système. En conséquence, l'opérateur humain a besoin d'être étudié sous l'angle de sa variabilité afin que celle-ci soit prise en compte dans l'analyse des risques.

Le chapitre suivant se propose de présenter plus spécifiquement le domaine des transports urbains guidés qui concerne notre étude. Une attention particulière sera portée sur la place qu'occupe l'opérateur humain dans ce type de système Homme Machine.

Chapitre 2 : La conduite de transport urbain guidé

1 INTRODUCTION **36**

2 PROBLEMATIQUE DU TRANSPORT FERROVIAIRE **37**

2.1 DESCRIPTION DU TRANSPORT FERROVIAIRE 37

2.1.1 Présentation du domaine ferroviaire 37

2.1.2 Composition d'un système de transport urbain guidé 39

2.1.3 Les risques du transport ferroviaire 43

2.2 L'HOMME DANS LE TRANSPORT FERROVIAIRE 47

2.2.1 L'opérateur humain omniprésent dans le système 47

2.2.2 La recherche sur la conduite ferroviaire 48

3 L'ACTIVITE DE CONDUITE **52**

3.1 CARACTERISTIQUES DE LA CONDUITE DE TRANSPORT URBAIN GUIDE 52

3.1.1 Le système Homme – Matériel – Environnement 52

3.1.2 Analyse fonctionnelle du métier de machiniste 53

3.2 PROBLEMATIQUES DE LA CONDUITE DE TRANSPORT URBAIN GUIDE 59

3.2.1 La nécessaire adaptation aux changements de contexte 59

3.2.2 La gestion continue des événements 62

3.2.3 Le conducteur face aux évolutions du système 62

4 CONCLUSION **66**

Chapitre 2 : La conduite de transport urbain guidé

1 Introduction

Dans les systèmes de transport guidés, la sécurité est garantie par un ensemble de moyens de maîtrise des risques où l'homme occupe une place centrale. C'est notamment le cas dans la fonction particulière de conduite de transport urbain guidé.

La première partie va traiter de la problématique du transport ferroviaire en présentant les particularités de ce mode de transport. A travers sa description et la question de son niveau de sécurité, le facteur humain apparaîtra comme élément central du système de transport. Ensuite sera abordée la recherche en facteur humain qui s'est développée dans ce domaine en présentant la variété des recherches puis en s'intéressant plus particulièrement à celles qui ont attrait à la conduite en elle-même.

La deuxième partie se concentrera sur la tâche particulière de la conduite de transport urbain guidé. Ses caractéristiques générales seront présentées à l'aide d'une analyse fonctionnelle du métier de conducteur. Enfin les évolutions de l'activité de conduite seront décrites afin d'en déduire les capacités humaines qui déterminent le comportement du conducteur.

2 *Problématique du transport ferroviaire*

2.1 Description du transport ferroviaire

2.1.1 Présentation du domaine ferroviaire

Le transport ferroviaire constitue à l'échelle de l'Europe, un mode de transport en concurrence avec la route et l'avion ; tandis qu'à l'échelle de la ville, il est en concurrence avec la route. Il présente de nombreux avantages par rapport aux autres modes de transport [CE-DG ET, 1992] :

- il est bien adapté au transport collectif et au transport de gros volumes du fait qu'il peut transporter de grandes quantités dans une seule unité, à une vitesse et à une fréquence élevée ;
- le ferroviaire est moins polluant que la route et l'avion grâce à son efficacité énergétique, sa principale source d'énergie étant l'électricité, qui peut être produite à partir de sources d'énergie renouvelables non polluantes. Le transport de 1 000 tonnes de marchandises sur un kilomètre coûte, en terme de pollution, 3,80 euros pour le rail, contre 7,85 euros pour la route.
- l'étroite intégration roue/rail, la possibilité de séparer techniquement les trains et leur mode d'exploitation et de gestion en font le mode de transport le plus sûr.
- les nouvelles technologies (comme la grande vitesse) pourraient apporter des avantages décisifs tels que l'augmentation de la capacité, ceci permettrait de réduire encore les coûts unitaires et le coût de maintenance des nouveaux équipements.

Concernant le troisième point, la démonstration de l'avantage en sécurité du transport ferroviaire sur les autres modes de transport est illustrée par le Tableau 1. On y considère le risque associé au danger mortel et on compare le taux de décès par distance parcourue ainsi que par temps de trajet.

Mode de transport	Nombre de décès par distance parcourue (par 100 millions de Km)	Nombre de décès par temps de trajet (par 100 millions d'heure de fonctionnement)
Route (moyenne pondérée))	0.95	28
Motocycles	13.8	440
Piétons	6.4	75
Cycles	5.4	25
Voitures	0.7	25
Autobus	0.07	2
Ferry	0.25	16
Aérien (civil uniquement)	0.035	8
Rail	0.035	2

Tableau 1 : Comparaison du risque mortel pour différents modes de transport de voyageur [ETSC, 2003]

On constate que le transport ferroviaire est le transport le plus sûr par durée de fonctionnement et par distance parcourue (à égalité avec le transport aérien pour ce dernier point). Il est dans les deux cas, plus sûr que le transport routier.

En France, le transport ferroviaire rassemble plusieurs types de réseau. Chaque réseau possède ses particularités qui influencent l'apparition de risque, on distingue :

- le réseau à grande vitesse où circulent le TGV (Train Grande Vitesse) français ou l'ICE (Inter City Express) allemand. Les vitesses élevées qui y sont pratiquées sont source de risque potentiel et c'est notamment l'infrastructure protégeant le train des interactions avec l'environnement qui garantit la sécurité ;
- le réseau conventionnel où circulent les wagons de marchandises et les voitures de voyageurs. Sur ce réseau, les facteurs de risque sont les interactions potentielles avec l'environnement ainsi que les distances de freinage (surtout pour le transport de marchandises) ;
- le réseau urbain ou suburbain où circulent ce que le ministère des transports dénomme les « transports guidés » c'est-à-dire tous les appareils de transports publics guidés urbains de personne (métros, tramways sur fer ou sur pneus et autres systèmes de transports guidés urbains). Ici ce n'est pas la vitesse (moindre que sur les précédents réseaux) mais la densité des matériels roulants et des interactions avec les voyageurs qui est source de risque.

D'un point de vue réglementaire, le service technique des remontées mécaniques et des transports guidés (STRMTG), rattaché à la direction de la mer et des transports (DGMT) traite des transports guidés ; et de l'autre côté, l'établissement public de sécurité ferroviaire (EPSF) qui est l'autorité nationale de sécurité ferroviaire placée sous tutelle du ministère des transports, se concentre sur le réseau ferré national rassemblant le réseau grande vitesse et le réseau classique soit plus de 50 000 Km de voies principales en exploitation.

Dans la suite de ce mémoire, l'attention sera portée sur les transports urbains guidés dont les particularités en termes de vitesse et de matériel roulant diffèrent des autres réseaux ferroviaires. La prochaine partie a pour but de présenter les éléments constitutifs d'un système de transport urbain guidé.

2.1.2 Composition d'un système de transport urbain guidé

Un système de transport urbain guidé peut être décomposé en sous-systèmes suivant la proposition ci-après [STRMTG, 2006a]. Cette décomposition distingue :

- les sous-systèmes opérationnels qui correspondent aux cycles de vie à envisager dans l'étude du système ;
- les sous-systèmes structurels qui rassemblent les éléments physiques entrant dans la composition d'un système de transport urbain guidé.

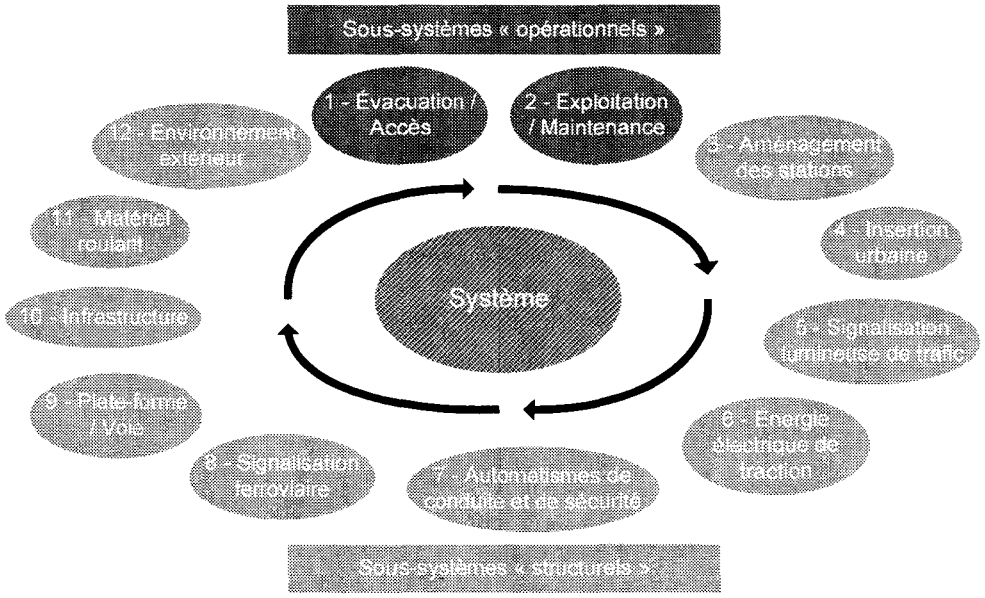


Figure 10 : Décomposition d'un système de transport urbain guidé

La Figure 10 présente les différents éléments du système. On y distingue les sous-systèmes suivants :

1. Évacuation / Accès

Ce sous-système rassemble l'ensemble des procédures permettant l'arrêt (partiel ou total) de l'exploitation. L'évacuation de voyageurs doit y être traitée et organisée pour assurer la sécurité des voyageurs.

2. Exploitation / Maintenance

Ce sous-système permet l'entretien et la maintenance des trains et de l'infrastructure ainsi que leur mise à disposition pour chaque période d'exploitation. Concrètement cela passe par la formalisation d'un ensemble de processus et de procédures explicitant le rôle de chacun.

3. Aménagement des stations

Ce sous-système permet d'assurer les transferts quais/trains des voyageurs au niveau des points desservis ainsi que les flux de voyageurs à l'intérieur des stations.

Il est constitué par l'ensemble des aménagements (couloirs, escaliers mécaniques, signalétique...) permettant aux voyageurs de circuler dans les stations et aussi par ceux participant au transfert quais/trains (portes palières, éclairage ...)

4. Insertion urbaine

Ce sous-système a pour objectif :

- de s'adapter aux autres systèmes de transport en interface (afin de permettre aux voyageurs de combiner facilement plusieurs types de transport) et au site d'évolution;
- d'assurer ses fonctions malgré les éléments de l'environnement potentiellement sources de risque ;
- de respecter les ambiants sensibles présents dans l'environnement ;
- de présenter aux yeux des voyageurs potentiels un aspect attractif.

Ce sous-système concerne particulièrement les systèmes de transport urbains guidés qui évoluent dans des environnements urbains (comme le tramway par exemple).

5. Signalisation lumineuse de trafic

Ce sous-système participe à la gestion des mouvements des trains. Il est garant de la sécurité vis-à-vis des autres flux de transport qui peuvent être sources de risque. Cette signalisation est par conséquent spécifique aux transports urbains guidés de surface qui n'évoluent pas en site

propre. On peut par exemple citer le signalisations R17 et R18 spécifiques aux tramways évoluant en site urbain.

6. Énergie électrique de traction

Ce sous-système a la charge de l'alimentation de tous les équipements du système ferroviaire. A ce titre, on y trouve :

- les postes d'énergie d'alimentation traction ;
- les postes de commandes centralisées ou locaux (pour leur partie spécifique à l'énergie de traction)
- la commande (alimentation et coupure) centralisée, locale ou à pied d'œuvre de l'énergie de traction ;
- le contrôle de l'état d'alimentation et de position ;
- le dispositif d'alimentation ou d'isolement (sectionneur, interrupteur suivant découpage retenu) ;
- le dispositif de coupure d'alimentation d'urgence (Avertisseur d'Alarme) ;
- le système de détection des surintensités (courts-circuits, ...) ;

7. Automatismes de conduite et de sécurité

Ce sous-système assure, pour chaque ligne, le déplacement des trains avec voyageurs entre points desservis par la ligne ainsi que la maîtrise des mouvements des trains avec voyageurs pour l'ensemble des points desservis par la ligne. Il peut s'agir d'automatismes embarqués sur le matériel roulant comme la veille automatique (ou système homme mort), installés sur les voies comme les KPV (Contrôleurs Ponctuelles de Vitesse) ou les deux dans le cas du Pilotage Automatique.

8. Signalisation ferroviaire

Ce sous-système assure, pour chaque ligne, le déplacement des trains avec voyageurs entre points desservis par la ligne ainsi que la maîtrise des mouvements des trains avec voyageurs pour l'ensemble des points desservis par la ligne. Il concerne l'ensemble des indications fixes ou dynamiques (à l'exception de la signalisation lumineuse de trafic) permettant de fournir une information au conducteur ou au personnel sur les voies. Son rôle est d'apporter une indication, en ce sens il diffère du sous-système automatismes de conduite et sécurité qui agit sur le mouvement du train (par la gestion de sa vitesse notamment).

9. Plate-forme / Voie

Ce sous-système permet d'assurer le déplacement des trains ainsi que le transfert quais/trains des voyageurs. Les principales installations de ce sous-système sont :

- le rail de guidage, d'alimentation et la piste (pour le roulement pneu).
- les appareils de voie (aiguillage à gauche, à droite, symétrique, ...) ;
- le ballast ou radier béton, les traverses ...

10. Infrastructure

Ce sous-système permet les transferts des voyageurs à chaque point desservi. Il permet également le déplacement et la maîtrise des mouvements des trains avec voyageurs entre points desservis par la ligne. Enfin, il permet de gérer les évacuations voyageurs (jusqu'au rétablissement des conditions nominales).

Les principales installations de ce sous-système sont :

- les éléments constitutifs de l'infrastructure ;
- les ponts, viaducs ou tunnels ;
- les galeries techniques (passage des câbles, ...) ;
- poste d'épuisement des eaux ;
- ouvrage de ventilation et désenfumage ;
- système d'éclairage normal et de sécurité.

11. Matériel roulant

Ce sous-système permet d'assurer un transfert de voyageurs entre chaque point desservi de la ligne, par l'arrêt en station et l'évacuation en cas de nécessité. Il est constitué par l'ensemble des rames, des bogies, des aménagements intérieurs et extérieurs d'un train.

12. Environnement extérieur

Ce sous-système est spécifique à l'environnement dans lequel évolue le système de transport. Il concerne :

- la flore, la faune ;
- la présence de nappe phréatique, fleuve, rivière, plan d'eau ;
- la géologie du sol (sable, carrière,..) ;
- l'air (composition chimique ozone, pollution,...) ;
- les activités voisines (industrielles, public ou habitation) ;

- les concessionnaires de la voirie (électricité, gaz, téléphonie, eau, égouts,...) ;
- les autres infrastructures (ponts, tunnels, ...) ;

En reprenant la description du risque qui est faite dans le chapitre 1 § 2.1.3, chacun de ces sous-systèmes peut constituer un élément agressif ou sensible. Les risques propres au système ferroviaire sont maintenant détaillés afin d'identifier les éléments du système concernés.

2.1.3 Les risques du transport ferroviaire

.2.1.3.1 Classification des risques

Une classification des risques liés à l'exploitation d'un système de transport guidé a été proposée par [HADJ-MABROUK et al., 1998]. Elle y distingue trois catégories de risque à travers trois types d'événements redoutés: les accidents utilisateur, les accidents système et les accidents utilisateur/système. Cette classification peut être enrichie de la catégorie accident environnement/système [BEUGIN, 2006]. La figure ci-dessous détaille ces différents types d'accidents et les risques qui y sont associés.

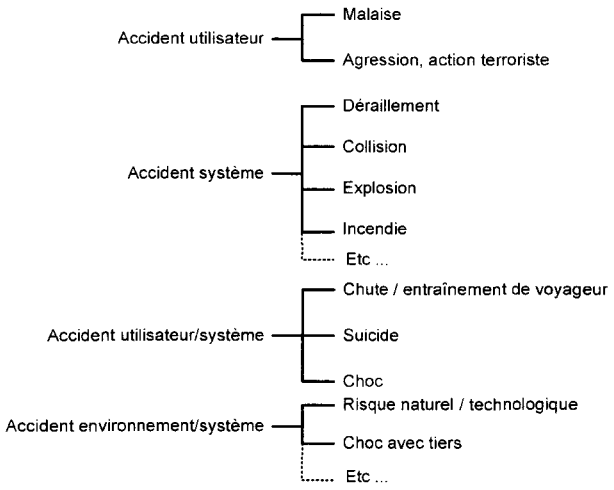


Figure 11 : Classification des risques dans le domaine des transports guidés par types d'accidents

Cette classification distingue chaque type d'accident par l'origine du flux agressif source du risque et celle de l'élément sensible. On y trouve :

- l'accident utilisateur. Les éléments agressifs et sensibles se situent au niveau de l'utilisateur. Les accidents sont associés aux dommages causés par un ou plusieurs usagers des transports situés au sein du système alors qu'aucun problème de

fonctionnement du système ne soit survenu. Ils regroupent les malaises (lors d'une bousculade par exemple) et les agressions ou les actions terroristes ;

- l'accident système. Les éléments agressifs et sensibles se situent au niveau du système. Ces accidents sont associés aux dommages causés au système et aux usagers ou personnels lors d'un accident initié par le système lui-même. Sont classés dans cette catégorie les déraillements, les collisions et les incendies (lors du transport de matières dangereuses ou de surchauffe matériel, par exemple), etc... Ces accidents sont issus soit de défaillances techniques (défaillance d'un équipement, par exemple), soit d'erreurs commises par des opérateurs intervenant dans le système lors de l'exploitation ou la maintenance ;
- l'accident utilisateur/système. L'élément agressif provient de l'utilisateur et l'élément sensible fait partie du système. Ces accidents sont associés aux dommages causés à une ou plusieurs personnes situées au sein du système, lors d'une action effectuée par cet ou ces usagers durant le fonctionnement normal du système. Cette action est soit volontaire (descente prématurée du train, suicide, par exemple), soit involontaire (chute, pincement, par exemple). L'utilisateur est initiateur du dommage et il est le plus souvent le mieux placé pour éviter le risque ;
- l'accident environnement/système. L'élément agressif provient de l'environnement et l'élément sensible fait partie du système. Ces accidents sont associés aux dommages causés aux systèmes et aux usagers lors de conditions environnementales dites de catastrophes naturelles. Ces risques sont réduits pour les usagers, selon une gestion post-accident optimisée (plan d'évacuation, par exemple), mais pas pour le système qui peut subir de nombreux dégâts.

Cette classification est pertinente car elle permet de comprendre l'étendue de la typologie des risques dans un système de transport guidé. Néanmoins, ce n'est pas celle qui est utilisée comme indicateur jugeant du niveau de sécurité d'un système de transport guidé.
Il s'agit plutôt dans ce cas, d'une liste d'événements redoutés comme celle proposée par le STRMTG et présentée dans le tableau ci-dessous [STRMTG, 2006b] :

Evénements	Sous-type	Observations
Incendie / Explosion	Dans une rame en station	L'incendie et l'explosion sont considérés comme des événements de même nature
	Dans une rame en ligne	
	Dans une station	
	Sur la ligne	
	Ailleurs	
Déraillement / Renversement	Dans une station	
	Sur la ligne	
	Ailleurs	
Panique	Dans une rame en station	
	Dans une rame en ligne	
	Dans une station	
	Sur la ligne	
	Ailleurs	
Electrocution / Brûlure	Dans une rame	
	Dans une station	
	Sur la ligne	
	Ailleurs	
Collision	Rattrapage	Il s'agit de la collision entre matériels roulants
	Prise en écharpe	
	Nez à nez	
	Avec un obstacle fixe	Il s'agit de la collision du matériel roulant avec un obstacle
	Avec un obstacle mobile	
Autres accidents voyageurs	Chute dans une rame	
	Chute depuis une rame en station	
	Chute depuis une rame en ligne	
	Chute depuis le quai	
	Entraînement par rame en station	
	Coincement dans une rame	
Autres		Il s'agit des événements du type attentat, risque naturel, rupture d'ouvrage, etc.

Tableau 2 : Liste « générique » des évènements redoutés de niveau système

Dans cette liste, la distinction de l'origine de l'événement n'apparaît plus. On retrouve à la place une liste beaucoup plus complète des événements pouvant intervenir sur le réseau. Ceci permet aux autorités nationales de sécurité, comme le STRMTG pour les transports urbains guidés, d'obtenir une liste correspondante des moyens mis en place pour gérer ces risques. Ce moyen de vérification de la bonne gestion de la sécurité passe par un ensemble de documents à fournir dossier de sécurité, analyse de risque, ...

La question qui se pose maintenant est de savoir quelle est la place que prend l'opérateur humain dans l'analyse des causes des risques et surtout dans la manière de les gérer.

.2.1.3.2 Le transport ferroviaire : un système industriel complexe

Le secteur du transport ferroviaire peut être classé parmi les grands systèmes complexes industriels au même titre que le nucléaire, la chimie ou la métallurgie. En effet, il répond aux cinq grandes caractéristiques suivantes [AMALBERTI, 1996] [AMALBERTI, 1997] :

- les processus sont dynamiques, évoluant sans cesse, ce qui les rend délicats à contrôler,
- le contrôle reste humain quel que soit le niveau d'automatisation,
- son existence s'inscrit dans une perspective macrosystémique. Le fonctionnement n'est pas totalement indépendant en tant qu'unité fonctionnelle,
- il s'agit d'un système à risques. L'accident est redouté pour sa gravité propre et ses conséquences économiques,
- les systèmes de transport sont extrêmement sûrs et le niveau de sécurité requis est très élevé.

Ce statut de grand système complexe industriel implique plusieurs paradoxes qui posent les problématiques futures concernant la sécurité du système.

Tout d'abord "plus la sécurité du système est bonne, plus il est fondamental qu'elle soit meilleure" [AMALBERTI, 1997]. Ce concept simple est justifié par l'impact d'accidents sur le grand public. Celui-ci a une confiance en constante augmentation dans la complexité technologique des systèmes ce qui, au final, rend l'accident de plus en plus inacceptable.

Le problème suivant concerne la difficulté à augmenter le niveau de sécurité du système. En effet les grands systèmes à risques n'arrivent pas à diminuer la valeur du nombre d'accidents par unité de fonctionnement (heures de fonctionnement, kilomètres parcourus ...). Cette valeur est actuellement située sur une asymptote de 1 accident par million d'unité de tranche de fonctionnement (départ – arrivée) [AMALBERTI, 1996]. Les hypothèses sur les causes de

cette limite sont multiples mais l'argument qui revient le plus souvent est celui du facteur humain. Ceci est discutable selon deux points. Le premier est lié au fait qu'en pointant son attention sur les accidents correspondants aux éventuelles erreurs humaines, on oublie le rôle d'agent de fiabilité que joue l'opérateur humain dans des situations d'urgence ou dans celles non prévues lors de la conception. Le deuxième point est en relation avec les analyses causales d'accidents effectuées ; celles-ci cherchant à remonter au maximum dans les causes profondes, ce qui a pour conséquence quasi-systématique d'aboutir sur une cause humaine (utilisateur, concepteur ou législateurs du système).

Au final, le transport ferroviaire apparaît comme un système industriel complexe où l'opérateur humain (en conception, en exploitation ou en maintenance) occupe une place centrale. C'est pourquoi différentes communautés scientifiques ont été amenées à l'étudier. Une revue de ces travaux de recherche fait l'objet de la partie suivante.

2.2 L'homme dans le transport ferroviaire

2.2.1 L'opérateur humain omniprésent dans le système

La présence de l'opérateur humain dans un système ferroviaire inclut tous les types de postes, de la conduite de véhicule, à la supervision du trafic ou à la maintenance du matériel roulant ou de la voie. Les contextes de travail sont variés. Il peut s'agir des cabines de conduite, des salles de contrôles ou des stations. Les motivations et les compétences des hommes impliqués varient également. C'est le cas des signalisateurs, des conducteurs, des personnels de contrôle ou de tiers (dans leurs actions légitimes aux passages à niveau ou illégitimes dans le cas des suicides ou des actes de vandalisme).

Tout ceci fait de l'opérateur humain un acteur omniprésent dans le système ferroviaire. Concernant la recherche en facteur humain dans le ferroviaire, celle-ci fut paradoxalement pendant longtemps un domaine oublié, au moins en comparaison avec l'aviation (le pilotage et le contrôle du trafic aérien), la conduite automobile ou le nucléaire. Il est possible que le ferroviaire n'apparaisse pas comme un domaine aussi innovant que l'aéronautique, et peut-être pas aussi prioritaire que le transport routier au moins en termes de taux d'accidents ou de distance parcourue.

Ce désintérêt a changé de manière significative au milieu des années 90. Depuis quelques années, le ferroviaire est un marché qui croît de manière régulière et les facteurs humains qui y ont une place centrale se doivent d'être étudiés.

La partie suivante se propose d'effectuer un tour rapide des études en facteur humain dans le ferroviaire à travers l'exemple de la conduite, qui est notre sujet.

2.2.2 La recherche sur la conduite ferroviaire

De tous les thèmes en facteur humain dans le ferroviaire, la conduite est sans doute le plus étudiée ces dernières années. Ceci s'explique certainement par les connections pouvant exister avec la conduite automobile. Les travaux concernent non seulement la vigilance dans la conduite, la perception, le traitement des signaux, mais également les enquêtes des franchissements de signaux et la conception adéquate des systèmes de signalisation.

Il existe des examens approfondis des franchissements de signaux [LOWE et TURNER, 2005] [PASQUINI et al., 2004] ou de l'utilisation de systèmes de vigilance et de maintien de l'attention [MCLEOD et al., 2005] [WHITLOCK et al., 2005]. Les techniques modernes d'observation comme la capture des mouvements oculaires ainsi que des directions du regard permettant l'interprétation du comportement des conducteurs sont utilisées [MERAT et al., 2002] [ITOH et al., 2001]. Les recherches sur la fatigue ont utilisé des méthodes d'observations et d'auto évaluation pour étudier l'effet de longues journées de travail de plus de six heures [GOUIN et al., 2001]. Elles utilisent des études sur simulateur [ROACH et al., 2001] et développent des outils de checklist comme le « Fatigue Index » [COTTERILL et JONES, 2005].

Il existe également des essais systématiques pour comprendre et modéliser les activités humaines impliquées dans la détection, la reconnaissance et le traitement des signaux afin de fournir des bases rationnelles pour l'installation des informations sur la voie [HAMILTON et CLARCKE, 2005] [LI et al., 2005]. Dans ce domaine, beaucoup de connaissances proviennent de l'expérience tirée des panneaux routiers [CASTRO et HORBERRY, 2004].

Concernant la conception, beaucoup d'efforts ont été effectués pour améliorer l'ergonomie dans les cabines de conduite [GRABAREK, 2002] [STEINICKE et MEISSNER, 2003] [MACK et al., 2004]. La recherche s'est notamment intéressée aux interfaces de présentation d'information [GERBINO et STRANO, 2002].

Un autre axe de recherche est celui de l'étude de la fiabilité humaine. Celle-ci peut s'effectuer par l'étude de l'interaction de l'homme avec un système particulier [KECKLUND,

2001] ou dans le cadre d'un développement méthodologique permettant l'identification d'erreurs potentielles dans le domaine de la conduite [RSDF, 1997] [VANDERHAEGEN, 2001] [KECKLUND, 2001] [RSSB, 2005] [CHAALI et al, 2007]. Ce dernier point étant le thème de notre étude, il convient ici de détailler un peu plus ces études.

Le programme du groupe de travail RATP [RSDF, 1997] a eu pour fondement l'hypothèse que les différences constatées entre Métro et RER proviennent de la nature significativement différente des activités de conduite dans les zones de garage et de terminus de chacun de ces deux réseaux. A partir de là, des actions concrètes ont été définies afin de vérifier la validité de cette hypothèse parmi lesquelles le calcul de la probabilité de franchissement sur le RER et sur le Métro. Le résultat est que la quantification de l'erreur de franchissement donne un chiffre comparable pour le Métro et pour le RER A (Hors tronçon central où le Système d'Aide à la Conduite, à l'Exploitation et à la Maintenance – SACEM – aide le conducteur). En effet, il y a dans les deux cas, 90 % de chance pour que la probabilité de franchissement intempestif d'un signal fermé soit comprise entre 3.10^{-5} et 5.10^{-5}. Ces résultats sont obtenus à partir d'échantillons de franchissements de signaux observés sur les réseaux.

Le projet TRAIN (TRAffic safety and INformation environment for train drivers) [KECKLUND, 2001] est un programme de recherche lancé en 1998 par la Swedish National Rail Administration après l'apparition de certains accidents et incidents. Leurs particularités faisaient apparaître des problèmes entre l'emplacement d'indications embarqués et de signaux avec la compréhension que se faisait le conducteur du fonctionnement du système ATC (Automatic Train Control).

La démarche du projet TRAIN fut de décrire et analyser les relations entre prise d'informations et horaires de travail, situation de travail et environnement de travail. L'étude s'est attachée à comprendre comment le comportement du conducteur peut affecter la sécurité du système.

Le projet a impliqué l'étude du travail et des environnements de prise d'informations de 400 conducteurs de train de la région de Stockholm. Les conducteurs étudiés concernent des trains de voyageurs, principalement l'équivalent de nos Trains Express Régionaux (TER) ainsi que des trains à grande vitesse X2000

L'un des résultats de ces observations suggère qu'il existe deux styles différents de conduite en terme d'interactions avec le système ATC. Le premier groupe de conducteurs adopte une conduite réactive d'attente d'une indication ou d'une alarme du système ATC avant d'agir.

L'autre groupe adopte un style de conduite active en essayant de planifier leurs conduites en essayant de garder de l'avance (d'ordre temporel) sur le système ATC. Lors d'imprévus le système ATC requiert une conduite active ce qui est difficile pour les conducteurs habitués à la conduite réactive.

ACIH (Analyse des Conséquences de l'Infiabilité Humaine) [VANDERHAEGEN, 2001] est une méthode basée sur deux démarches APRECIH et APOSCIH afin de définir des scénarios d'infiabilité. L'APRECIH se concentre sur l'analyse, à priori, des scénarios d'infiabilité à partir d'une analyse de la tâche. L'APOSCIH se concentre sur une analyse rétrospective des incidents ou des accidents.

La méthode ACIH est basée sur un modèle de comportement d'infiabilité humaine selon trois types de dégradation :

- une dégradation relative à l'acquisition. Il s'agit d'une cause récurrente d'infiabilité dont l'origine est une perception erronée de l'environnement à contrôler ;
- une dégradation relative à la résolution de problèmes. Il s'agit d'une dégradation du traitement de l'information lié à l'élaboration d'un plan d'actions et qui concerne à la fois les traitements erronés d'informations ainsi que les traitements d'informations erronées ;
- une dégradation relative à l'action. On peut distinguer l'exécution d'une action et les conséquences de celle-ci sur le processus. Au regard de son exécution par un opérateur humain, une action est correcte lorsqu'elle correspond à une action requise d'après les informations recueillies quelles que soient leurs qualités. Si l'on s'intéresse aux conséquences, un critère est nécessaire afin de qualifier une action de correcte ou erronée. Une action peut être dangereuse alors que l'opérateur humain qui l'exécute pense qu'elle est correcte.

Le développement d'un outil d'évaluation de la fiabilité humaine commissionné par le RSSB (Rail Safety & Standards Board) [RSSB, 2005] est également un exemple d'étude de la fiabilité humaine. Il concerne le développement de deux éléments :

- un outil d'identification de l'erreur humaine basé sur TRACEr (Technique for the Retrospective and predictive Analysis of Cognitive Errors) ;
- un outil de quantification de l'erreur humaine basé sur la méthode HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique).

L'objectif de cet outil est de permettre aux experts de la sécurité de l'industrie ferroviaire, d'évaluer la fiabilité humaine.

L'approche proposée dans [CHAALI et al, 2007] fait partie d'une étude européenne du projet ModUrban. Elle concerne le développement d'une méthode de prédiction de franchissement de barrière basé sur l'utilité espérée du franchissement et sur la méthode THERP L'utilité espérée est issue du modèle BCD (Bénéfice Coût Déficit) [POLET et al., 2002b] et des probabilités de succès et d'échec du franchissement de barrière. Ces probabilités sont évaluées à l'aide de THERP. L'intérêt d'évaluer ces probabilités est illustré par un exemple ferroviaire de procédure de respect de vitesse. Les probabilités sont évaluées par un outil de Kite Solutions basé sur THERP et utilisant des données du domaine nucléaire. Afin d'avoir des probabilités plus réalistes, il semble important de construire une nouvelle base de données d'erreur humaine dans le système ferroviaire, la conduite automobile ou d'autres industries.

Toutes ces démarches méthodologiques (à l'exception de l'étude du groupe de travail de la RATP qui est une analyse statistique) utilisent une modélisation de l'opérateur humain afin d'aboutir à une évaluation de son activité.

Méthode	Modélisation	Evaluation
Analyse des Conséquences de l'Infiabilité Humaine (ACIH) [VANDERHAEGEN, 2001]	Modèle d'infiabilité	Scénarios de défaillances
Evaluation de la fiabilité humaine [RSSB, 2005]	Modèle générique d'erreur humaine basée sur TRACEr	Probabilité d'erreur basée sur HEART
Modélisation de la performance de conduite [HAMILTON et CLARCKE, 2005]	Modèle d'analyse cognitive de la tâche	Charge de travail Temps d'exécution
Prédiction du franchissement de barrière [CHAALI et al, 2007]	Modèle Bénéfice Coût Déficit	Probabilité de franchissement de barrière basée sur THERP

Tableau 3 : Méthodologies d'analyse de la fiabilité humaine dans la conduite de transport guidé

Ces méthodes reprises dans le Tableau 3 se basent sur une modélisation de l'activité de conduite suivie d'une démarche d'évaluation de la fiabilité humaine ou plus généralement de la performance de conduite. Afin de mettre en place une démarche d'analyse de la performance, il convient de commencer par étudier l'activité de conduite d'un transport urbain guidé. C'est l'objet de la partie suivante qui en présente les principales caractéristiques puis les problématiques propres.

3 *L'activité de conduite*

3.1 Caractéristiques de la conduite de transport urbain guidé

3.1.1 Le système Homme – Matériel – Environnement

L'activité de conduite d'un opérateur humain peut être située dans le système de transport représenté par le trio Homme – Matériel – Environnement à l'image du trio Homme – Véhicule – Environnement utilisé dans les études de la conduite automobile [TODOSKOFF, 1999] Dans le domaine du ferroviaire, le véhicule est désigné par matériel pour matériel roulant.

Dans ce système Homme – Matériel – Environnement représenté par la Figure 12, chacune des trois composantes peut-être à l'origine d'un dysfonctionnement, soit de façon directe, soit au travers de ses interactions avec les deux autres.

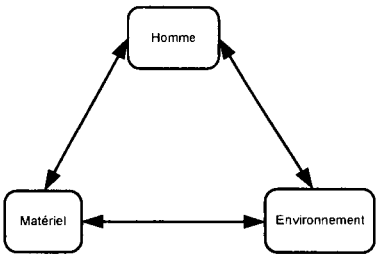


Figure 12 : Le système Homme – Matériel – Environnement

Le premier élément du trio est l'homme. Sa variabilité inter- et intra- individuelle est très importante. En effet, aucun conducteur n'est semblable à un autre. Néanmoins, en comparaison avec l'automobile, les différences inter-individuelles sont moins importantes dans la population de conducteur de transport urbain guidé du fait de la formation professionnelle qu'ils reçoivent et du suivi des performances plus importante que sur la route.

La deuxième caractéristique concerne l'état interne du conducteur. Son importance dans les choix des modes opératoires a déjà été évoquée dans le chapitre 1 (paragraphe 3.3.1). Les différences de l'état interne du conducteur, également appelé différences intra-individuelles, sont fonction de beaucoup de facteurs (stress, motivation ...) qui influent sur le comportement de conduite.

Le dernier élément du trio est le matériel roulant. Ses caractéristiques ainsi que les interactions qu'il possède avec l'homme et l'environnement modifient le comportement de conduite.

Les interactions avec l'homme s'effectuent au travers du poste de conduite. Il s'agit par exemple des alarmes de défaillance de sous-système (le sous-système de freinage par exemple). La fréquence, la gravité et la facilité de résolution de ces défaillances par l'opérateur humain plus ou moins aidé dans cette tâche par des outils embarqués influencera le comportement (et donc la performance) du conducteur.

Enfin l'environnement est défini ici comme tous les autres éléments ne faisant pas partie de l'homme ou du véhicule. A ce titre, on retrouve des éléments faisant partie du système de transport comme la voie, la signalisation mais aussi des éléments extérieurs au système de transport comme les conditions climatiques, d'éclairage ou les interactions avec les autres usagers de la route.

A la différence du trio Utilisateur – Système – Environnement du paragraphe §.2.1.3.1, le trio Homme – Matériel – Environnement se concentre sur l'activité de conduite. Il permet de connaître les interactions que possède l'opérateur humain de conduite. De la même manière que le système de transport a été décrit à travers une décomposition de ses sous-systèmes dans la partie 2.1.2, la prochaine partie a pour but de décrire l'activité de conduite à travers une décomposition fonctionnelle. Celle-ci permettra de mieux comprendre la place qu'occupe l'opérateur de conduite.

3.1.2 Analyse fonctionnelle du métier de machiniste

Si l'on prend l'exemple du tramway, la fonction globale du métier de machiniste (synonyme de conducteur de tramway à la RATP) est celle d'assurer la mission de conduite d'un tramway.

Plus précisément, on peut décomposer cette mission en deux fonctions principales :

- permettre la circulation de la rame,
- permettre aux voyageurs de se déplacer d'un point desservi à un autre.

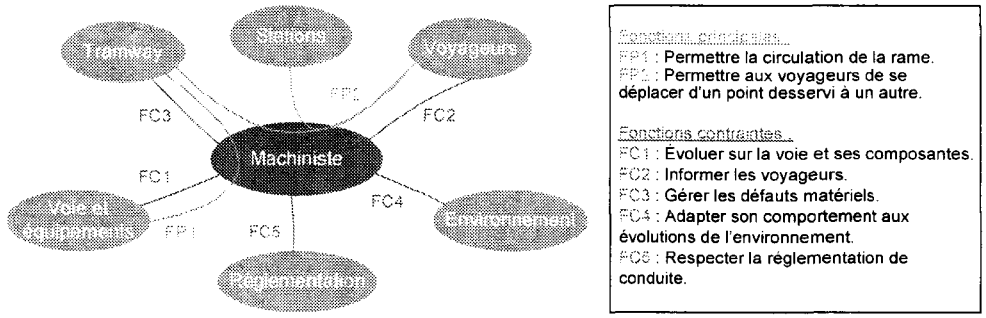


Figure 13 : Diagramme pieuvre d'une analyse fonctionnelle du métier de machiniste

Afin d'assurer cette mission, le machiniste doit s'adapter par rapport aux cinq éléments suivants que l'on retrouve sur la Figure 13 :

- la voie et les équipements sur lesquels il doit évoluer,
- les voyageurs qu'il doit transporter et informer,
- le matériel roulant tramway dont il doit gérer les défauts,
- l'environnement extérieur qui nécessite de réagir régulièrement,
- la réglementation d'exploitation qu'il doit respecter.

.3.1.2.1 La fonction principale : Permettre la circulation de la rame

Elle peut être décomposée en différentes sous-fonctions que sont :

- la préparation et le remisage de la rame (opérations de début et de fin de service),
- le respect et le contrôle de la signalisation,
- la surveillance de la voie et des appareils de voie,
- la régulation de la vitesse
- la gestion des incidents et accidents.

Préparer et remiser une rame

La préparation est obligatoire à chaque sortie du complexe de maintenance en début de service. Ces vérifications ont pour but de sortir avec une rame en parfait état de marche, d'éviter au maximum les pannes et de permettre une bonne exploitation en ligne. Lorsque le

machiniste est amené à garer la rame sur le site commercial, il doit effectuer une dépréparation partielle et impérativement vérifier le bon allumage des feux de garage dans les deux cabines. Le garage sur le site de remisage (en fin de service) doit être effectué conformément aux instructions du matériel roulant et en tenant compte des consignes données par le P.C.L. (Poste de Commande de Ligne qui gère les circulations).

Respecter la signalisation

En ce qui concerne la signalisation, l'article R.110-3 du code de la route indique aux conducteurs de véhicules de transport guidés qu'ils sont tenus de respecter les signaux comportant des prescriptions ainsi que les indications données par les agents réglant la circulation routière.

On distingue :

- la signalisation dédiée aux transports guidés de surface incluant la signalisation lumineuse d'intersection (feux R17, R18g et R18d) et la signalisation limitatrice de vitesse ;
- la signalisation spécifique tramway incluant les plaques indicatrices (zone de commande, zone de manœuvre ...) et la signalisation lumineuse (signaux de position d'aiguille ou de parcours, indicateurs de destination, de service partiel, de coupure courant ...).

Surveiller la voie et les appareils de voie

Le machiniste doit porter une attention toute particulière à la voie, en vérifiant notamment l'absence de corps étrangers ainsi que l'état général du rail.

Le graissage des boudins dont le but est de réduire l'usure roue/rail ainsi que le bruit de crissement doit être commandé par le machiniste :

- en cas de défaillance du SAE (Système d'Aide à l'Exploitation qui informe notamment le conducteur de son avance/retard),
- en cas de passage bruyant en courbe,
- dans les courbes des voies de liaison et des complexes de maintenance.

Le sablage fait aussi partie des actions demandées à l'opérateur en cas de rail glissant.

Réguler la vitesse

La conduite du tramway repose sur le principe de la marche à vue. Le machiniste doit adapter une conduite basée sur la défiance et la prévoyance. Il doit constamment adapter sa vitesse en

fonction de l'environnement et des circonstances afin de minimiser les risques d'incident ou d'accident.

Gérer les incidents et accidents

Le PCL doit être informé de tout incident affectant la sécurité et /ou circulation des tramways. La gestion d'un incident affectant le matériel doit se faire conformément aux instructions du matériel roulant.

.3.1.2.2 La fonction principale : permettre aux voyageurs de se déplacer d'un point desservi à un autre

Elle peut être décomposée en sous fonctions qui concernent :

- la gestion des arrêts,
- l'information des voyageurs,
- la gestion des incidents et accidents.

Gérer les arrêts

En service commercial, l'arrêt est obligatoire à toutes les stations. Le machiniste doit porter une attention toute particulière aux voyageurs se trouvant sur le quai, notamment en présence d'une rame en sens inverse ou d'un manque de visibilité, et doit, au besoin, réduire son allure. Le machiniste doit s'arrêter de manière à ce que toutes les portes de la rame soient au niveau du quai. Il ne doit déverrouiller les portes qu'à l'arrêt absolu de la rame.

La montée et la descente des voyageurs ne doivent s'effectuer, sauf cas particuliers ou consignes de ligne, qu'en station et du côté prévu. Le machiniste contrôle en permanence à l'aide du système de rétrovision (rétroviseurs, caméras, ...) la bonne exécution du mouvement des voyageurs. Les précautions doivent être prises pour éviter que la fermeture des portes occasionne des accidents

La mise en mouvement de la rame ne peut être effectuée que si le timbre de contrôle de fermeture des portes a retenti, si la voie est libre et si rien ne s'y oppose par ailleurs. Après le départ d'une station, il est interdit d'effectuer un nouvel arrêt pour la montée ou la descente des voyageurs.

Lorsqu'une station est située avant une signalisation à feux tricolores, le machiniste doit rester en station, "portes déverrouillées", tant que le franchissement du signal n'est pas autorisé ou annoncé par la signalisation.

Informer les voyageurs

Dans le cadre de sa mission commerciale le machiniste est tenu d'informer les voyageurs présents à bord de sa rame.

L'information des voyageurs à bord d'une rame est nécessaire lors :

- de l'arrivée au terminus pour inviter les voyageurs à descendre,
- de la modification de la mission,
- d'un incident affectant la rame et nécessitant son immobilisation,
- d'incident ayant des répercussions sur l'exploitation normale de la ligne,

Dans le cas d'une immobilisation supérieure à cinq minutes, le machiniste doit tenir régulièrement informé les voyageurs présents à bord de sa rame.

Gérer les incidents et les accidents.

Hormis l'information des voyageurs précédemment explicitée, le machiniste doit assurer la sécurité des voyageurs en cas d'incident. Pour cela, il peut être amené à engager l'évacuation de la rame sur instructions du régulateur du PCL.

.3.1.2.3 Les fonctions de contraintes

Les fonctions de contraintes explicitent la façon dont le conducteur doit s'adapter à son environnement. Cinq fonctions de contraintes peuvent être identifiées :

- évoluer sur la voie et ses composantes,
- informer les voyageurs,
- gérer les défauts matériels,
- adapter son comportement aux évolutions de l'environnement,
- respecter la réglementation de conduite.

Les trois premières fonctions n'ont pas besoin d'être détaillées puisque elles reprennent certaines des sous fonctions identifiées dans la partie précédente.

La troisième fonction de contrainte concerne la manière dont le machiniste doit s'adapter à la réglementation de conduite.

Respecter la réglementation de conduite

Cette fonction indique que le machiniste doit, tout au long de sa mission, respecter la réglementation de conduite. Elle est permise grâce à la mise en place d'une habilitation à la mission de machiniste tramway.

La formation comprend :

- des cours théoriques et pratiques sur les équipements et le matériel roulant,
- des cours théoriques et pratiques sur les consignes de sécurité et les modalités d'exploitation propres à chaque ligne de tramway,
- des cours de conduite en ligne.

L'examen d'habilitation intervient à la fin du stage de formation. Il est composé :

- d'une épreuve théorique constituée d'un devoir sur table avec une double correction,
- d'une épreuve pratique de conduite en ligne sans voyageurs, avec deux évaluateurs.

L'accès à l'épreuve pratique est conditionné par la réussite à l'épreuve théorique. Une commission d'habilitation statut sur l'aptitude à la conduite des tramways avec ou sans voyageurs de chaque candidat.

Chaque habilitation est confirmée à l'issue d'une période probatoire d'un an d'exercice. De plus, les agents habilités sont soumis périodiquement à des séances de formation continue afin de maintenir leurs compétences professionnelles. Une vérification du maintien des compétences est réalisée lors de chaque séance.

Il en ressort un nombre important de consignes données aux machinistes dans l'ensemble des documents portés à sa connaissance lors de la formation (réglementation opérationnelle, instructions matériel roulant ...).
Néanmoins le niveau de détail donné dans chaque consigne varie et permet une forme de variabilité dans l'application qui en est faite. En effet, les consignes relatives à la circulation des rames sont très précises lorsqu'elles abordent le comportement à adopter lors de la manipulation des appareils de voie ou du respect de la signalisation. A l'inverse, une plus grande liberté est donnée lorsque l'on parle de marche à vue.

La dernière fonction de contrainte est celle qui illustre le mieux l'intérêt et la place centrale qu'occupe le machiniste dans la conduite de tramway. Cette fonction exprime les actions attendues par le machiniste dans sa façon de s'adapter aux changements de l'environnement.

Adapter son comportement aux évolutions de l'environnement :

L'environnement de conduite du machiniste tramway est caractérisé par sa dynamique. L'environnement englobe tout ce qui se trouve en dehors du système tramway composé du matériel roulant et de son infrastructure. L'opérateur doit faire face aux changements se produisant au niveau de la météo, des autres modes de transport y compris piétons. De manière régulière et pendant toute sa mission, le machiniste adapte sa conduite aux contextes.

Il est difficile de cibler les consignes applicables par le machiniste afin d'adapter son comportement à son environnement. Néanmoins, l'exemple des consignes hivernales appelées également « plan feuille » peut être pris. Ces consignes ont pour objet de prendre des dispositions préventives et correctives afin traiter le manque d'adhérence induit par la décomposition « des feuilles mortes » sur la surface du rail. Cette décomposition naturelle conjuguée à la pollution forme une pellicule à la surface du rail qui le rend particulièrement glissant. Ce manque d'adhérence provoque des allongements de distance d'arrêt lors de freinages ou de ralentissements en approche des carrefours et peut provoquer des difficultés à gravir des pentes. L'une des solutions utilisée est l'équipement par des sablières qui ont pour objectif d'améliorer l'adhérence. La difficulté provient du fait qu'en cas de dépôt trop important de sable, celui-ci vient s'agglomérer à la pollution. Le bon fonctionnement de ce plan tient donc en partie grâce au comportement du machiniste qui ajuste sa commande des sablières.

Par cette analyse fonctionnelle, on comprend mieux le rôle central qu'occupe l'opérateur humain dans la conduite d'un tramway. Elle permet également de mettre en avant des problématiques propres au tramway comme l'adaptation aux contextes. La prochaine partie de ce chapitre se propose de présenter les problématiques spécifiques à la conduite de transport urbain. Des détails supplémentaires traiteront des problématiques propres à la conduite de tramway puis ce seront les problématiques plus spécifiques au métro qui seront abordées.

3.2 Problématiques de la conduite de transport urbain guidé

3.2.1 La nécessaire adaptation aux changements de contexte

La conduite de transport urbain guidé est une conduite spécifique pouvant présenter plusieurs particularités illustrées ici par l'exemple de la conduite de tramway.

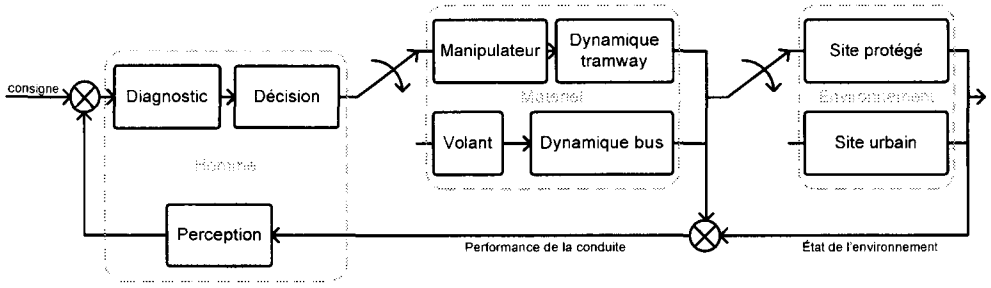


Figure 14 : Exemple de variabilité des contextes de conduite

La Figure 14 présente les différents contextes de conduite auxquels le machiniste est confronté. Le premier de ces changements est celui lié au matériel. Le conducteur de tramway est, dans la majorité des réseaux en France, également conducteur de bus. Il s'agit d'un changement qui requiert toute notre attention, du fait de la différence entre la conduite d'un bus et celle d'un tramway. En effet la trajectoire est modifiable pour le bus, alors que l'on perd le degré de liberté latérale dans le cas du tramway. L'adhérence n'est pas la même avec un contact pneu/route qu'avec un contact fer/fer. Enfin l'inertie est sensiblement différente avec 18 t pour le bus et près de 44 t pour le tramway.

Le deuxième changement est celui du contexte lié à l'environnement. En effet l'une des caractéristiques du système de transport de type tramway est d'utiliser une grande diversité de site d'évolution du site protégé (de type métro) au site urbain (plus proche du bus). Une classification de ces différents types de sites rencontrés est proposée par [KORVE et al., 1996] aux Etats-Unis, en voici les éléments principaux :

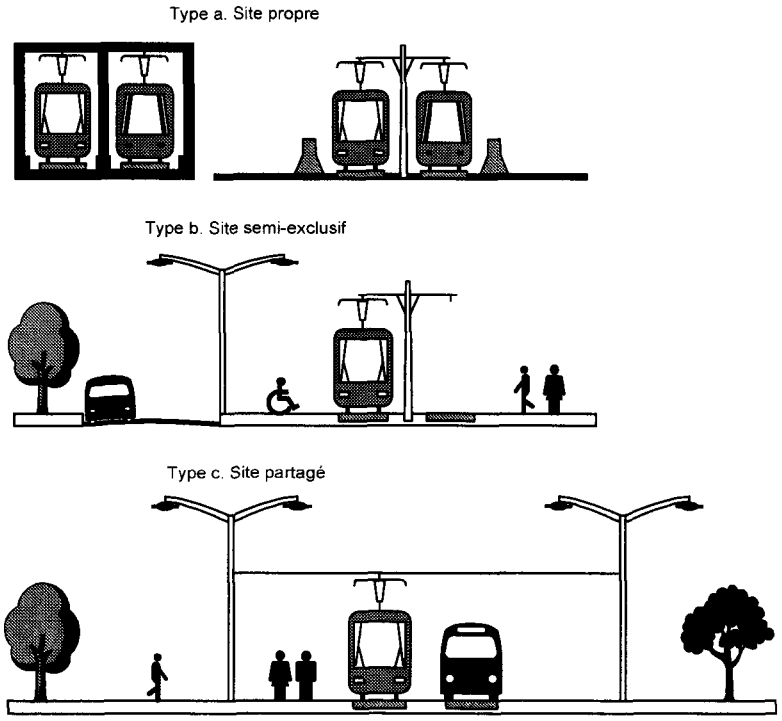


Figure 15 : Classification des types de site d'évolution d'un système tramway

- Type a : Site exclusif utilisant une séparation avec à la fois les véhicules automobiles et les piétons. Ceci a pour conséquence d'éliminer les croisements ainsi que les conflits où seul le matériel évolue. Espace délimité par des barrières de protection infranchissables. Cette configuration inclut les passages en tunnel ou en aérien ;
- Type b : Site semi exclusif utilisant des passages à niveau en nombre limité afin de minimiser les interactions. La vitesse d'exploitation sur ces sites dépend du niveau de protection des passages à niveau. Dans le cas de protection par barrières automatiques, la vitesse pratiquée est plus élevée que pour des croisements protégés uniquement par une signalisation lumineuse. Dans ce deuxième cas, une vitesse d'exploitation élevée n'est permise que sur de courtes distances entre les passages à niveau ;
- Type c : Site partagé où cohabitent plusieurs flux de transport (tramway, automobiles, cyclistes, piétons ...). Ce type de site est donc caractérisé par son niveau important d'interactions entre les modes de transport, ce qui se traduit par un nombre plus important de signalisations et une vitesse d'exploitation faible.

Chacun de ces types de sites d'évolution requiert une conduite appropriée. L'un des objectifs du conducteur passant d'un type de site à l'autre est d'adapter sa conduite aux vitesses consignes spécifiques ou aux niveaux d'interactions avec les autres usagers du site.
Une autre caractéristique importante de la conduite concerne la gestion continue des événements. Cette caractéristique applicable au tramway comme au métro fait l'objet du prochain paragraphe.

3.2.2 La gestion continue des événements

L'objectif de la tâche de conduite est de transporter les voyageurs en toute sécurité d'un point du réseau. Pour ce faire, il est demandé à l'opérateur de surveiller son environnement et de répondre de manière appropriée aux événements. C'est par exemple le cas dans la tâche de surveillance de la voie ou encore de la gestion de la vitesse.

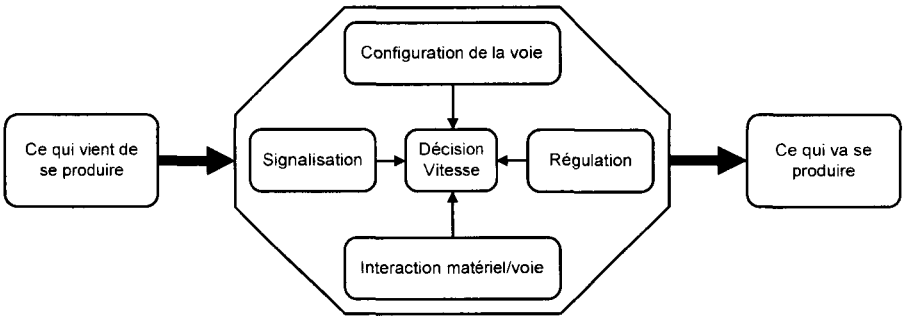


Figure 16 : Représentation de la gestion de la vitesse

L'exemple de la gestion de la vitesse représentée dans la Figure 16 illustre la dynamique au centre de la décision du conducteur. Cette dynamique est influencée par ce qui vient de se produire et par l'anticipation de ce qui va survenir [TERRAL, 2007]. Dans le cas de la vitesse, la décision de l'allure du train s'organise autour d'un but variable selon les conducteurs. Ce but peut être de conduire à la vitesse maximale, avec une marge d'erreur ou même en survitesse. Ce choix est guidé par le conducteur en fonction : de son état interne, d'informations liées à la régulation et de ses préférences de conduite. Cet objectif conditionne le mode de conduite qu'il emploiera et son écart par rapport aux consignes de vitesse. Cette décision sera modulée selon la signalisation, la configuration du tunnel et l'interaction du matériel roulant avec la voie.

3.2.3 Le conducteur face aux évolutions du système

Comme tout système technique, le système de transport évolue. Au cours de sa carrière, le conducteur se doit de s'adapter aux évolutions successives. Ce constat est particulièrement

vrai dans le cas du métro et les deux évolutions présentées dans cette partie l'illustrent parfaitement.

.3.2.3.1 L'automatisation

Plusieurs bénéfices sont mis en avant, quel que soit le réseau concerné, en faveur de l'automatisation [SEGAL, 2007]:

- la fiabilité, celle des systèmes automatiques n'est pas totale mais elle est unanimement considerée comme largement supérieure à celle d'un opérateur humain ;
- l'efficacité, assimilée ici à la capacité à réduire les intervalles entre les trains aux heures de pointe et à accélérer les processus de rotation des trains dans les terminus. Ceci permet, avec un même nombre de matériels roulants, d'offrir davantage de service de transport aux voyageurs se traduisant pour eux par moins d'attente à quai et plus de confort en terme de densité d'occupation des rames ;
- la flexibilité de l'offre, dimension essentielle d'une exploitation de transport répondant aux besoins des voyageurs. Les besoins de déplacement des usagers tendent à se répartir sur des plages horaires beaucoup plus larges, notamment le soir et en fin de semaine.

L'automatisation intégrale constitue l'étape finale d'un processus commencé avec la centralisation des systèmes de régulation des circulations (Poste Central de Commandement - PCC) [IEF, 2004]. Ce changement a d'ailleurs considérablement amélioré la régulation des trains et la résolution des incidents d'exploitation tant sur le plan de la rapidité que de la sécurité. L'évolution s'est poursuivie par la mise en place du pilotage automatique (ATO – Automatic Train Operation).

Les bénéfices présentent néanmoins des ajustements nécessaires, en plus du renouvellement du matériel et des sous-systèmes automatiques. Ces ajustements sont de deux types :

- des ajustements système afin de prendre en compte les autres fonctions de l'opérateur ;
- des ajustements de la part de l'opérateur humain, dans le cas où le processus d'automatisation n'est pas intégral.

Les ajustements système concernent la gestion du transfert de voyageurs quais/trains et la gestion des incidents d'exploitation.

La première de ces fonctions se doit de remplacer le conducteur qui jusqu'alors décidait de fermer les portes, s'assurait de l'absence de danger pour les voyageurs et faisait partir le train. Ceci est résolu le plus couramment par l'installation de portes palières dont la fermeture précède le départ du train. Ce dernier dispositif constitue pour les exploitants la meilleure des solutions, au point qu'ils envisagent aujourd'hui d'en équiper toutes les lignes de métros.
L'autre fonction concerne la gestion des incidents d'exploitation, en particulier sous tunnel. Le traitement en temps réel direct de ces incidents fait appel à un ensemble de compétences techniques et de communication qui font éminemment partie de la formation des conducteurs. Gérer avec sang froid de tels épisodes est d'une importance capitale, qu'il s'agisse de diagnostiquer une panne et de contribuer sur place à sa résolution, ou de reprendre la commande manuelle d'un système automatique défaillant. Contrôler ce risque fait partie des compétences du conducteur. Face à ce risque, il existe plusieurs types de réponses pouvant être ou non combinées :

- la première consiste à mettre en place des systèmes de sécurité supplémentaires afin de traiter une défaillance éventuelle du système ordinaire ;
- la deuxième garde une présence humaine dans le train, au risque de perdre le bénéfice déjà évoqué de la flexibilité de l'offre.

Outre les ajustements système, des ajustements de la part de l'opérateur existent particulièrement dans le cas d'une automatisation partielle. En effet si les automatismes libèrent les hommes d'une part non négligeable des préoccupations de sécurité, en temps réel, ils rendent d'autant plus difficile le respect des règles de sécurité par ces mêmes hommes. En effet ces règles reprennent tout leur poids en l'absence d'automatismes (en terminus ou sur des zones non équipées) ou en cas de défaillance de ceux-ci. L'adaptation qui doit être faite n'est pas une transformation d'une règle en une nouvelle mais plus souvent l'ajout d'une seconde règle ou de cas particuliers.
Parallèlement à cette adaptation, des effets pervers peuvent apparaître. Le conducteur habitué à voir son train s'arrêter tout seul en pilotage automatique devant les signaux fermés peut avoir un temps de réponse plus long avant de freiner en conduite manuelle ou bien même ne plus réaliser qu'il doit freiner. Une autre confusion peut se produire lors du non départ d'un train en Pilotage Automatique (PA) : le conducteur peut croire à une défaillance du système, passer en conduite manuelle et partir alors que simplement un signal était rouge. Grâce au pilotage automatique, le problème du respect des signaux et des vitesses se trouve résolu. Mais en contrepartie, le conducteur n'a plus la pratique de la conduite manuelle. Ceci est à

l'origine d'une règle fixant un minimum de conduite manuelle par jour de conduite. Si la tâche se limite à la simple surveillance des automatismes, l'ennui provoqué peut également être une source d'erreur. Cette constatation pointe une autre évolution de la conduite de transport urbain guidé qui sera traitée dans la partie suivante : l'activité routinière.

.3.2.3.2 Une activité routinière

La monotonie est une caractéristique des transports urbains guidés. On retrouve cet aspect principalement dans les activités de conduite de métro et de RER mais aussi de tramway. Or un facteur essentiel du niveau d'éveil est le degré de sollicitation de l'opérateur par son environnement [TERRAL, 2007].

Le métro est, à ce titre, un environnement ou les variations sont nombreuses mais peu diversifiés. Le bruit de fond et les vibrations émises par le train contribuent à augmenter le temps de réaction des conducteurs [MILLANVOYE, 2004].

Dans ce contexte, la question qui peut se poser est de savoir comment l'opérateur gère cette activité routinière : l'une des réponses est en s'assurant un niveau de vigilance élevé. L'objectif y est de garder une capacité de réaction optimale.

Les incidents permettent de stimuler les conducteurs et de briser la monotonie. Ceux-ci se sentent plus concentrés lorsque la situation s'est dégradée en ligne. Néanmoins si une sollicitation minimum est nécessaire, il faut se prévenir d'une trop forte dose de stimulation. En effet une hyper sollicitation a pour effet de désorganiser l'activité [TERRAL, 2007].

4 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, la description du système de transport à travers une présentation des risques spécifiques et des éléments le constituant a permis d'en comprendre les particularités. La question de la place de l'opérateur humain a été abordée afin de montrer son omniprésence et l'importance de sa prise en compte, comme cela a déjà été évoqué dans le chapitre 1. Cette importance se traduit par un grand nombre de recherche en facteur humain, surtout en ce qui concerne la conduite. Les travaux scientifiques présentés par la suite ont montré l'importance d'avoir un modèle de l'opérateur afin d'en évaluer la fiabilité pour le système.

La nécessité d'obtenir un modèle de l'opérateur humain a justifié l'analyse fonctionnelle du métier de conducteur qui a été effectuée. Celle-ci a permis de comprendre les fonctions et les exigences de la conduite de transport urbain guidé. Parmi les fonctions qui lui sont allouées, la plus pertinente est sans nul doute la capacité qu'il doit mettre en place afin de gérer les événements. Ceci peut se résumer dans le constat suivant [PULAKOS et al., 2000] : les opérateurs ont un besoin croissant d'adaptabilité afin d'être efficaces dans des environnements variés et dynamiques. Cette adaptabilité ainsi que la réactivité constituent l'objet de ce mémoire et se doivent d'être définis. C'est l'objet du chapitre suivant qui va proposer une modélisation de l'adaptation et de la réaction humaines dans l'activité de conduite.

Chapitre 3 : Modélisation et prise en compte de l'adaptabilité et de la réactivité humaines

1 INTRODUCTION **68**

2 L'ADAPTABILITE ET LA REACTIVITE HUMAINES **69**

2.1 L'ADAPTABILITE ET LA REACTIVITE HUMAINES : UNE FORME DE RESILIENCE ? 69

2.1.1 L'adaptation humaine, un exemple de commande adaptative 70

2.1.2 L'homme, un système réactif 72

2.2 MADREH : MODELISATION DE L'ADAPTATION ET DE LA REACTION HUMAINES 73

2.2.1 Une modélisation de la régulation humaine 73

2.2.2 Critères d'identification 76

2.2.3 Configurations de référence et de dérives 77

3 DEMARCHE D'ANALYSE DE L'ADAPTABILITE ET DE LA REACTIVITE HUMAINES **81**

3.1 ETAPE 1 : IDENTIFICATION DE L'ADAPTATION ET DE LA REACTION HUMAINES 81

3.1.1 Principe 81

3.1.2 Démarche à partir d'une base d'incidents 82

3.1.3 Démarche à partir d'un enregistrement des paramètres d'exploitation 84

3.2 ETAPE 2 : IDENTIFICATION DES DERIVES 86

3.2.1 Principe 86

3.2.2 Démarche à partir d'une base d'incidents 86

3.2.3 Démarche à partir d'un enregistrement des paramètres d'exploitation 88

3.3 ETAPE 3 : ANALYSE DE L'ADAPTABILITE ET DE LA REACTIVITE HUMAINES 91

3.3.1 Principe : 91

3.3.2 Exemple 91

4 CONCLUSION **93**

Chapitre 3 : Modélisation et prise en compte de l'adaptabilité et de la réactivité humaines

1 Introduction

Les précédents chapitres ont soulevé la problématique de la faiblesse actuelle des méthodes d'analyse des risques pour prendre en compte la contribution de l'opérateur humain dans le système. Celle-ci s'avère être à la fois source de fiabilité ou d'erreur. Elle se manifeste d'autant plus dans la conduite de transport urbain guidé car le conducteur fait face à de nombreux changements (changements de vitesse consigne, de l'état de la signalisation, de modes de conduite ...). Le travail de recherche, présenté dans ce chapitre, a pour but de proposer une modélisation associée à une démarche innovante d'analyse de l'adaptabilité et de la réactivité humaines pour la prise en compte de l'opérateur de conduite de transport urbain guidé.

Dans la première partie les concepts d'adaptabilité et de réactivité humaines seront présentés. Pour chacun d'entre eux, un parallèle est effectué entre la définition applicable aux systèmes techniques et celle pour un opérateur humain. Cette partie sera aussi l'occasion de situer les concepts d'adaptabilité et de réactivité humaines par rapport au concept de résilience. Enfin une modélisation de l'adaptation et de la réaction sera proposée.

La deuxième partie se concentrera sur la démarche d'analyse de l'adaptabilité et la réactivité, objet de l'étude de ce mémoire. Cette démarche articulée autour de trois étapes vise à analyser le comportement de l'opérateur humain de conduite et l'influence de ce comportement pour le système de transport. De plus, des exemples issus de la conduite de transport urbain guidé permettront d'illustrer les différentes étapes de cette démarche.

2 *L'adaptabilité et la réactivité humaines*

2.1 L'adaptabilité et la réactivité humaines : une forme de résilience ?

On distingue dans le contrôle de processus deux types de stratégie [CELLIER, 1996]. Une stratégie réactive qui se manifeste par une réponse à des évènements particuliers, au fur et à mesure de leur apparition et une stratégie anticipative qui consiste à prédire des situations pour agir en conséquence. Ceci conforte, par exemple, les observations effectuées dans la conduite de transport guidé, notamment dans le projet TRAIN [KECKLUND, 2001]

Le concept de résilience est abordé dans différentes communautés scientifiques [VANDERHAEGEN, 2008] : en psychologie ou en psychiatrie [GOUSSE, 2005], en science des organisations [WEICK et al., 1999] [TILLEMENT et al., 2008], en économie, en biologie [MARTIN, 2005], [ORWINA et WARDLE, 2004], [PEREZ-ESPANA et ARREGUIN-SANCHEZ, 2001], en informatique [CHEN et al., 2007] [NAKAYAMA et al., 2007] [LUO et YANG, 2002], en automatique [NUMANOGLU et al., 2006] [ZIEBA et al., 2007].

Il est lié à différentes théories :

- en psychologie ou psychiatrie, ce concept apparaît en théorie de l'invulnérabilité, i.e. capacité à résister à un traumatisme;
- 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 ;
- en science des organisations, c'est la capacité de retrouver un nouvel équilibre acceptable.

En 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 perturbations externes. Celles-ci peuvent être un choc physique ou psychologique, une erreur, une faute ou une violation. On peut ainsi parler de résilience aux fautes ou aux erreurs ou de robustesse. D'une manière générale, le concept de résilience est décrit comme l'habileté intrinsèque d'un système à maintenir ou à retrouver rapidement un état stable lui permettant de continuer son processus pendant et après une mésaventure majeure ou en présence d'un stress continu [WREATHALL, 2006]

Dans notre étude qui porte sur la conduite de transport urbain guidé, on considère que la résilience du système Homme Machine est permise notamment par les capacités d'adaptabilité et de réactivité humaines. La suite de cette partie va s'attacher à définir ces deux capacités en commençant par situer l'adaptation et la réaction humaine par rapport aux concepts de la communauté en informatique et automatique.

2.1.1 L'adaptation humaine, un exemple de commande adaptative

En automatique, le terme « adaptation » est relatif à la problématique de la commande adaptative, dont la Figure 17, ci-dessous, en représente le principe général. Par rapport au principe de contre-réaction d'un système, la nouveauté est d'introduire une seconde boucle de régulation où la grandeur régulée est un critère de performance du système. La principale différence entre une commande classique à boucle de réaction et une commande adaptative est que la première permet de réduire l'effet des perturbations sur les variables à réguler alors que la seconde permet de réduire l'effet des perturbations sur les paramètres du système. La comparaison entre la mesure de la performance et la performance désirée permet, soit d'ajuster le contrôleur, soit de fournir un signal de commande directement au processus.

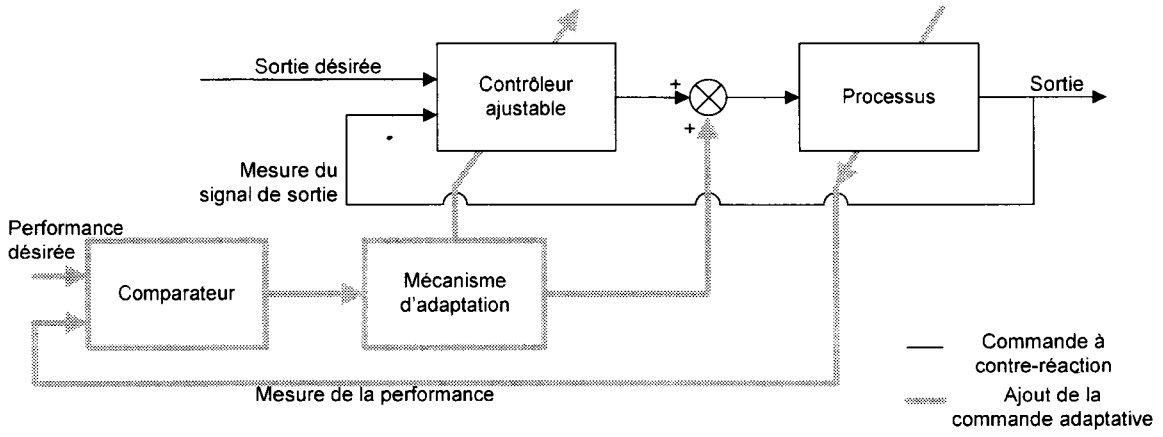
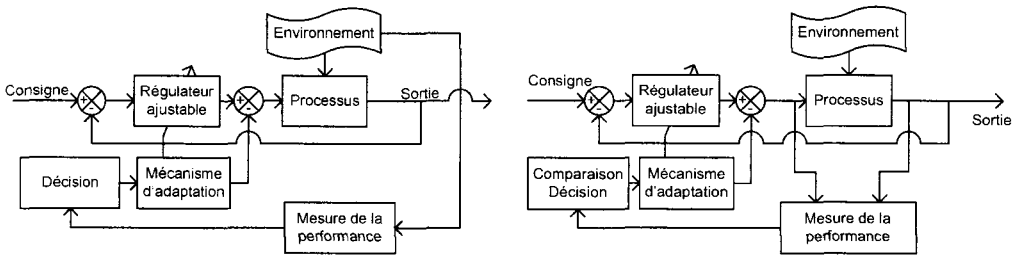


Figure 17 : Principe de la commande adaptative (Landau & Dugard, 1986)

Les différents types de commande adaptative peuvent être classés suivant la méthode utilisée pour mesurer la performance (cf. Figure 18). En boucle ouverte, la mesure de la performance est effectuée sur l'environnement de manière indirecte (ce qui suppose une relation connue entre une variable d'environnement et la performance du système). C'est le type de commande

adaptative le plus simple mais aussi le plus vulnérable. En effet, elle est fonction de la qualité de la relation entre l'observation de l'environnement et la performance. En boucle fermée, par contre, la mesure de la performance est faite par une phase d'identification à partir des entrées et sorties du système. Ce type de commande adaptative permet de prendre en compte la moindre variation dans le système, quelle que soit son origine. La différence entre les deux types de commande adaptative se situe donc dans la manière de mesurer la performance.



Boucle ouverte Boucle fermée

Figure 18 : Commande adaptative en boucle ouverte ou en boucle fermée

Le parallèle que nous faisons entre la commande adaptative et l'adaptation humaine est structurel à l'image du parallèle fait entre commande adaptative et répartition dynamique de tâche implicite dans [DEBERNARD, 1993]. Cette approche permet de cerner les objectifs et contraintes de fonctionnement du mécanisme d'adaptation. L'adaptation humaine peut être rapprochée de la commande adaptative en boucle fermée. Dans notre cas, le régulateur ajustable est l'opérateur humain. Le mécanisme d'adaptation agit par choix des modes opératoires avec comme objectif la régulation d'un critère de performance retenu (sécurité, disponibilité, qualité, charge de travail ...etc).

Dans le cas de la conduite d'un système de transport (cf. Figure 19), l'opérateur va donc avoir en entrée une consigne ainsi qu'un niveau de performance désiré en terme de sécurité, disponibilité, ... La commande s'effectue sur le véhicule qui évolue au sein du système de transport. Enfin, l'environnement est constitué de l'ensemble des éléments extérieurs au véhicule qui influencent son évolution. L'environnement (les autres flux de transport par exemple) est à ce titre une perturbation. Elle vient modifier la sortie du système véhicule de manière indépendante de la commande appliquée en entrée.

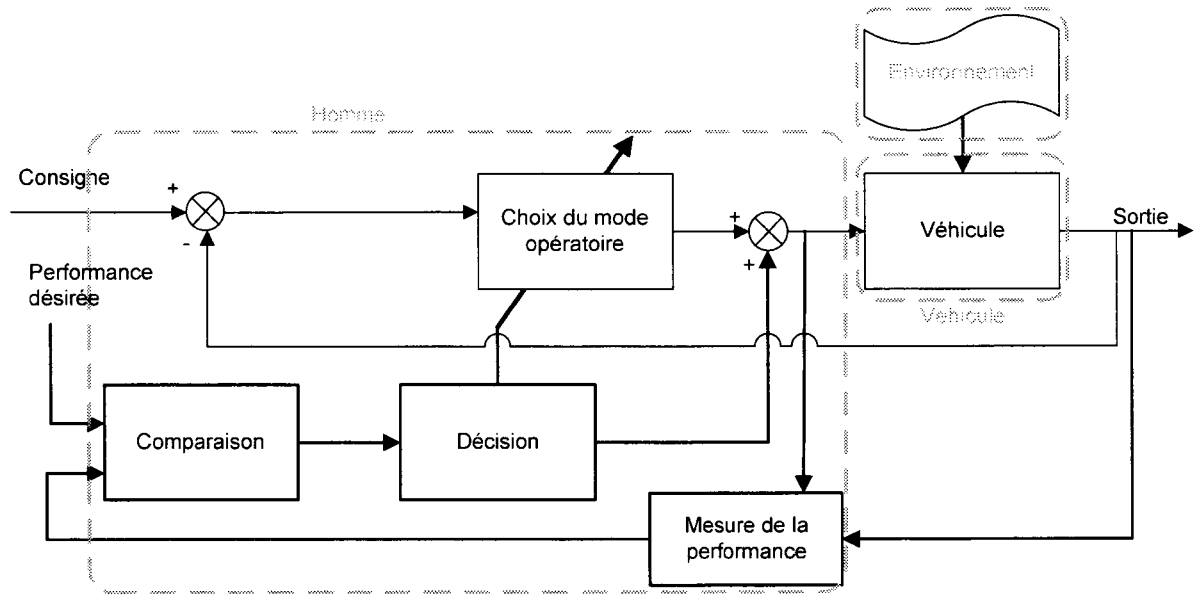


Figure 19 : Commande adaptative dans la conduite d'un système de transport

L'autre caractéristique de l'opérateur de conduite concerne sa réaction aux changements dans le système de transport. Dans la suite de ce chapitre, la réaction humaine est rapprochée des systèmes réactifs en informatique industrielle et de la réactivité des systèmes de production.

2.1.2 L'homme, un système réactif

[HAREL et PNUELI, 1985] proposent le terme de « système réactif » dans le cadre d'une dichotomie des systèmes complexes. La distinction est faite entre les systèmes dits transformationnels et les systèmes réactifs. Ces derniers sont décrits comme ne pouvant pas être uniquement descriptibles par des relations entre des sorties et des entrées (systèmes combinatoires), mais plutôt par des liens entre sorties et entrées via leurs combinaisons possibles dans le temps (systèmes séquentiels). Le terme de réactivité peut aussi qualifier un système de production. Dans ce domaine, un système réactif est capable de répondre dans un temps requis aux changements ou à une excitation de son environnement interne ou externe (aléa, situation nouvelle, perturbation, sollicitation,...) par rapport au régime permanent [AFGI, 1991].

Dès lors, la caractéristique principale d'un système réactif réside dans sa capacité à maintenir une relation constante avec son environnement. Cette relation va consister à être capable de répondre aux stimuli de l'environnement. On retrouve ici un point essentiel de la conduite de transport déjà évoqué dans le chapitre précédent. L'opérateur de conduite maintient une

attention permanente sur son environnement et doit réagir aux stimuli de son environnement en y répondant par l'application rapide des actions appropriées.
Par analogie avec les définitions présentées, on peut donc qualifier l'opérateur humain de conduite comme un système réactif. La réactivité humaine est ainsi définie comme la capacité à effectuer des actions répondant à l'apparition de conditions nouvelles.

Maintenant que le point a été fait sur ce que cette étude définit comme l'adaptabilité et la réactivité humaines et comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, une démarche d'analyse de la fiabilité humaine requiert une modélisation. C'est l'objet de la prochaine partie de ce chapitre qui introduit la modélisation de l'adaptation et de la réaction humaines.

2.2 MAdRéH : Modélisation de l'Adaptation et de la Réaction Humaines

2.2.1 Une modélisation de la régulation humaine

Afin de proposer une modélisation des comportements engendrés par les processus d'adaptation et de réaction, il est intéressant de replacer ces concepts dans la trame explicative mise en place par Rasmussen [RASMUSSEN et al., 1981]. Dans son modèle, il considère le comportement de régulation selon trois niveaux (Cf. Figure 21) :

- la régulation par des connaissances conceptuelles (KB : Knowledge-Based), fondée sur la mise en œuvre de procédures interprétatives déterminées à partir de connaissances de l'opérateur. Ce niveau de contrôle est observé dans des situations de résolution de problème, très coûteuses en ressources attentionnelles ;
- la régulation par les règles (RB : Rule-Based), fondée sur l'utilisation de règles d'action déjà élaborées, dont le déclenchement s'appuie sur une observation du système permettant l'identification de son état ;
- la régulation par les automatismes (SB :Skill-Based), faisant l'économie d'un contrôle attentionnel, en exploitant des signaux (configurations perceptives directement liées à l'action). Ce niveau de contrôle s'appuie sur des routines peu coûteuses en ressources attentionnelles ;

Par rapport aux définitions précédentes de l'adaptabilité et de la réactivité, on peut situer l'adaptation et la réaction humaines dans la trame de Rasmussen. La réaction est bien une action à court terme face à un besoin de rapidité de la réponse. L'adaptation est une action à plus long terme nécessitant une étape de diagnostic ce qui exclut le niveau des automatismes.

C'est pourquoi, l'adaptation se situe au niveau des comportements basés sur les connaissances. Alors que la réaction se situe plutôt au niveau des comportements basés sur les automatismes. Au niveau intermédiaire des comportements basés sur les règles, les deux types de comportements adaptatifs / réactifs cohabitent.

Comme évoqué dans le chapitre 2, la conduite de transport urbain guidé nécessite des capacités d'adaptation et de réaction par rapport aux changements à gérer. Plus précisément, il est possible d'utiliser la modélisation dérivée de Rasmussen afin d'examiner les ressources mobilisées dans la conduite d'un système de transport urbain guidé.

Ces ressources sont celles acquises lors de la formation afin d'obtenir l'habilitation de conduite (à la fois dans la partie théorique et pratique). Dans la Figure 20, on note que ces ressources sont de trois types :

- les connaissances de la ligne et du matériel. Il s'agit des connaissances particulières sur le système que possède l'opérateur. Celles-ci vont lui servir à prendre des décisions afin de s'adapter à des changements de contexte éventuellement non prévus ;
- la réglementation opérationnelle. Il s'agit de l'ensemble des procédures applicables dans la conduite. La structure de ces procédures, du type SI ... ALORS ..., permet de répondre à des changements connus ;
- les automatismes de conduite. Il s'agit de l'ensemble des actions de type réflexes principalement acquises lors de la formation pratique à la conduite et lors de l'expérience des premiers mois de conduite .

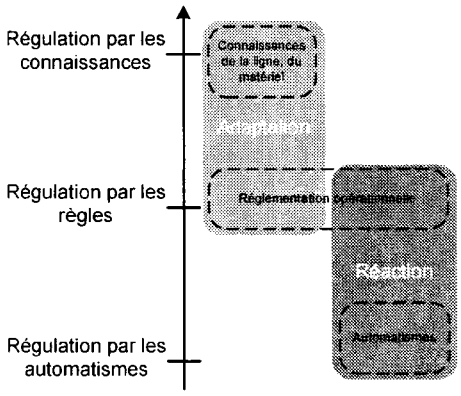


Figure 20 : Modélisation MAdRéH appliquée à la conduite de transport urbain guidé

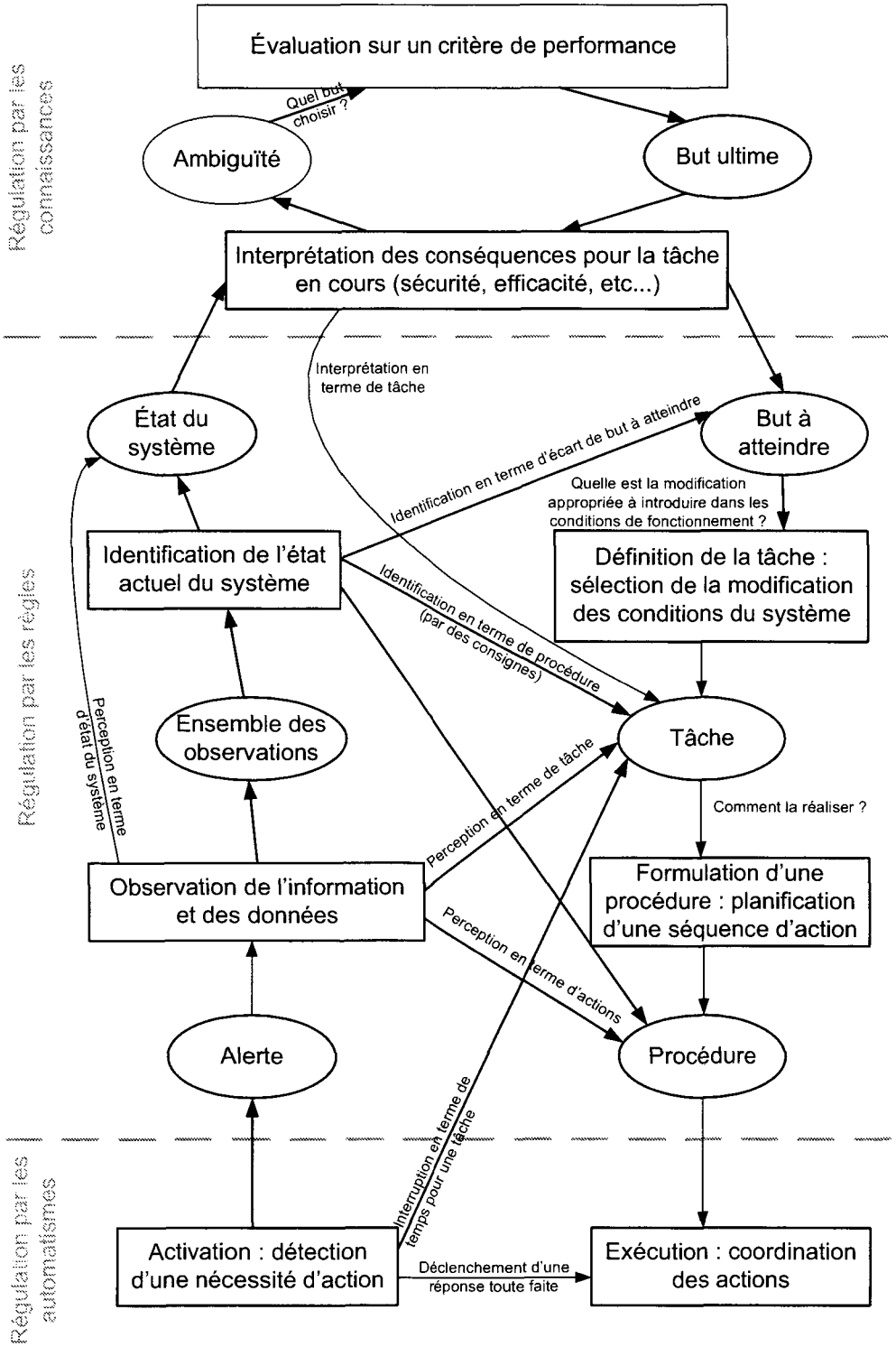


Figure 21 : Modèle de résolution de problèmes [RASMUSSEN et al., 1981]

2.2.2 Critères d'identification

Cinq caractéristiques sont présentées dans le Tableau 4 afin de différencier adaptation et réaction. Elles découlent des paragraphes précédents mettant en parallèle adaptabilité et réactivité respectivement avec la commande adaptative et les systèmes réactifs.

		Adaptation	Réaction
C1	Horizon temporel	Long terme	Court terme
C2	Récupération de l'action	Oui	Non
C3	Coût en terme de ressources attentionnelles	Elevé	Faible
C4	Anticipation du changement	Oui	Non
C5	Fréquence des changements	Faible	Elevée

Tableau 4 : Critères d'identification de l'adaptation et de la réaction humaines [QUEVA et al. 2007]

L'adaptation répond à un objectif temporel d'actions à long terme alors que la réaction s'effectue dans un délai à court terme. En effet, la mesure de la performance du système dans le cadre de l'adaptation place celle-ci dans des objectifs de niveau stratégique. A l'opposé, la réaction est une réponse, de niveau opérationnel, à un stimulus.

L'adaptation implique la notion de récupération, ce qui n'est pas le cas pour la réaction car l'opérateur n'a pas le temps pour récupérer son action.

En terme de ressources attentionnelles, l'adaptation va être plus coûteuse, car elle va faire appel à des comportements impliquant plus d'activités cognitives.

L'adaptation est vue comme une démarche d'anticipation alors que la réaction va se situer autour d'une démarche de protection plus ponctuelle.

Enfin, concernant la fréquence des changements rencontrés, l'adaptation s'effectue par rapport à des changements rencontrés peu souvent alors que la fréquence des changements demandant de la réaction est plus élevée.

L'exemple qui illustre ces caractéristiques concerne la gestion de la vitesse dans la conduite d'un tramway lors du passage d'une zone piétonne [QUEVA et al., 2006a]. Dans ce cas, le changement à gérer par le machiniste est le changement de site d'évolution.

Deux types de comportement peuvent être envisagés. Le premier type de comportement est qualifié d'adaptatif. Le conducteur va anticiper le passage de cette zone en adaptant sa vitesse à la possibilité de survenue d'un piéton sur la plateforme (espace d'évolution du tramway

assurant le passage du gabarit). Avec ce comportement, il pourra ajuster sa vitesse aux circonstances rencontrées. Dans le deuxième type de comportement qualifié de réactif, la stratégie adoptée n'utilise pas d'anticipation. Le machiniste gère les événements à court terme en réagissant (par un freinage important) à l'apparition d'un piéton. Il est clair que dans cette situation, la récupération n'est pas possible du fait de la dynamique de la situation.

2.2.3 Configurations de référence et de dérives

La modélisation que l'on trouve sur la Figure 20 correspond à une situation de référence qui nécessiterait de la part de l'opérateur à la fois de l'adaptation et de la réaction. Ce constat issu d'observations de terrain sur plusieurs réseaux de tramway français et européens [QUEVA, 2006] est généralisé à l'ensemble de la conduite de transport urbain guidé.

Afin de pouvoir évaluer par la suite la fiabilité humaine et par extension la performance conduite, la modélisation proposée doit, dans un premier temps, faire apparaître ce que requiert une tâche de conduite donnée en terme d'adaptation et de réaction. Trois cas de figure sont identifiés, ces configurations appelées configurations de référence sont reprises dans la Figure 22.

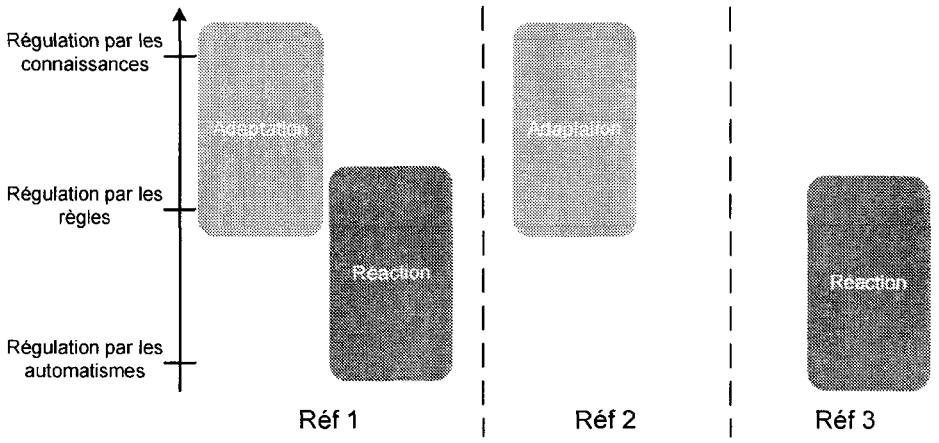


Figure 22 : Configurations de référence du modèle MAdRéH

Dans la configuration Réf 1, la tâche nécessite de l'adaptation et de la réaction humaines. Dans la configuration Réf 2, seule l'adaptation est nécessaire pour accomplir la tâche demandée et enfin, dans la configuration Réf 3, seule la réaction est nécessaire à la tâche.

La question est maintenant de savoir si les actions réelles de l'opérateur de conduite s'inscrivent ou non dans ces configurations. On l'a vu dans le chapitre 1 § 3.3.2, l'opérateur peut se détourner des modes normaux et utiliser des modes ajoutés ou détournés. Dans la modélisation proposée, ces différents modes apparaissent sous la forme de dérives.

Une dérive est définie comme un positionnement de l'adaptation et de la réaction qui diffère de la configuration de référence associée à la tâche. La notion de dérive ne doit pas être considérée comme une évaluation de la qualité des actions du conducteur. En effet, si l'on prend la fiabilité du système comme critère, une dérive peut être une source d'erreur ou au contraire de fiabilité. Une liste des types de dérives est présentée dans les trois figures suivantes.

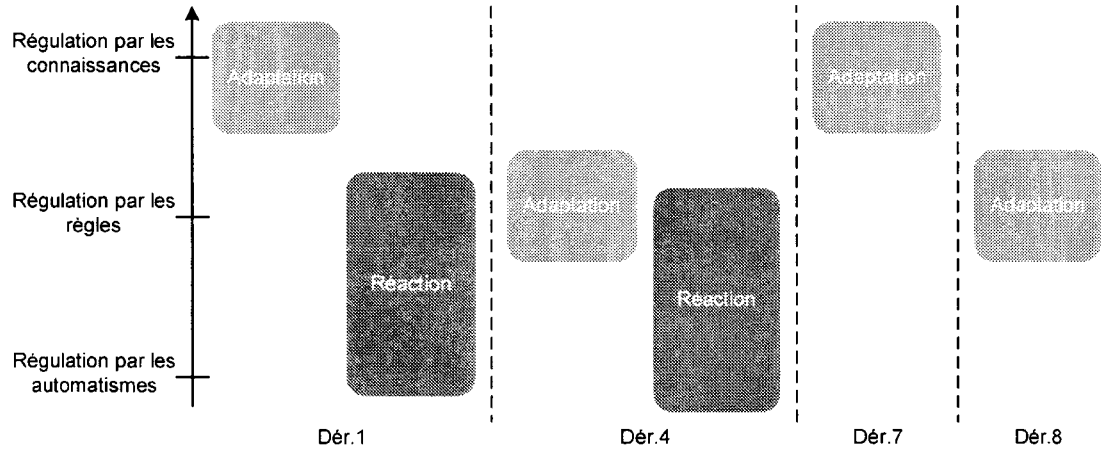


Figure 23 : Dérives de l'adaptation

Les premiers types de dérives résultent d'une modification seule du positionnement de l'adaptation, celles-ci apparaissent dans la Figure 23.

La dérive Dér.1 illustre le cas où l'opérateur ne s'adapte plus en fonction des règles mais à partir de connaissances acquises. Ce comportement peut être source de fiabilité pour le système (par exemple l'opérateur s'adapte à un mode dégradé non prévu) mais il peut également être source d'erreur (par exemple l'opérateur anticipe de manière erronée l'état d'un signal).

La dérive Dér.4 correspond à un manque de connaissance sur la ligne ou sur le matériel qui entraîne une adaptation basée uniquement sur la régulation par les règles

La dérive Dér.7 est, comme la dérive Dér.1, une dérive relative à une adaptation s'effectuant uniquement à partir de connaissances acquises (et potentiellement erronées). Elle est par contre relative à une gestion du changement effectuée uniquement avec l'adaptation.

Enfin la dérive Dér.8 est également à rapprocher de la dérive Dér.4. Par contre, comme la dérive Dér.7, elle implique une gestion du changement avec la seule adaptation.

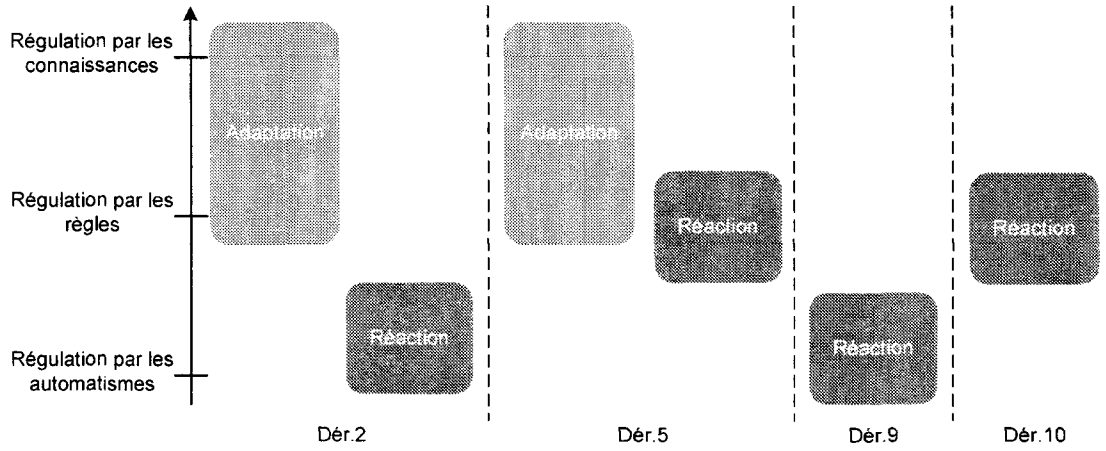


Figure 24 : Dérives de la réaction

Dans la Figure 24, sont présentées les dérives qui sont la conséquence d'une modification seule du positionnement de la réaction.

La dérive Dér.2 illustre le cas où l'opérateur ne s'adapte plus en fonction des règles mais à partir d'automatismes. Ce comportement peut être source de fiabilité pour le système (par exemple l'opérateur réagit à un danger immédiat) mais il peut également être source d'erreur (par exemple l'opérateur franchit un signal sans vérifier son état).

La dérive Dér.5 correspond à un manque d'automatisme lié à la conduite ce qui entraîne une réaction basée uniquement sur la régulation par les règles.

La dérive Dér.9 est, comme la dérive Dér.2, une dérive relative à une réaction s'effectuant uniquement à partir d'automatismes de conduite. Elle est, par contre relative, à une gestion du changement effectuée uniquement avec la réaction.

Enfin la dérive Dér.10 est également à rapprocher de la dérive Dér.5. Par contre, comme la dérive Dér.9, elle implique une gestion du changement avec la seule adaptation.

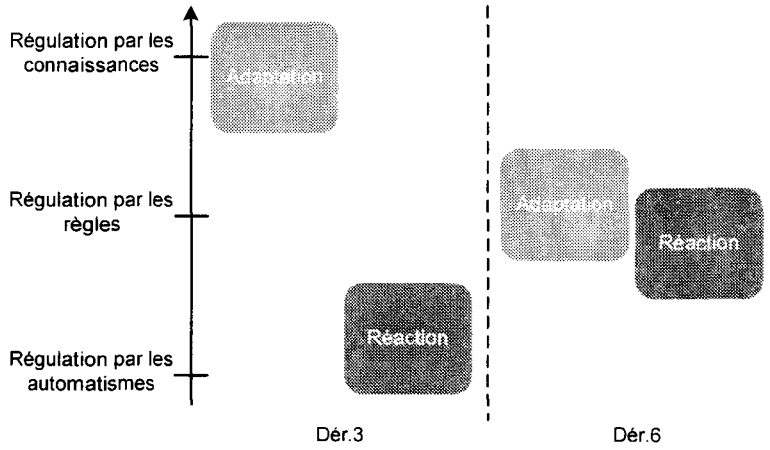


Figure 25 : Dérives de l'adaptation et de la réaction

La Figure 25 présente les deux types de dérive qui sont la conséquence d'une modification du positionnement à la fois de l'adaptation et de la réaction.

La dérive Dér.3 correspond à un opérateur utilisant un automatisme basé sur une connaissance acquise. Dans ce type de dérive, la régulation par les règles n'est plus du tout sollicitée. Un exemple de ce type de comportement peut être un opérateur qui freine trop tardivement (réaction basée sur des automatismes) afin d'attendre au maximum l'ouverture d'un signal (adaptation basée sur une connaissance – l'ouverture prochaine du signal –).

La dérive Dér.6 correspond à une absence d'automatisme associée à un manque de connaissance du matériel et/ou de la ligne. Dans ce type de dérive, seule la régulation par les règles est sollicitée, ce qui n'empêche pas les erreurs. Un exemple de ce type de comportement peut-être un opérateur qui apprécie mal l'emplacement d'un signal (manque de connaissance de la ligne) et freine tardivement (absence d'automatisme).

Maintenant qu'une modélisation du comportement humain, prenant en compte adaptabilité et réactivité humaines, est disponible ; la question de leurs prises en compte dans l'analyse de la conduite se pose. C'est le sujet de la prochaine partie qui va définir une démarche d'analyse de l'adaptabilité et de la réactivité humaines.

3 Démarche d'analyse de l'adaptabilité et de la réactivité humaines

La démarche d'analyse de l'adaptabilité et de la réactivité humaines proposée dans cette deuxième partie de chapitre se base sur le modèle MAdRéH. Elle se compose de trois étapes comme le présente la Figure 26, il s'agit de :

- l'identification de l'adaptation et de la réaction humaines ;
- l'identification de dérive ;
- l'analyse de la réactivité et de l'adaptabilité humaines.

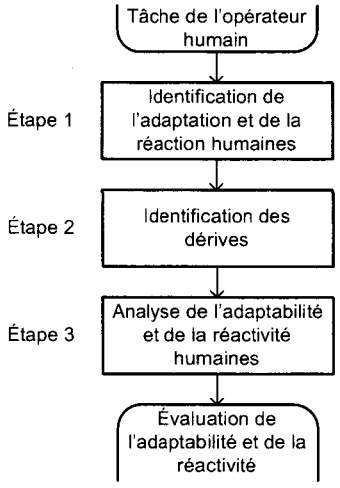


Figure 26 : Démarche d'évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité humaines

En entrée de cette démarche, on a bien sûr une tâche allouée à l'opérateur humain. L'objectif est d'obtenir, après les trois étapes, une évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité humaines dans l'optique d'analyser le risque ou plus globalement la performance d'un conducteur de transport urbain guidé.

3.1 Etape 1 : Identification de l'adaptation et de la réaction humaines

3.1.1 Principe

A partir d'une tâche de l'opérateur de conduite répondant à un changement, cette étape consiste à identifier la configuration de référence correspondante. Cette configuration représente ce qui est demandé à l'opérateur en terme d'adaptation et/ou de réaction afin d'effectuer la tâche donnée. A l'issue de cette étape, on obtient l'une des trois configurations présentées dans la Figure 22.

Deux démarches permettent de déterminer la configuration de référence associée à une tâche de l'opérateur. Le choix de la démarche dépend des données disponibles. La suite de cette partie détaille chaque démarche propre aux bases d'incidents ou aux enregistrements des paramètres d'exploitation. Chacun des ensembles de données est d'abord défini afin d'en comprendre l'intérêt et le contenu précis.

3.1.2 Démarche à partir d'une base d'incidents

.3.1.2.1 Définition d'une base d'incidents

Une base d'incidentologie est un ensemble de données, souvent issues d'un retour d'expérience, rassemblant des incidents. La base se présente sous la forme d'un ensemble de variables ayant pour but de décrire l'incident. Dans certains cas, l'événement est associé à des informations complémentaires permettant d'en savoir plus sur les circonstances ayant amené l'incident ou sur les mesures prises par la suite.

Dans notre cas, l'avantage de ce type de données est de pouvoir accéder, lorsque c'est possible, aux propos du conducteur décrivant l'incident. Les explications de l'opérateur associées aux données décrivant le contexte sont riches en information sur le comportement de l'opérateur de conduite.

.3.1.2.2 Principe

L'identification de l'adaptation et de la réaction humaines permet de déterminer pour chacun des incidents, quel est le comportement qui aurait du être appliqué. A partir d'une base d'incidents, il est difficile d'obtenir une évaluation des critères proposés (Cf. Tableau 4) pour différencier adaptation et réaction. Il est donc nécessaire d'utiliser les éléments fournis par la Figure 20 qui présente les ressources que l'opérateur sollicite afin d'effectuer une tâche de gestion d'un changement. A partir de la base d'incidents, la démarche appliquée pour ces ressources, est basée sur les réponses à trois questions :

Q1 : la tâche nécessite-t-elle l'utilisation de connaissances sur la ligne ou sur le matériel ?

Q2 : la tâche nécessite-t-elle l'application de la réglementation opérationnelle ?

Q3 : la tâche nécessite-t-elle l'utilisation d'automatismes de conduite ?

A partir de réponses à chacune de ces questions, il est possible de connaître la configuration en les reportant dans le Tableau 5. Dans celui-ci, on trouve les différentes réponses aux questions Q1, Q2 et Q3 ainsi que les configurations de référence correspondantes. La

première information donnée par ce tableau est que la réponse à la question Q2 ne peut être que positive. En effet, l'application de réglementation opérationnelle est requise pour toute tâche de conduite. Dans le cas contraire, il ne s'agit pas d'une tâche devant être gérée par l'opérateur de conduite et l'étude de son adaptabilité et de sa réactivité n'a pas de sens. La configuration Réf. 1 est obtenue pour une réponse positive à chacune des trois questions. Réf. 2 et Réf. 3 correspondent à deux réponses positives sur les trois questions. Enfin la dernière combinaison appelée HRéf ne fait pas partie des configurations fournit par MAdRéH. Elle illustre une tâche nécessitant seulement l'application de la réglementation sans connaissances particulières sur la ligne ou le matériel et sans l'utilisation d'automatismes. Ce type de tâche n'est pas étudié dans notre démarche puisqu'elle n'implique pas, selon MAdRéH, d'adaptation ou de réaction humaines.

Questions		Réponses			
Q1	Connaissance ligne et matériel	Non	Non	Oui	Oui
Q2	Application de la réglementation	Oui	Oui	Oui	Oui
Q3	Utilisation d'automatismes	Non	Oui	Non	Oui
	Configuration de référence	HRéf	Réf.3	Réf.2	Réf.1

Tableau 5 : Correspondance des réponses et des configurations de référence

.3.1.2.3 Exemple d'application

L'application de la démarche à une base d'incidents est illustrée par l'exemple suivant concernant l'étude d'une base d'incidents de survitesse. Les données fournies par la base, dont la description du contexte et les explications éventuelles du conducteur, permettent de décrire l'événement de la façon suivante.

Le conducteur laisse son train prendre de la vitesse en pente. Il n'anticipe pas le TIV suivant (Tableau Indicateur de Vitesse) et le freinage tardif qui en résulte n'est pas suffisant. Une survitesse est effectuée. (Exemple tiré de [TERRAL, 2007])

Dans cet exemple, le changement étudié est celui de la vitesse consigne donnée par le TIV. Les réponses au trois questions sont les suivantes :

- Q1 : Oui, la connaissance de la ligne est nécessaire car le TIV est placé à la suite d'une pente et son anticipation est nécessaire.
- Q2 : Oui, l'application de la réglementation opérationnelle est nécessaire afin d'appliquer l'action correcte à l'information fournie par le TIV ;

- Q3 : Non, l'utilisation d'automatismes de conduite n'est pas nécessaire. En anticipant le TIV et en appliquant la nouvelle consigne, l'opérateur gère correctement le changement de vitesse consigne.

En reportant ces réponses dans le Tableau 5, on obtient pour cet exemple, une configuration de référence de type Réf 2. C'est-à-dire une gestion du changement utilisant l'adaptation uniquement.

3.1.3 Démarche à partir d'un enregistrement des paramètres d'exploitation

.3.1.3.1 Définition d'un enregistrement des paramètres d'exploitation

Un enregistrement des paramètres d'exploitation (EPE) fait référence au système d'enregistrement des paramètres d'exploitation et des événements de conduite qui équipent les matériels roulants depuis le début des années 90. Ce système est destiné, dans le cas du métro, à remplacer les bandes enregistreuses papier installées dans les chrono tachygraphes sur lesquelles sont enregistrées des informations dont le faible nombre ne correspond plus au besoin de l'exploitant. Ce nouveau système utilise des technologies informatiques permettant d'avoir accès à un nombre important d'informations et peut ainsi satisfaire le double objectif suivant [IEF, 2005] :

- retracer chronologiquement avec précision et fidélité les circonstances d'un accident ou d'un incident ;
- analyser avec précision et de manière ciblée les gestes et anomalies de conduite en vue d'un retour d'expérience et d'un suivi individuel des conducteurs.

Le système d'Enregistrement des Paramètres d'Exploitation enregistre des informations résultant de gestes de conduite ainsi que celles qui apparaissent au cours de la marche d'un train (heure, vitesse, espace, freinage d'urgence, etc.). Ces informations sont ensuite visualisées et restituées sous une forme appropriée pour être analysées. Ces enregistrements présentent l'avantage de fournir suffisamment de données afin d'utiliser les critères d'identification de l'adaptation et de la réaction fournis par MAdRéH.

.3.1.3.2 Principe

L'identification de l'adaptation et de la réaction, à partir d'un EPE, s'effectue par le calcul des critères caractéristiques de l'adaptation et de la réaction du Tableau 4. L'objectif de cette

étape étant de statuer sur l'adaptation et/ou la réaction requise par la tâche. Il est nécessaire d'utiliser, pour le calcul, un nombre maximal de situations de conduite concernant la tâche étudiée.

A partir des valeurs obtenues, l'identification de la configuration de référence se base sur le nombre de critères caractérisant l'adaptation ou la réaction. La configuration Réf.1 est choisie lorsque deux critères correspondent à de la réaction et deux autres à de l'adaptation. La configuration Réf. 2 est choisie lorsque au moins 3 des critères correspondent à de l'adaptation. Enfin la configuration Réf. 3 est obtenue lorsque au moins 3 des critères caractérisent de la Réaction

.3.1.3.3 Exemple

Afin d'illustrer l'application de la démarche à un Enregistrement des Paramètres d'Exploitation (EPE), onn s'intéresse à la tâche de gestion de la transition entre une zone de pilotage automatique (PA) et une zone de conduite manuelle (CM). Durant cette tâche, le changement à gérer est le passage entre ces deux modes de conduite. L'opérateur doit actionner le commutateur de passage d'un mode à l'autre. Il se doit également d'adapter son comportement. En effet, dans le cas du mode de conduite CM, il est en charge du respect de la signalisation et des vitesses consignes, ce qui n'est pas le cas en PA.

Afin d'étudier cette tâche, les EPE permettent de calculer les valeurs moyennes des quatres critères C1, C2, C4 et C5 dont un exemple est donné dans le Tableau 6. Le critère C3 nécessite des informations qui ne sont pas fournies par les EPE.

C1	C2	C4	C5
10 min	Oui	Non	0,01 changement / min

Tableau 6 : Exemple de valeurs moyennes des critères obtenues pour des situations de gestion du passage zone PA / zone CM

A partir de ces valeurs moyennes, il est nécessaire de définir pour chacun des critères d'indentification un seuil caractérisant de l'adaptation ou de la réaction .Pour le critère C1, horizon temporel, on peut considérer qu'une action est dite réactive pour des changements inférieurs à 10 secondes. Pour le critère C2, on considère que les actions sont récupérables lorsqu'au moins la moitié des erreurs ont été récupérées. Pour le critère C4, on considère que le changement peut être anticipé lorsque au moins la moitié des changements ont été

anticipés. Enfin le critère C5, fréquence des changements, une action est dite adaptative si elle répond à un changement dont la fréquence n'excède pas 0,1 changement par minute.

A partir des exemples de données du Tableau 6, on obtient 2 critères caractérisant de l'adaptation et deux critères caractérisant de la réaction. On en déduit que la tâche de gestion des changements de zone PA/CM correspond, dans notre exemple, à une configuration Réf.1.

3.2 Etape 2 : Identification des dérives

3.2.1 Principe

La deuxième étape de la démarche concerne l'identification de configurations de dérives définies au paragraphe §2.2.3. L'objectif de cette étape est d'identifier l'adaptation et/ou la réaction appliquée(s) réellement par l'opérateur de conduite dans sa gestion du changement.

Comme pour la première étape d'identification de l'adaptation et de la réaction, deux démarches spécifiques aux bases d'incidents et aux EPE permettent de mener à bien l'identification. Chacune de ces démarches est décrite ci-après.

3.2.2 Démarche à partir d'une base d'incidents

.3.2.2.1 Principe

A partir d'une base d'incidents, l'étape d'identification des dérives utilise la configuration de référence obtenue lors de l'étape précédente. A partir de cette configuration, il est possible de poser à nouveau les questions (parmi Q1, Q2 et Q3) dont la réponse a été positive lors de l'étape précédente. Ces questions ne sont plus posées sur l'action telle que l'opérateur aurait dû l'exécuter, mais sur l'action telle qu'elle a été effectuée. La réponse s'appuie donc sur la description des actions de l'opérateur fournie par la base. A partir de ces réponses, l'identification de la dérive correspondante à la situation est obtenue par l'utilisation de l'arbre de décision de la Figure 27.

Cet arbre de décision commence par s'intéresser aux différences obtenues entre les réponses aux questions posées sur le comportement réel et celles lors de l'identification des configurations de dérives. A partir de ces informations, tous les types de dérives sont discriminés à l'exception des dérives Dér.1, Dér.2 et Dér. 3. En effet, dans ces trois cas, seule la réponse à Q2 présente une différence. La discrimination est possible en prenant en compte le fait que les dérives Dér.3 n'utilisent pas les règles existantes. Puis Dér.1 et Dér.2 car les dérives de type Dér.2 répondent à temps au changement par utilisation des automatismes de conduite, ce qui n'est pas le cas pour les dérives de type Dér.1.

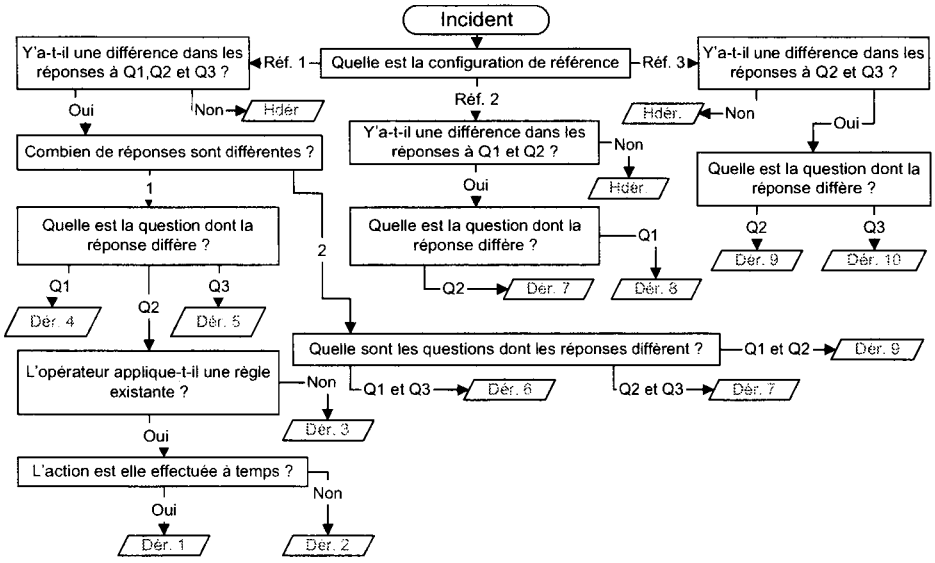


Figure 27 : Arbre de décision d'identification de dérive à partir d'une base d'incident

.3.2.2.2 Exemple

Afin d'illustrer l'étape d'identification des dérives à partir d'une base d'incidents, on peut reprendre l'exemple déjà utilisé précédemment, celui d'un événement de survitesse. Pour rappel, les données fournies par la base permettent de décrire l'événement de la manière suivante.

Le conducteur laisse son train prendre de la vitesse en pente. Il n'anticipe pas le TIV suivant (Tableau Indicateur de Vitesse) et le freinage tardif qui en résulte n'est pas suffisant. Une survitesse est effectuée.

Lors de l'étape d'identification de la configuration de référence, le résultat obtenu a été la configuration Réf. 2. On repose donc les questions Q1 et Q2 qui avaient obtenues des réponses positives.

- Q1 : l'opérateur a-t-il utilisé ses connaissances sur la ligne ou sur le matériel ?
- Q2 : l'opérateur a-t-il appliqué de la réglementation opérationnelle ?

Si Q3 avait reçu une réponse affirmative lors de l'étape précédente d'identification de l'adaptation et de la réaction, on aurait pu poser la question suivante :

- Q3 : l'opérateur a-t-il utilisé des automatismes de conduite ?

On constate d'après la description de l'erreur que l'opérateur n'a pas utilisé la connaissance de la ligne permettant d'anticiper le TIV. Il a appliqué la réglementation opérationnelle puisqu'il a engagé une action de freinage tardif du fait de l'absence d'anticipation. On a donc les réponse Q1 : Non et Q2 : Oui. D'après l'arbre de décision de la Figure 27, on identifie une dérive de type Dér.8. En effet, l'opérateur manque de connaissances sur la ligne.

3.2.3 Démarche à partir d'un enregistrement des paramètres d'exploitation

.3.2.3.1 Principe

Pour les enregistrements des paramètres d'exploitation, l'identification utilise à nouveau les critères caractérisant l'adaptation et/ou la réaction. Deux différences existent néanmoins par rapport à l'utilisation qui a déjà été faite :

- le critère C5 n'est plus relatif à la fréquence du changement à l'origine de l'adaptation et/ou de la réaction, mais à la fréquence des actions enregistrées par l'EPE et effectuées par le conducteur pour répondre au changement ;
- les critères ne s'appliquent plus à un nombre maximal de changement observés mais à un changement unique qui est l'objet de l'identification.

A partir des valeurs des cinq critères, la configuration de dérive est obtenue par l'utilisation de l'arbre de décision correspondant à la configuration de référence identifiée lors de l'étape 1. Ces arbres sont présentés dans la Figure 28 pour les configurations de référence Réf.1, dans la Figure 29 pour les configurations de référence Réf.2 et dans la Figure 30 pour les configurations de référence Réf.3.

Dans chacun des arbres de décision, la première étape consiste à savoir si il existe une différence significative entre la valeur des critères C1 à C5 de l'événement considéré et les valeurs des critères C1 à C5 obtenues lors de l'étape d'identification de la configuration de référence (appelés Ci_Ref dans l'arbre). Afin de statuer sur la significativité de la différence, on utilise le test de Student pour C1 et C5 qui compare la valeur du critère obtenue pour l'événement étudié à la valeur moyenne obtenue lors de l'identification de la configuration de référence. Dans le cas de C5, on a vu que le critère n'était pas le même que pour l'identification de la configuration de référence. Il est donc nécessaire de déterminer un nombre d'actions requises par la tâche afin évaluer la significativité de la différence. Pour les critères C2 et C4, aucun calcul de significativité n'est nécessaire, on regarde simplement si le changement a été anticipé et/ou récupéré et on vient comparer au caractère récupérable et/ou anticipable de la tâche obtenu lors de l'étape 1. Si il n'y a aucune différence significative pour aucun des critères alors il n'y a pas de dérives et les arbres de décisions fournissent le résultat HDér. (pour Hors Dérives).

Ensuite chacun des arbres va identifier le type de dérive observé à partir des informations portant sur le nombre de critères caractérisant l'événement observé comme de l'adaptation

(noté Nb_C_Ad) et le nombre de critères caractérisant l'événement observé comme de la réaction (noté Nb_C_Re). Ceci permet de discriminer les dérives de type Dér.7, Dér.8, Dér.9 et Dér.10. Afin d'identifier les autres types dérives, la démarche consiste à regarder le ou les critères sur lesquelles se situent les différences significatives et le sens de la différence (c'est-à-dire la tendance « adaptation » et/ou « réaction » vers laquelle la différence observée tend)

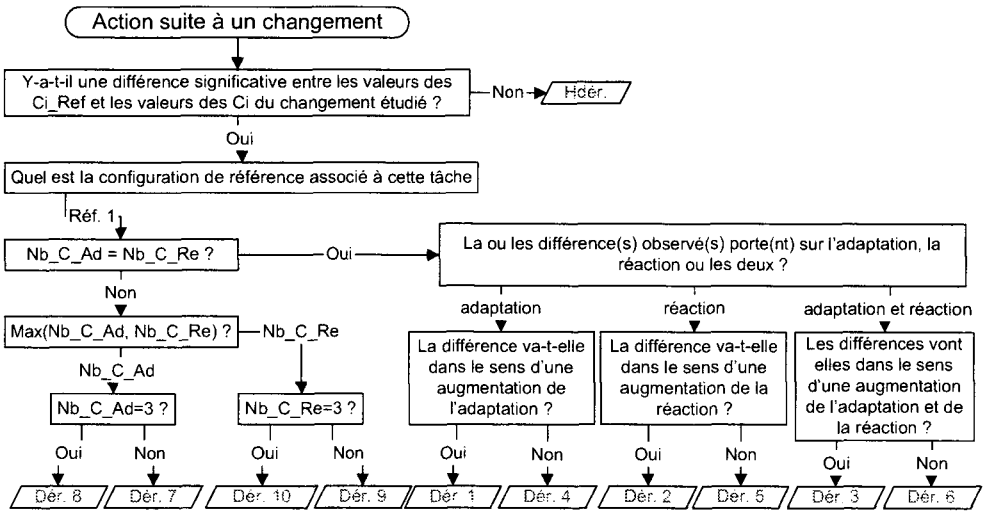


Figure 28 : Arbre de décision d'identification du type de dérive à partir d'un EPE –Cas Réf.1 –

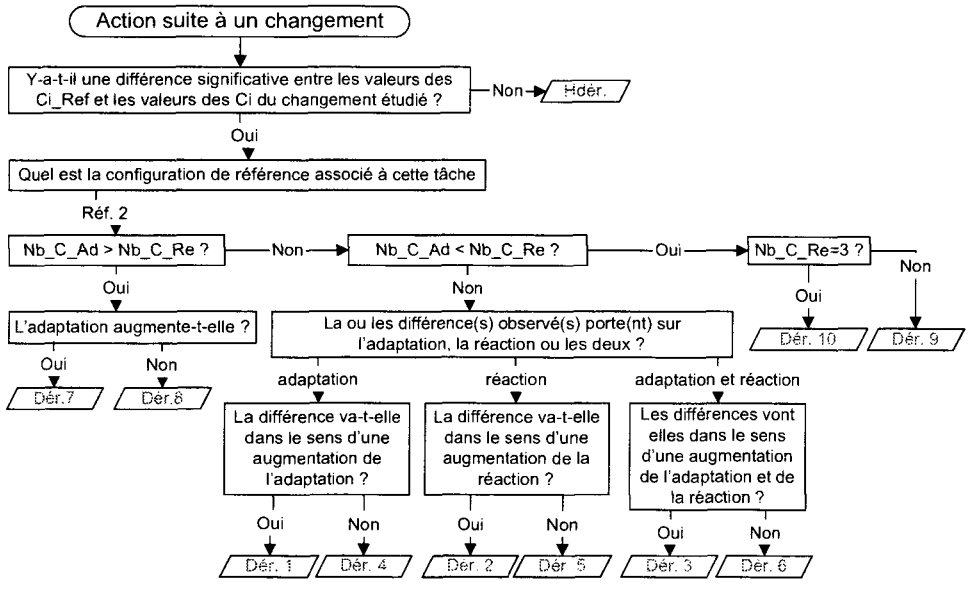


Figure 29 : Arbre de décision d'identification du type de dérive à partir d'un EPE –Cas Réf.2 –

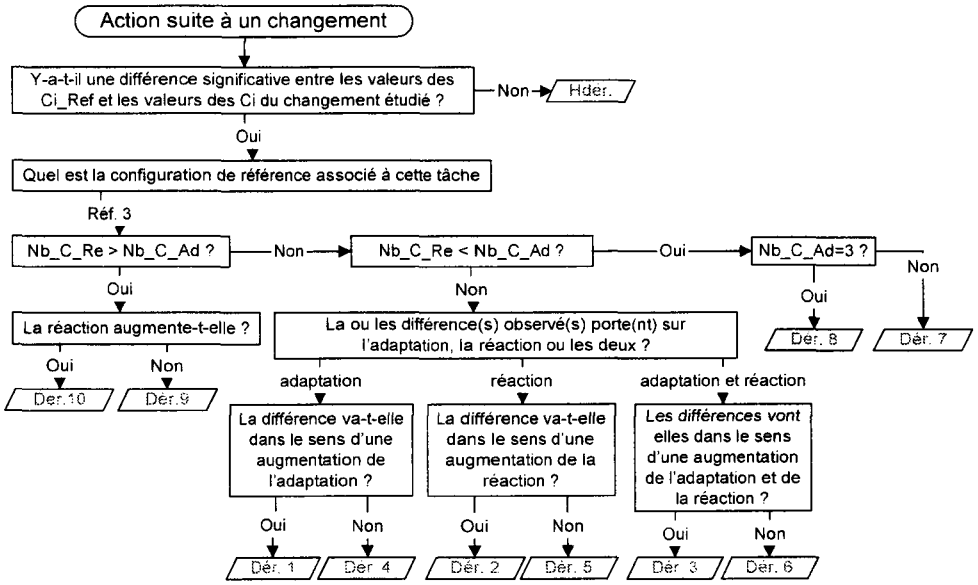


Figure 30 : Arbre de décision d'identification du type de dérive à partir d'un EPE –Cas Réf.3 –

.3.2.3.2 Exemple

On reprend le cas de la tâche de gestion des changements de zone en Pilotage Automatique (PA) ou en Conduite Manuelle (CM). Le Tableau 7 présente les valeurs moyennes obtenues lors de l'identification de la configuration de référence, les valeurs pour les critères évaluant l'événement E considéré et le caractère significatif ou non des différences.

	C1	C2	C4	C5
Configuration de référence	10 min	Oui	Non	0,01 changement / min
Evénement E	9 min	Oui	Non	0,03 actions / min
Différence significative	Non	Non	Non	Oui

Tableau 7 : Exemple de valeurs obtenues pour l'identification de la dérive potentielle de l'événement E

La différence est significative pour C1 et C5 en utilisant le test de Student à p=0,05. Pour le critère C5, on considère que la gestion de la tâche ne requiert qu'une seule action observable dans les EPE (celle de l'utilisation du commutateur zone CM / zone PA). Ceci permet de savoir que cette tâche requiert 0,01 actions/min.

On utilise l'arbre de la Figure 28 puisque la configuration de référence identifiée précédemment était de type Réf.1. Le nombre de critère caractérisant l'événement E comme de l'adaptation est égal au nombre de critère le caractérisant comme de la réaction. La différence significative observée porte sur un critère qui caractérise de l'adaptation. De plus la

différence va dans le sens d'une augmentation de la fréquence des actions et donc de la réaction. On en déduit que l'événement E est une dérive de type Dér.4.

3.3 Etape 3 : Analyse de l'adaptabilité et de la réactivité humaines

3.3.1 Principe

A ce stade de la démarche, la configuration de référence de la tâche considérée est connue et les dérives potentielles pour chacun des événements observés sont identifiées. L'étape 3 consiste maintenant à analyser les dérives afin de fournir une évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité humaines mises en jeu dans les situations étudiées.

Deux types d'évaluation sont envisagés afin de satisfaire l'objectif initial d'amélioration de la prise en compte de l'opérateur humain dans l'analyse de la conduite de transport urbain guidé. Le premier type d'évaluation concerne une estimation du risque basée sur le calcul de la gravité et l'occurrence des dérives identifiées. Si les données ne permettent pas ce calcul alors une analyse des facteurs pouvant influencer l'apparition de dérives de l'adaptation et/ou de la réaction doit être effectuée. Le deuxième type d'analyse peut étendre son évaluation à d'autres critères que la sécurité. Dans ce cas, c'est au travers du critère qualité, disponibilité ou charge de travail de l'opérateur que doivent être analysées les dérives.

Cette fois-ci, il n'existe pas de démarche spécifique à chacun des ensembles de données déjà évoqués. L'exemple suivant présente l'analyse d'un facteur pouvant influencer le comportement humain afin d'illustrer un type de démarche d'analyse de l'adaptabilité et de la réactivité humaines

3.3.2 Exemple

On cherche à évaluer le risque lié aux dérives de l'adaptabilité et/ou de la réactivité dans la tâche de gestion de la vitesse. Pour cela, on applique les deux premières étapes de la démarche à une base d'incidents répertoriant les survitesses. Lors de la troisième étape, on s'aperçoit que la base ne fournit pas de données susceptibles de calculer la gravité des erreurs (l'ampleur des survitesses n'est pas indiquée). On cherche donc maintenant à analyser les facteurs pouvant influencer l'adaptabilité et la réactivité humaines. Dans notre cas, les conducteurs étudiés sont en partie amenés à conduire deux types de matériel. La différence de ces deux matériels se situe essentiellement dans les capacités d'accélération et de freinage

(comme par exemple, les différences existantes entre le matériel métro ferré et celui sur pneus).

Le Tableau 8 présente la répartition des survitesses par type de dérive identifiée ainsi que pour chacune des dérives, le nombre N de conducteurs polyvalents impliqués.

Configuration de dérive	Nombre de survitesses	N
Dér.1	5	4
Dér.4	18	1
Dér.7	4	4
Dér.8	14	2
Dér.Adaptation	41	11
Dér.2	20	2
Dér.5	7	2
Dér.9	24	7
Dér.10	2	0
Dér.Réaction	53	11
Dér.3	2	2
Dér.6	10	3
Dér.Ad&Ré	12	5
Hdér	14	7
Hréf	2	0
Autres	16	7
Total	122	34

Tableau 8 : Exemples de résultats des étapes 1 et 2 (base d'incidents)

A partir de ce tableau, il est possible de constater, par exemple, que les dérives Dér.1, Dér. 3 et Dér. 7 sont effectuées en grande majorité par des agents polyvalents. Ces trois types de dérives possèdent comme caractéristique commune le fait que l'opérateur se base sur des connaissances acquises plutôt que sur des règles. Sans même connaître le nombre total de conducteur étudiés ni même la proportion de conducteurs polyvalents au sein de cette population, on peut émettre l'hypothèse qu'une partie des survitesses résultent de la polyvalence des conducteurs. Cette analyse permet de justifier la demande de données supplémentaires afin d'effectuer une estimation du risque de dérive d'adaptation et/ou de réaction des conducteurs polyvalents.

4 Conclusion

Ce troisième chapitre a proposé une modélisation associée à une démarche dont l'objectif est de prendre en compte la contribution de l'opérateur de conduite de transport urbain guidé par l'analyse de son adaptabilité et de sa réactivité.

La première partie de ce chapitre s'est attachée à définir les concepts d'adaptabilité et de réactivité humaines. Tous les deux ont été présentés en effectuant un parallèle avec l'adaptation et la réactivité de systèmes techniques. Une modélisation s'inspirant de travaux en ingénierie cognitive a été proposée ainsi que des critères d'identification de l'adaptation et de la réaction.

La deuxième partie s'est concentrée sur la démarche d'analyse de l'adaptabilité et de la réactivité. Celle-ci est constituée de trois étapes : l'identification de l'adaptation et de la réaction, l'identification des dérives et l'analyse de l'adaptabilité et de la réactivité. Pour chacune de ces étapes, des exemples tirés des systèmes de transport urbains guidés ont permis d'illustrer la démarche.

L'objet du prochain chapitre est d'appliquer la démarche afin de la valider. Ceci passe par l'utilisation de deux ensembled de données :

- une base d'incidents de franchissement de signaux obtenue à partir de la base REx de la RATP;
- un enregistrement des paramètres d'exploitation obtenu par une expérimentation de simulation de conduite ferroviaire effectuée au LAMIH sur la plateforme CoR&GesT (Conduite sur Rail et Gestion de Trafic).

Chapitre 4 : Application à l'évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité humaines dans la conduite de transport urbain guidé

1 INTRODUCTION **96**

2 APPLICATION A UNE BASE D'INCIDENTS **97**

2.1 PRESENTATION DE LA BASE REX 97

2.2 APPLICATION DE LA DEMARCHE 97

2.2.1 Identification de l'adaptation et de la réaction 98

2.2.2 Identification des dérives 99

2.2.3 Evaluation de l'adaptabilité et de la réactivité 101

3 APPLICATION A UN ENREGISTREMENT DES PARAMETRES D'EXPLOITATION **107**

3.1 PRESENTATION DE LA PLATEFORME COR&GEST 107

3.1.1 Architecture physique 107

3.1.2 Architecture logicielle 108

3.2 PRESENTATION DE L'EXPERIMENTATION 109

3.2.1 Phase de formation et de familiarisation 111

3.2.2 Phase de conduite avec gestion d'événements courants 112

3.2.3 Phase de gestion d'événements perturbateurs et de changement d'interface 113

3.3 APPLICATION DE LA DEMARCHE 115

3.3.1 Définition des critères utilisés 115

3.3.2 Identification de l'adaptation et de la réaction 118

3.3.3 Identification des dérives 119

3.3.4 Evaluation de l'adaptabilité et de la réactivité 120

4 CONCLUSION **127**

Chapitre 4 : Application à l'évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité humaines dans la conduite de transport urbain guidé

1 Introduction

Le chapitre précédent a proposé une démarche méthodologique de prise en compte de l'adaptabilité et la réactivité humaines dans l'analyse de l'activité du conducteur de transport urbain guidé. Le développement de cette démarche a été possible par l'observation de conducteurs sur différents réseaux de tramway [QUEVA, 2006]. Ces observations ont constitué la phase exploratoire de l'étude. Désormais il est nécessaire de valider la démarche en l'appliquant à des exemples d'activité de conduite. Comme évoqué précédemment, cette méthodologie peut s'appuyer sur une base d'incidents ou sur un enregistrement des paramètres d'exploitation.

Ce chapitre a deux objectifs. Dans la première partie, on applique la démarche à l'étude d'une base d'incidents. Cette base rassemble des événements de franchissement de signaux dans le cadre de la conduite de métro. L'étude de l'adaptabilité et de la réactivité humaines qui en est faite se justifie de deux manières. La première concerne l'importance qui est accordée aux franchissements de signaux dans l'exploitation d'un système de transport. La seconde est celle qui vise à étudier une population qui, comme cela a déjà été évoqué dans le chapitre 2, est soumise à de nombreux changements pouvant influer sur la conduite.

La seconde partie sera consacrée à l'application de la démarche à un enregistrement des paramètres d'exploitation. Dans un premier temps, l'obtention de données sera explicitée Ainsi nous décrirons la plate-forme expérimentale CoR&GesT du LAMIH développée au sein de l'équipe Systèmes Homme Machine (SHM). Celle-ci permet de simuler la conduite de transport guidé à travers une interface informatique agissant sur un réseau ferroviaire miniature composé de locomotives échelle H0m équipées de caméra. Le protocole sera présenté de manière à définir les changements étudiés ainsi que les tâches considérées dans l'optique d'une évaluation de la performance de conduite. Dans un second temps, la démarche sera appliquée et les résultats seront analysés.

2 *Application à une base d'incidents*

2.1 Présentation de la base REx

La base de données utilisée rassemble l'ensemble des données recueillies par les responsables REx (Retour d'Expérience) de chacune des lignes du réseau métro de la RATP. L'échantillon de données est celui relatif à une année entière d'exploitation.

Le principe retenu lors de la constitution de cette base a été le suivant : lors du franchissement d'un signal fermé par un conducteur, la hiérarchie de la ligne (par l'intermédiaire du responsable REx) procédait au recueil d'un certain nombre de données considérées comme significatives du point de vue facteur humain et répertoriées dans une fiche intitulée « rapport d'incident », informations obtenues à partir d'observations, d'enregistrements, de déclarations écrites d'agents et d'interviews.

Plusieurs champs sont disponibles dans la base :

- la clé d'identification de l'événement qui permet d'indexer chacun des événements;
- le numéro de la ligne de métro (ligne 1 à 13) sur laquelle a été effectué le franchissement de signal ;
- le type de signal franchi (signal de manœuvre ou signal d'espacement);
- l'importance du franchissement exprimé en mètres ;
- la date et l'heure de l'incident ;
- la date de qualification du conducteur qui permet d'évaluer l'expérience de celui-ci ;
- les antécédents ferroviaires du conducteur qui permet de savoir si le conducteur a déjà commis des erreurs de conduite ;
- les antécédents de franchissement de signal, ce champ est plus précis que le précédent puisqu'il permet de savoir si le conducteur a déjà franchi un signal fermé ;
- la description de l'erreur qui décrit brièvement la nature de l'erreur ;
- la description du mécanisme mental, ce champ est le plus riche en information ; il permet de connaître le contexte, les causes du franchissement et la justification fournie par le conducteur dans sa déclaration écrite ou lors de l'éventuelle interview.

2.2 Application de la démarche

L'application de la démarche à cette base d'incidents s'effectue conformément aux instructions données par le chapitre 3. Les paragraphes suivants détaillent les résultats obtenus pour les trois étapes suivantes :

- étape 1 : identification de l'adaptation et de la réaction ;
- étape 2 : identification des dérives ;
- étape 3 : évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité.

2.2.1 Identification de l'adaptation et de la réaction

La première étape de la démarche utilise les 181 événements de la base pour lesquels il est demandé à un expert d'associer une réponse à chacune des trois questions Q1, Q2 et Q3 (cf chapitre 3 - §3.1.2). A partir de ces données on obtient la répartition suivante, présentée dans le Tableau 9 :

Configuration de référence	Nombre d'événements	Pourcentage	Q1	Q2	Q3
Réf 1	16	8,8	Oui	Oui	Oui
Réf 2	32	17,7	Oui	Oui	Non
Réf 3	120	66,3	Non	Oui	Oui
HRef	13	7,2	Non	Oui	Non
Total	181	100			

Tableau 9 : Répartition du nombre d'événements en fonction de la configuration de référence

On constate que plus de 66 % des 181 erreurs enregistrées dans la base correspondent à une configuration de référence Réf.3. Cette répartition indique que la tâche de gestion de la signalisation requiert principalement des actions réactives. Pour 13 événements (7,2 %), les réponses obtenues indiquent que les tâches de gestion de la signalisation ne demandaient ni une connaissance particulière de la ligne ou du matériel, ni des automatismes de conduite. Lorsque l'on regarde plus en détail les événements concernés, on constate que le champ « description du mécanisme mental » est vide. En fait, l'expert n'a pas suffisamment d'informations sur le franchissement pour statuer sur l'adaptation et la réaction requises par la tâche. Dans ce cas, ces événements sont retirés du champ d'étude en indiquant une configuration HRéf (pour Hors Référence).

En regardant plus précisément la répartition des configurations de référence en fonction du type de signaux, on obtient la répartition présentée dans le Tableau 10. On retrouve l'importance des exigences de réaction avec 83,8 % de Réf.3 obtenus dans le cas des signaux de manœuvre. Le constat est différent pour les signaux d'espacement puisque la répartition entre les configurations Réf.3 et les configurations Réf.2 (tâche faisant appel uniquement à de l'adaptation) est plus équilibrée ; ceci s'explique sans doute par l'anticipation (qui est une des caractéristiques différenciant adaptation et réaction). Celle-ci est plus difficile pour un signal

de manœuvre dont l'état est principalement lié à la position des aiguilles d'un appareil de voie que pour un signal d'espacement dont l'état est lié à la position du train précédent.

Configuration de référence	Signal de manœuvre		Signal d'espacement	
	Nombre d'événements	Pourcentage	Nombre d'événements	Pourcentage
Réf 1	6	5,7	10	13,2
Réf 2	6	5,7	26	34,2
Réf 3	88	83,8	32	42,1
HRef	5	4,8	8	10,5
Total	105	100	76	100

Tableau 10 : Répartition de la configuration de référence identifiée en fonction du type de signal franchi

2.2.2 Identification des dérives

La deuxième étape de la méthodologie utilise la classification obtenue à l'étape précédente ainsi que les réponses aux trois questions Q1, Q2 et Q3 appliquées aux erreurs constatées dans les 181 événements de la base. Conformément aux instructions données au chapitre 3 §3.2.2, on utilise l'arbre de décision de la Figure 27. La répartition des données obtenues est présentée dans le Tableau 11.

Parmi les 181 événements disponibles, l'identification d'une dérive a été permise pour 143 d'entre-eux. Les 38 événements non identifiés correspondent :

- aux 6 événements (notés Hdér dans le Tableau 11) dont les réponses aux questions n'ont pas permis d'identifier de différence par rapport aux réponses de la première étape ;
- aux 13 événements (notés Hréf dans le Tableau 11) correspondant aux configurations de référence n'ayant pas pu être identifiées lors de l'étape précédente ;
- aux 3 événements (notés Incertitude dans le Tableau 11) dont les informations fournies par la base ne permettent pas d'identifier de manière suffisamment précise une dérive en particulier ;
- aux 16 événements (notés Inconnu dans le Tableau 11) dont les éléments ne permettent pas d'identifier une dérive répertoriée dans la liste fournie par MAdRéH.

Configuration de dérive	Nombre d'événements			% de dérives identifiées		
	Manœuvre	Espacement	Total	Manœuvre	Espacement	Total
Dér.1	1	2	3	1,2	3,4	2,1
Dér.4	0	1	1	0	1,7	0,7
Dér.7	5	19	24	5,9	32,2	16,8
Dér.8	0	2	2	0	3,4	1,4
Dér. Adaptation	6	24	30	7,1	40,7	21
Dér.2	0	0	0	0	0	0
Dér.5	2	1	3	2,4	1,7	2,1
Dér.9	71	32	103	84,5	54,2	72,0
Dér.10	5	0	5	5,9	0	3,5
Dér. Réaction	78	33	111	92,8	55,9	77,6
Dér.3	0	0	0	0	0	0
Dér.6	0	2	2	0	3,4	1,4
Dér. Ad. & Ré.	0	2	2	0	3,4	1,4
Hdér	5	1	6	0	0	0
Hréf	5	8	13	0	0	0
Incertitude	0	3	3	0	0	0
Inconnu	11	5	16	0	0	0
Non identifiés	21	17	38	0	0	0
Total	105	76	181	100	100	100

Tableau 11 : Répartition des franchissements en fonction du type de dérive

Parmi les dérives identifiées, une large majorité (77,6 %) correspond à des dérives de réaction et plus particulièrement à des dérives de type Dér.9. Ces dérives se focalisent sur le niveau des comportements basés sur les automatismes au détriment des comportements basés sur les règles. Concrètement, pour la tâche de franchissement d'un signal, il s'agit du développement de comportements automatiques inappropriés qui réagissent uniquement à l'acquisition d'une information. Ce résultat est plus important encore dans le cas d'un signal de manœuvre, ce qui est cohérent avec les résultats de l'étape précédente. Concernant les signaux d'espacement, une majorité (55,9 %) répond au même constat concernant le développement d'automatismes. L'autre part importante de dérives (40,7 %) correspond à des dérives d'adaptation et plus particulièrement à des dérives de type Dér.7. Celles-ci correspondent à un cas où l'opérateur ne s'adapte plus en fonction des règles mais à partir de connaissances acquises.

A l'issue de cette étape d'identification des dérives, on peut dire que deux types de comportements de dérives erronées se distinguent : le type Dér.9 et le type Dér.7. Le positionnement de ces deux types de dérive est présenté, pour rappel, dans la Figure 31.

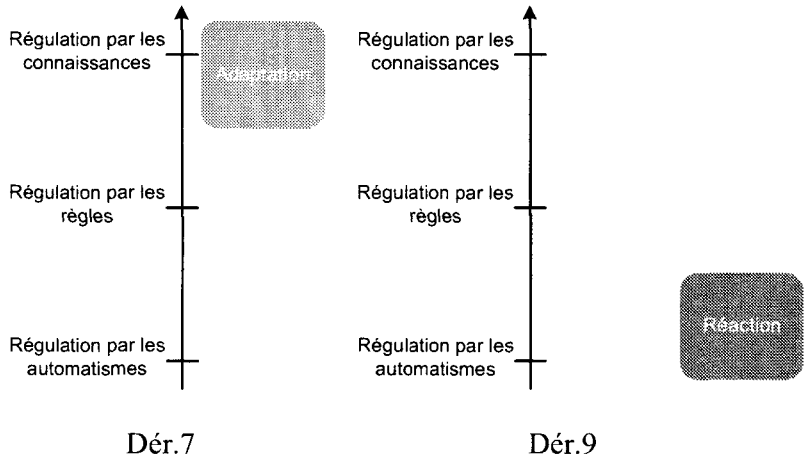


Figure 31 : Les configurations de dérives de type Dér.7 et Dér.9

La Figure 31 permet de conclure sur le fait que les erreurs de franchissement de signaux résultent principalement de comportements où l'opérateur ne se base que sur une des deux capacités d'adaptation ou de réaction. Plus précisément, à partir d'une des deux capacités, il va s'affranchir des règles existantes et gérer les changements dans la signalisation à partir de connaissances ou d'automatismes.

2.2.3 Evaluation de l'adaptabilité et de la réactivité

A partir des dérives identifiées, l'objet de cette partie consiste à évaluer l'adaptabilité et la réactivité humaines. Dans un premier temps, cette évaluation se fera par une estimation du risque associé aux erreurs d'adaptabilité et de réactivité. Dans un second temps, c'est l'analyse de deux facteurs influençant l'adaptabilité et la réactivité humaines qui sera abordée. Ces deux facteurs sont l'expérience des conducteurs et les antécédents d'erreurs de conduite.

.2.2.3.1 Estimation du risque associé aux erreurs d'adaptabilité et de réactivité

.2.2.3.1.1 Analyse de la gravité des erreurs d'adaptabilité et de réactivité

Afin de déterminer une estimation du risque associé aux erreurs d'adaptabilité et de réactivité humaines, il est nécessaire de commencer par estimer la gravité de ces erreurs. Cette estimation peut être obtenue en analysant la répartition des dérives par rapport aux degrés de gravité présentés dans le Tableau 12.

Configuration de dérive	0 à 5 mètres		6 à 10 mètres		plus de 10 mètres		Total
	manœuvre	espacement	manœuvre	espacement	manœuvre	espacement	
Dér.1	0	0	1	2	0	0	3
Dér.4	0	0	0	0	0	1	1
Dér.7	3	16	1	0	1	3	24
Dér.8	0	0	0	1	0	1	2
Dér.Adaptation	3	16	2	3	1	5	30
Dér.2	0	0	0	0	0	0	0
Dér.5	2	0	0	0	0	1	3
Dér.9	45	25	16	3	10	4	103
Dér.10	3	0	2	0	0	0	5
Dér.Réaction	50	25	18	3	10	5	111
Dér.3	0	0	0	0	0	0	0
Dér.6	0	1	0	1	0	0	2
Dér.Ad&Ré	0	1	0	1	0	0	2
Hdér	5	1	0	0	0	0	6
Hréf	2	7	2	0	1	1	13
Incertitude	0	1	0	0	0	2	3
Inconnu	10	2	1	2	0	1	16
Autres	17	11	3	2	1	4	38
Total	70	53	23	9	12	14	181

Tableau 12 : Répartition de la gravité des événements en fonction des configurations de dérives

Les trois intervalles de gravité, exprimant la distance du franchissement, sont ceux qui apparaissent dans le champ « Gravité » de la base REx. A partir de l'ensemble des franchissements étudiés, on constate qu'il existe une large majorité de franchissement de 0 à 5 mètres (123 événements soit 67,9 %). Cette importance des franchissements de plus faible gravité s'explique en partie par la présence d'un système d'arrêt automatique équipant le métro. Si l'on s'intéresse uniquement aux franchissements pour lesquels une dérive a été identifiée, on retrouve la même répartition avec 95 événements (soit 77,2 %) de franchissement de 0 à 5 mètres. On peut donc en conclure que, dans le cas de la tâche de franchissement d'un signal, la gravité des erreurs d'adaptation et/ou de réaction est la même que dans le cas général (c'est-à-dire une majorité d'événements de faible gravité).

Par contre, il est intéressant de noter que plus la gravité du franchissement de signal augmente, plus le nombre de dérives identifiées augmente. En effet, comme nous l'avons déjà signalé, 77,2 % des franchissements de 0 à 5 mètres permettent d'identifier une configuration de dérive. Cette proportion augmente à 84,4 % pour les franchissements de 6 à 10 mètres et 88,5 % pour les franchissements de plus de 10 mètres.

Maintenant que la gravité des dérives de l'adaptation et/ou de la réaction a été évaluée, on peut désormais chercher à analyser l'occurrence de ces mêmes dérives.

.2.2.3.1.2 Analyse de l'occurrence des erreurs d'adaptabilité et de réactivité

Le risque que l'on cherche ici à estimer est celui lié à l'événement « dérive de l'adaptabilité et/ou de la réactivité ». Dans le cas de la base REx, une dérive identifiée apparaît, comme tous les événements de la base, comme une erreur. On doit donc au final évaluer la probabilité d'occurrence P_1 des erreurs d'adaptabilité et de réactivité dont l'expression est indiquée dans l'Équation 2.

$$P_1 = \frac{nombre\ de\ dérives\ d'adaptation\ et/ou\ de\ réaction}{nombre\ de\ changements\ de\ la\ signalisation}$$

Équation 2 : Expression de la probabilité d'occurrence d'une dérive de l'adaptation et/ou de la réaction

Le nombre de dérives d'adaptation et/ou de la réaction peut être obtenu, on le trouve notamment dans le Tableau 13. Par contre, le nombre de changements de la signalisation n'apparaît pas dans les données de la base REx. Dans le cas de la tâche de franchissement de signaux, le nombre de sollicitations qui nous intéresse est le nombre de feux rencontrés fermés puisque c'est ce type d'état de la signalisation qui doit provoquer une action d'arrêt de la part de l'opérateur.

L'estimation de l'occurrence des dérives de l'adaptation et/ou de la réaction n'est donc pas possible. Il est néanmoins possible d'évaluer la proportion des types de dérives d'adaptabilité et/ou de réactivité. Leurs répartitions par rapport au total des erreurs de franchissement sont présentées dans le Tableau 13 ci-dessous.

Configuration de dérive	Nombre d'événements			Proportion (en %)		
	Manœuvre	Espacement	Total	Manœuvre	Espacement	Total
Dér. Adaptation	6	24	30	5,7	31,6	16,6
Dér. Réaction	78	33	111	74,3	43,4	61,3
Dér. Ad. & Ré.	0	2	2	0	2,6	1,1
Non identifiés	21	17	38	2	22,4	21
Total	105	76	181	100	100	100

Tableau 13 : Répartition des franchissements en fonction du type de dérive

Ces chiffres permettent d'estimer la proportion des dérives de l'adaptation et/ou de la réaction à 79 % avec la proportion la plus élevée pour les dérives de réaction (74,3 % des franchissements de signaux de manœuvre).

Au final, comme la démarche le préconise, en l'absence d'estimation du risque possible, il faut s'attacher à analyser les facteurs influençant l'adaptabilité et la réactivité humaines.

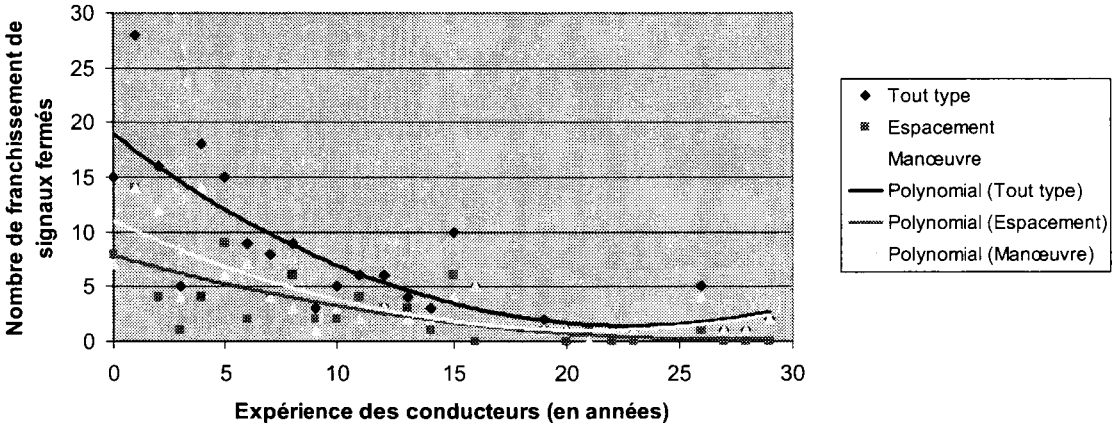
.2.2.3.2 Analyse des facteurs influençant l'adaptabilité et la réactivité humaines

Dans la base REx qui fournit les données permettant l'application de la démarche, deux champs peuvent permettre d'analyser des facteurs influençant l'adaptabilité et la réactviité humaines dans la tâche de franchissement de signaux :

- la date de qualification du conducteur qui permet d'avoir accès à son expérience de conduite ;
- les antécédents ferroviaires du conducteur qui exposent les erreurs de conduite répertoriées pour le conducteur.

.2.2.3.2.1 Analyse du facteur expérience de conduite

L'analyse de l'expérience des conducteurs s'effectue à partir de la répartition du nombre de franchissements. Le résultat présenté par le Graphique 1, montre que les franchissements concernent principalement les conducteurs les moins expérimentés. L'expérience maximale des conducteurs étudiés est de 29 ans ; ceci permet de choisir les intervalles [0 ;10],]10 ;20[et]20 ; 30] afin de couvrir en trois intervalles égaux l'ensemble des conducteurs.



Graphique 1 : Répartition du nombre de franchissements en fonction de l'expérience de conduite

On observe que la courbe de régression obtenue par une approximation polynomiale du second degré présente une forme « en baignoire » caractéristique de la représentation du nombre d'erreurs en fonction de l'expérience. L'expérience avec laquelle le conducteur semble être le moins disposé à une erreur de franchissement se situe entre 20 et 25 années d'expérience.

A partir des intervalles choisis, le Tableau 14 représente la répartition des dérives en fonction de l'expérience des conducteurs. Ces chiffres montrent d'abord qu'en ce qui concerne la tâche

de franchissement d'un signal que, quelque soit l'âge, les erreurs effectuées sont d'abord des erreurs liées à la dérive 9 puis dans une seconde mesure à la dérive 7 (comme dans le cas général, cf. §2.2.2). Le nombre d'erreurs associées à chacun de ces types de dérives va ensuite diminuer avec l'expérience ce qui est cohérent avec l'observation faite sur le Graphique 1.

Configuration de dérive	[0 ; 10]		]10 ; 20]		]20 ; 30]		Total
	espacement	manœuvre	espacement	manœuvre	espacement	manœuvre	
Dér.1	0	1	2	0	0	0	3
Dér.4	1	0	0	0	0	0	1
Dér.7	15	4	4	1	0	0	24
Dér.8	2	0	0	0	0	0	2
Dér.Adaptation	18	5	6	1	0	0	30
Dér.2	0	0	0	0	0	0	0
Dér.5	1	2	0	0	0	0	3
Dér.9	24	49	6	17	2	5	103
Dér.10	0	4	0	1	0	0	5
Dér.Réaction	25	55	6	18	2	5	111
Dér.3	0	0	0	0	0	0	0
Dér.6	1	0	1	0	0	0	2
Dér.Ad&Ré	1	0	1	0	0	0	2
Hdér	0	4	1	1	0	0	6
Hréf	6	4	2	1	0	0	13
Incertitude	2	0	1	0	0	0	3
Inconnu	3	4	2	2	0	5	16
Autres	11	12	6	4	0	5	38
Total	55	72	19	23	2	10	181

Tableau 14 : Répartition des dérives en fonction de l'expérience des conducteurs

On peut donc conclure sur le fait que l'expérience des conducteurs ne semble pas influencer de manière significative le nombre d'apparition de dérives d'adaptation et/ou de réaction dans la tâche de franchissement de signal. Ceci se traduit par une répartition identique des événements (de dérives ou non) par rapport aux classes d'expérience. On s'intéresse donc maintenant au facteur : antécédents d'erreurs de conduite.

.2.2.3.2.2 Analyse du facteur antécédents d'erreurs de conduite

La répartition des dérives en fonction des antécédents ferroviaires des conducteurs présentée dans le Tableau 15 utilise deux distinctions dans l'expression des antécédents. La première distinction est faite entre les conducteurs avec ou sans antécédents d'erreurs ferroviaires. La seconde distinction concerne les conducteurs ayant des antécédents de franchissement de signaux et ceux avec d'autres types d'antécédents (comme la survitesse par exemple).

Le premier constat est que la majorité des conducteurs (58 %) ayant effectués un franchissement de signal en 1997 présentent des antécédents ferroviaires. Cette proportion est la même au sein des erreurs de dérives d'adaptation et/ou de réaction (58 %). Le second constat s'attache aux conducteurs avec antécédents. En effet 79 % des événements impliquant des conducteurs avec antécédents concernent un antécédent de franchissement de signal ce qui correspond à 45,9 % des événements au total.

Parmi les conducteurs avec antécédents, la majorité (ceux avec antécédents de franchissement de signaux) présentent les trois types de dérives d'adaptation et/ou de réaction alors que les conducteurs avec d'autres types d'antécédents ne présentent que des dérives de réaction.

Configuration de dérive	Sans d'antécédents		Antécédents Franchissement		Autres Antécédents		Avec d'antécédents		Total
	Espace.	Manœu	Espace.	Manœu	Espace.	Manœu	Espace.	Manœu	
Dér.1	0	1	2	0	0	0	2	0	3
Dér.4	0	0	1	0	0	0	1	0	1
Dér.7	11	3	8	2	0	0	8	2	24
Dér.8	1	0	1	0	0	0	1	0	2
Dér. Adaptation	12	4	12	2	0	0	12	2	30
Dér.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dér.5	1	1	0	1	0	0	0	1	3
Dér.9	12	25	15	34	5	12	20	46	103
Dér.10	0	4	0	1	0	0	0	1	5
Dér. Réaction	13	30	15	36	5	12	20	48	111
Dér.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dér.6	1	0	1	0	0	0	1	0	2
Dér. Ad. & Ré.	1	0	1	0	0	0	1	0	2
Hdér	0	2	1	2	0	1	1	3	6
Hréf	6	1	1	4	1	0	2	4	13
Incertitude	1	0	2	0	0	0	2	0	3
Inconnu	2	4	1	6	2	1	3	7	16
Autres	9	7	5	12	3	2	8	14	38
Total	35	41	33	50	8	14	41	64	181

Tableau 15 : Répartition des configurations de dérives en fonction des antécédents ferroviaires des conducteurs

L'ensemble des observations faites à partir de l'analyse de ce facteur laisse penser que les antécédents d'erreurs de conduite influencent la proportion des dérives d'adaptation et/ou de réaction. Ceci montre l'intérêt d'obtenir des données complémentaires afin d'estimer le risque de dérive des conducteurs avec antécédents d'erreurs de conduite afin de confirmer ces résultats.

Deux problèmes subsistent quant aux objectifs initiaux annoncés de notre démarche d'analyse de l'adaptabilité et de la réactivité humaines :

- seule l'infiabilité est évaluée. Ceci vient essentiellement du fait qu'il s'agisse d'une base de données d'actions erronées ;
- seul le critère sécurité est évalué. Or d'autres critères peuvent être intéressants à analyser sous l'angle de l'adaptabilité et de la réactivité.

Ces deux dernières remarques justifient l'application de la démarche méthodologique à un enregistrement de paramètres d'exploitation. Ceci fera l'objet du reste de ce mémoire et notamment dans la partie suivante qui décrit une plateforme expérimentale ainsi que le protocole qui a permis de récolter les données nécessaires à l'application de la démarche.

3 *Application à un enregistrement des paramètres d'exploitation*

3.1 Présentation de la plateforme CoR&GesT

La plateforme CoR&GesT (Conduite sur Rail & Gestion de Trafic), utilisée lors de l'expérimentation, est un outil de simulation développé au LAMIH de Valenciennes au sein de l'équipe SHM (Système Homme Machine).

Elle est constituée de plusieurs éléments simulant un système ferroviaire :

- une architecture physique comprenant le réseau ferroviaire miniature, un Automate Programmable Industriel (API) et une IntelliBox (IB);
- une architecture logicielle comprenant le poste de supervision, le poste de scénarios, et le poste de conduite.

3.1.1 Architecture physique

Le réseau ferroviaire miniature est un ensemble de voies (cf. Figure 32) où circulent des trains (4 au maximum) à l'échelle H0m ($1/86^{ème}$ avec un écartement métrique des voies). Le réseau est composé de 41 cantons associés à des modules de détection d'occupation et de 15 aiguillages ainsi que de leurs commandes. L'échange de données entre le système et le réseau se fait par une communication série entre l'API (Automate Programmable Industriel) et l'IntelliBox (boîtier de communication commun à l'ensemble des modules de la maquette). L'IB gère la position des trains et des aiguillages du réseau. De manière générale, toutes les informations, en provenance ou à destination de la maquette passent par l'API.

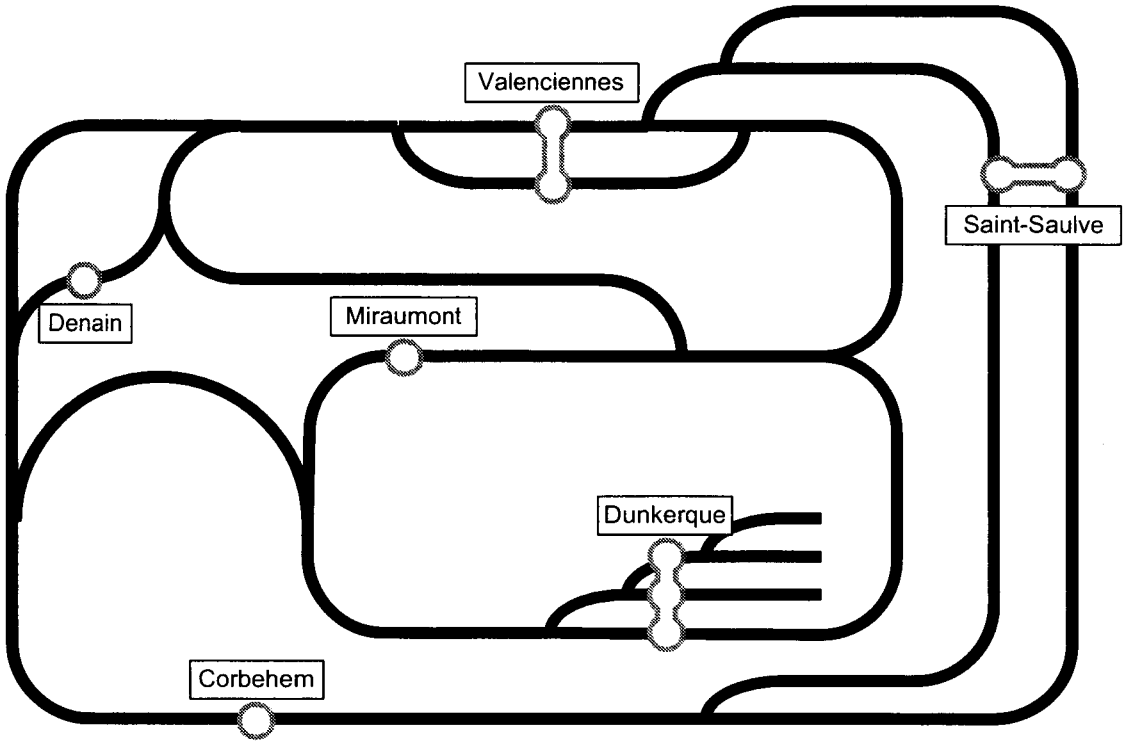


Figure 32 : Schéma de la maquette avec les différentes gares

3.1.2 Architecture logicielle

La partie logicielle de la plateforme est constituée de plusieurs postes ayant chacun un rôle dans la gestion de la conduite des trains ou de leur circulation.

Le premier poste est celui de supervision. Sa fonction première est de gérer et surveiller la circulation des trains se trouvant sur le réseau de la façon la plus adaptée et la plus sûre. Depuis le poste de supervision, il est possible d'agir sur les aiguillages ou sur la signalisation du réseau. On retrouve sur le poste de supervision un synoptique du réseau présentant :

- les cantons avec leurs états d'occupation ;
- la position des aiguillages ;
- les horaires des trains ;
- les différentes alarmes liées à l'exploitation.

Le second poste est le poste de scénarios qui permet, à partir de scénarios prédéfinis, de simuler des événements sur le réseau. Ces événements peuvent prendre la forme d'incidents techniques affectant le matériel roulant ou l'infrastructure. Ils peuvent également être des modifications des consignes d'exploitation données au conducteur (modification d'une mission par exemple). Le poste de scénarios se présente sous la forme d'une interface

reprenant tous les types d'événements existants et paramétrables en fonction notamment de la durée souhaitée pour l'événement.

Enfin le dernier poste est dédié à la conduite. Il est constitué d'une réplique informatique d'un poste de conduite ferroviaire, comme on le voit sur la Figure 33. On y retrouve l'ensemble des informations nécessaires (consigne vitesse, alarme, horaires ...) ainsi que les actionneurs utilisables par le conducteur (traction, arrêt d'urgence, communication). La « vue conducteur » présentée sur le poste de conduite est obtenue à partir d'un signal vidéo issu d'une caméra sans fil positionnée sur la locomotive miniature.

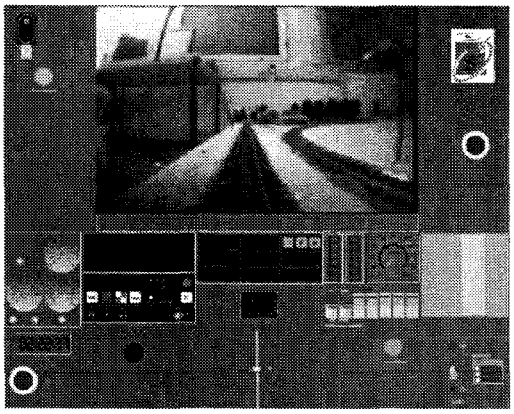


Figure 33 : Poste de conduite de la plateforme CoR&GesT

3.2 Présentation de l'expérimentation

L'expérimentation s'est déroulée en trois phases. Dans chacune des phases de l'expérimentation, il est demandé au conducteur d'effectuer des missions parmi les trois types existants :

- Mission A : Valenciennes – Corbehem – Saint-Saulve – Denain ;
- Mission B : Valenciennes – Dunkerque – Miraumont – Denain ;
- Mission C : Valenciennes – Corbehem – Saint-Saulve – Dunkerque – Denain.

Lors de ces missions, l'opérateur va être soumis à des changements (ou événements). Ceux-ci pourront être qualifiés d'événements courants ou de perturbations suivant qu'ils reflètent un mode normal de l'activité (événement courant) ou un mode dégradé (événement perturbateur). A partir de 4 types de changements, on obtient donc 8 types d'événements courants ou de perturbations repris dans le Tableau 16.

Changement	Type d'événement
Changement de la mission au départ	Evénement courant
Suppression d'une gare en cours de mission	Perturbation
Diminution des capacités de freinage au départ	Evénement courant
Diminution des capacités de freinage en cours de mission	Perturbation
Changement de la vitesse consigne	Evénement courant
Limitation temporaire de vitesse	Perturbation
Changement de l'état de la signalisation	Evénement courant
Dysfonctionnement d'un feu	Perturbation

Tableau 16 : Ensemble des changements à gérer par le sujet lors de l'expérimentation

La Figure 34 illustre les trois phases expérimentales. La phase 0 est une formation suivie d'une familiarisation à la conduite sur la plateforme CoR&GesT. Dans la phase 1, le sujet conduit en gérant un ensemble de changements courants. Enfin, la phase 2 est divisée en deux parties. Dans la première partie, l'opérateur est soumis à des événements perturbateurs. La deuxième partie est consacrée à un changement de l'interface de conduite. Ce changement s'est traduit par deux modifications :

- l'affichage de la vitesse par un compteur digital à la place de l'affichage analogique initial ;
- le changement de la répartition spatiale des éléments d'informations de l'interface (capacité de freinage, missions à effectuer, heure) et du module de communication.

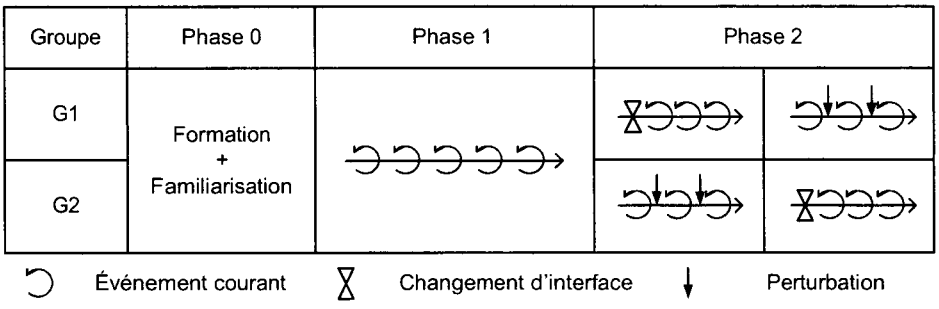


Figure 34 : Les trois phases de l'expérimentation

3.2.1 Phase de formation et de familiarisation

Cette phase est divisée en deux parties. La première partie est consacrée à la présentation de la plateforme et à la formation. Lors de cette formation, plusieurs points sont abordés :

- la présentation de l'interface de conduite ;
- les procédures à appliquer en mode normal ou en mode dégradé ;
- les arrêts en gare ;
- l'utilisation du module de communication.

La deuxième partie est consacrée à la familiarisation pratique à la conduite. Le Tableau 17 ci-dessous détaille le planning de cette familiarisation. Ces scénarios permettent au sujet de prendre connaissance des fonctionnalités de l'interface. Il applique les différentes consignes sous l'œil (à distance) de l'expérimentateur qui peut rappeler les différentes règles à respecter.

Mission	Gare	Arrivée	Départ	Evénement
A	Valenciennes		14:38:29	
	Corbehem	14:40:44	14:41:14	
	Saint-Saulve	14:43:09	14:43:39	Perturbation dysfonctionnement d'un feu
	Denain	14:46:09		
B	Valenciennes		14:48:12	
	Dunkerque	14:50:27	14:50:57	
	Miraumont	14:52:47	14:53:17	Changement feu V → J → O → R → V [1]
	Denain	14:55:17		
C	Valenciennes		15:00:01	
	Corbehem	15:02:16	15:02:46	
	Saint-Saulve	15:04:41	15:05:11	Perturbation suppression de l'arrêt à Dunkerque
	Dunkerque			
	Denain	15:09:56		
B	Valenciennes		15:21:28	
	Dunkerque	15:23:43	15:24:13	Diminution de capacité de freinage de 50 %
	Miraumont	15:26:03	15:26:33	
	Denain	15:28:33		
A	Valenciennes		15:31:01	
	Corbehem	15:33:16	15:33:46	
	Saint-Saulve	15:35:41	15:36:11	Perturbation limitation temporaire de vitesse
	Denain	15:38:41		

[1] Séquence de changement de feu : V=Vert ; J=Jaune ; O=Orange et R=Rouge

Tableau 17 : Planning d'un scénario de familiarisation à la conduite

3.2.2 Phase de conduite avec gestion d'événements courants

La phase 1 est la phase de conduite la plus longue (près d'1h30 suivant les sujets) où le sujet doit gérer des événements courants. L'objectif est de permettre au sujet d'acquérir de l'expérience par rapport aux différents changements qu'il doit gérer. Le Tableau 18 détaille un planning de scénario de gestion d'événements courants.

On retrouve les quatre types de changements courants à gérer :

- changements courants de mission par l'attribution d'une nouvelle mission en gare de Denain (qui est la gare terminus dans tous les cas) ;
- diminution de capacité de freinage au départ d'une mission ;
- changements courants de l'état d'un feu. La signalisation qui apparaît sur l'interface correspond au feu qui se situe à la fin du canton occupé par le train. Le conducteur peut donc observer les différents états pris par la signalisation et agir en conséquence ;
- changements courants de vitesse en passant d'un canton à l'autre.

Mission	Gare	Arrivée	Départ	Evénement
C	Valenciennes		09:40:43	Diminution de capacité de freinage de 30 %
	Corbehem	09:42:58	09:43:28	
	Saint-Saulve	09:45:23	09:45:53	Changement feu : V → J → O → R → V [1]
	Dunkerque	09:48:43	09:49:13	
	Denain	09:51:18		
A	Valenciennes		09:53:21	
	Corbehem	09:55:36	09:56:06	
	Saint-Saulve	09:58:01	09:58:31	
	Denain	10:01:01		
B	Valenciennes		10:03:01	
	Dunkerque	10:05:16	10:05:46	Changement feu : V → O → R → V
	Miraumont	10:08:26	10:08:56	Changement feu : V → J → O → V
	Denain	10:11:41		
A	Valenciennes		10:13:39	Diminution de capacité de freinage de 50 %
	Corbehem	10:15:54	10:16:24	
	Saint-Saulve	10:18:19	10:18:49	
	Denain	10:21:19		
C	Valenciennes		10:23:18	Changement feu : V → R → V
	Corbehem	10:26:18	10:26:48	
	Saint-Saulve	10:28:43	10:29:13	
	Dunkerque	10:32:03	10:32:33	

	Denain	10:34:38		
B	Valenciennes		10:36:55	
	Dunkerque	10:39:10	10:39:40	
	Miraumont	10:41:30	10:42:00	
	Denain	10:44:00		
A	Valenciennes		10:46:34	
	Corbehem	10:48:49	10:49:19	Changement feu : V → J → O →V
	Saint-Saulve	10:51:14	10:51:44	
	Denain	10:54:14		
C	Valenciennes		10:56:25	Changement feu : V → O → R → V
	Corbehem	10:59:25	10:59:55	
	Saint-Saulve	11:01:50	11:02:20	
	Dunkerque	11:05:10	11:05:40	
	Denain	11:07:45		

[1] Séquence de changement de feu : V=Vert ; J=Jaune ; O=Orange et R=Rouge

Tableau 18 : Planning d'un scénario de gestion d'événements courants

3.2.3 Phase de gestion d'événements perturbateurs et de changement d'interface

Lors de ces deux phases expérimentales, l'objectif est d'obtenir des données nécessaires à l'étude de deux facteurs pouvant influencer, selon nous, l'adaptation et/ou la réaction. Il s'agit de l'apparition de changements perturbateurs, correspondant à des modes dégradés et d'un changement d'interface. Le Tableau 19 décrit les scénarios de ces phases, on retrouve dans la première partie les 4 types d'événements perturbateurs déjà évoqués. Lors de la deuxième partie, les changements sont des événements courants afin d'évaluer l'influence du seul changement d'interface. Comme lors de la phase précédente, la conduite est suivie de deux questionnaires d'autoévaluation de la performance et de la gestion des changements.

Mission	Gare	Arrivée	Départ	Evénement
A	Valenciennes		09:47:38	
	Corbehem	09:49:53	09:50:23	Perturbation limitation temporaire de vitesse
	Saint-Saulve	09:52:18	09:52:48	Perturbation dysfonctionnement d'un feu
	Denain	09:55:18		
B	Valenciennes		10:12:19	Diminution de capacité de freinage de 50 %
	Dunkerque	10:14:34	10:15:04	
	Miraumont	10:16:54	10:17:24	
	Denain	10:19:24		
A	Valenciennes		10:21:40	
	Corbehem	10:23:55	10:24:25	Perturbation suppression de l'arrêt de Saint-Saulve
	Saint-Saulve			
	Denain	10:29:20		
B	Valenciennes		10:31:25	Perturbation dysfonctionnement d'un feu
	Dunkerque	10:33:40	10:34:10	Perturbation limitation temporaire de vitesse
	Miraumont	10:36:00	10:36:30	
	Denain	10:38:30		
C	Valenciennes		10:41:28	Perturbation suppression de l'arrêt à Corbehem
	Corbehem			
	Saint-Saulve	10:46:08	10:46:38	Diminution de capacité de freinage de 30 %
	Dunkerque	10:48:48	10:49:18	
	Denain	10:51:23		
A	Valenciennes		11:19:35	Changement feu : V → J → O → R → V [1]
	Corbehem	11:21:50	11:22:20	Changement feu : V → O → V
	Saint-Saulve	11:24:15	11:24:45	
	Denain	11:27:15		
C	Valenciennes		11:29:38	Diminution de capacité de freinage de 20 %
	Corbehem	11:31:53	11:32:23	
	Saint-Saulve	11:34:18	11:34:48	Changement feu : V → O → V
	Dunkerque	11:36:58	11:37:28	
	Denain	11:39:33		
B	Valenciennes		11:41:55	
	Dunkerque	11:44:10	11:44:40	
	Miraumont	11:46:30	11:47:00	
	Denain	11:49:00		
A	Valenciennes		11:51:44	Diminution de capacité de freinage de 40 %
	Corbehem	11:53:59	11:54:29	Changement feu : V → J → O → R → V
	Saint-Saulve	11:56:24	11:56:54	Changement feu : V → R → V
	Denain	11:59:24		
C	Valenciennes		12:01:44	
	Corbehem	12:03:59	12:04:29	Changement feu : V → J → O → V
	Saint-Saulve	12:06:24	12:06:54	
	Dunkerque	12:09:04	12:09:34	
	Denain	12:11:39		

[1] Séquence de changement de feu : V=Vert ; J=Jaune ; O=Orange et R=Rouge

Tableau 19 : Plannings de scénarios de gestion de perturbations et de changement d'interface

3.3 Application de la démarche

Dans cette partie, la démarche spécifique à un enregistrement des paramètres d'exploitation (EPE) proposée dans le chapitre 3 est utilisée. Pour rappel, elle se compose de trois étapes :

- l'identification de l'adaptation et de la réaction qui permet de connaître les configurations de références utilisées dans la gestion des changements ;
- l'identification des dérives qui étudie la gestion de chaque changement et identifie une dérive éventuelle par rapport à la configuration de référence ;
- l'évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité qui évalue les comportements de dérive identifiés par rapport à trois critères de performance qui sont la sécurité, la qualité de service et la charge de travail.

3.3.1 Définition des critères utilisés

.3.3.1.1 Critères d'identification des configurations de référence et de dérives

Afin d'appliquer la démarche méthodologique aux enregistrements des paramètres d'exploitation obtenus par l'expérimentation, il est nécessaire de définir les critères utilisés dans les deux premières étapes d'identification des configurations de référence et des configurations de dérives. Ces critères sont tirés des caractéristiques comparées de l'adaptation et de la réaction humaines rappelées dans le Tableau 20 ci-dessous.

		Adaptation	Réaction
C1	Horizon temporel	Long terme	Court terme
C2	Récupération de l'action	Oui	Non
C3	Coût en terme de ressources attentionnelles	Elevé	Faible
C4	Anticipation du changement	Oui	Non
C5	Fréquence des changements	Faible	Elevée

Tableau 20 : Caractéristiques comparées de l'adaptation et de la réaction humaines.

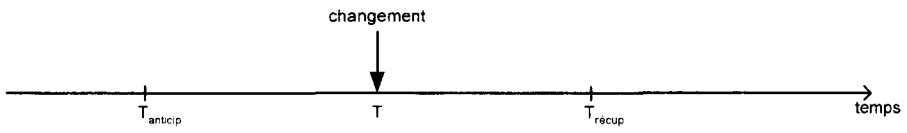


Figure 35 : Positionnement temporel des périodes d'anticipation et de récupération à la suite d'un changement

Le critère C1 (Horizon temporel) est déterminé en calculant la durée du changement exprimée en secondes. Ce critère permet de différencier un changement à court terme qui demande donc une réponse réactive et un changement à long terme dont la réponse sera plutôt adaptative. Le critère C2 (Récupération de l'action) est calculé en observant la ou les actions effectuées pour répondre à un changement. Dans le cas d'une différence entre la consigne et l'action effectuée, on observe s'il existe au moins une action de correction de l'action avant un temps T défini pour chaque type de changement. Dans le cas positif, le critère C2 est égal à la valeur 'Oui'. Le critère C3 (Coût en terme de ressources attentionnelles) n'est pas calculé car les données obtenues lors de l'expérimentation ne sont pas suffisantes afin d'en avoir une évaluation pertinente. Le critère C4 (Anticipation du changement) est calculé en observant la ou les actions effectuées avant l'apparition d'un changement. S'il existe au moins une action de correction de l'action avant un temps T défini pour chaque type de changement. Dans le cas positif, le critère C4 est égal à la valeur 'Oui'. Le critère C5 (Fréquence) est calculé en comptabilisant le nombre de changements observés par minute.

.3.3.1.2 Critères d'évaluation de la performance

Deux types d'évaluation sont disponibles pour ces critères qui ont pour objectif d'évaluer la performance de conduite. Le premier type d'évaluation est une évaluation subjective recueillie à partir des questionnaires décrits dans le chapitre précédent. Le deuxième type d'évaluation est une évaluation objective obtenue de la manière suivante.

Critère sécurité

Deux incidents potentiels influencent le calcul du critère sécurité : le franchissement de signal fermé et la survitesse. Ces deux types d'événement sont à rapprocher des événements redoutés que sont la collision et le déraillement.

La fonction de sécurité $s(t)$ est déterminée par la différence entre la vitesse consigne et la vitesse réelle. Ce calcul prend en compte à la fois les survitesses et les franchissements de signaux. En effet, dans ce deuxième cas, la consigne qui a été donnée aux sujets est d'associer l'information donnée par le feu de signalisation à une vitesse de franchissement. Dans le cas de la consigne d'interdiction de franchissement, la vitesse consigne est de 0 Km/h.

Critère qualité de service

Ce critère correspond au respect des horaires, des missions et des annonces. Une pénalité est donnée en cas de retard sur le planning (elle est égale au retard en secondes), de non desserte

d'une gare (la pénalité est fixée arbitrairement à 100 secondes) ou de manquement à une annonce (la pénalité est fixée arbitrairement à 10 secondes).

La fonction de qualité $q(t)$ est donc évaluée à chaque arrêt en gare et dans le cas d'un événement nécessitant une annonce (suppression d'une gare ou observation d'un dysfonctionnement de la signalisation)

Critère charge de travail

Le critère de charge de travail est évalué à partir du nombre d'interactions de l'opérateur humain avec l'interface mesuré par un compteur.

La fonction de charge de travail $w(t)$ correspond au nombre d'interactions que l'opérateur a eu avec l'interface pendant les cinq dernières secondes. $w(t)$ est incrémentée à chaque « clic » sur l'interface : annonce, changement de consigne de vitesse …

.3.3.1.3 Formalisation des critères

Afin d'obtenir une évaluation de la gravité des critères précédents, les notions de maîtrise et de perte de contrôle sont utilisées. Ces notions permettent de tenir compte de l'historique, c'est-à-dire de l'ensemble des états atteints (en terme de sécurité, de qualité de service ou de charge de travail) par le système [POLET et al., 2002b] [POLET, 2002].

Pour chacune des fonctions de gravité s(t), q(t) et w(t) relative aux trois critères étudiés, une approximation linéaire par morceaux $\hat{g}(t)$ est obtenue en considérant un intervalle de temps $I = [t_{i-1}; t_i]$ suffisamment petit pour lequel que $g(t)$ est monotone sur I. $\hat{g}(t)$ est obtenue à l'aide de l'Équation 3 suivante :

$$\hat{g}(t) = \hat{g}'(t_i).(t - t_{i-1}) + g(t_{i-1}) \text{ avec } \hat{g}'(t_i) = \frac{g(t_i) - g(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}}$$

Équation 3 : Estimation de g(t) sur l'intervalle I

On dira qu'une situation est maîtrisée si la valeur de sa gravité est inférieure au seuil d'acceptabilité S. La surface définie entre la droite $y(t) = S$ et $\hat{g}(t)$ avec $\hat{g}(t) \leq S$, correspond à la surface tolérée Γ_n. La surface définie entre la droite $y(t) = S$ et $\hat{g}(t)$ avec $\hat{g}(t) \geq S$, correspond à la surface non tolérée (Cf. Figure 36), notée Δ_n.

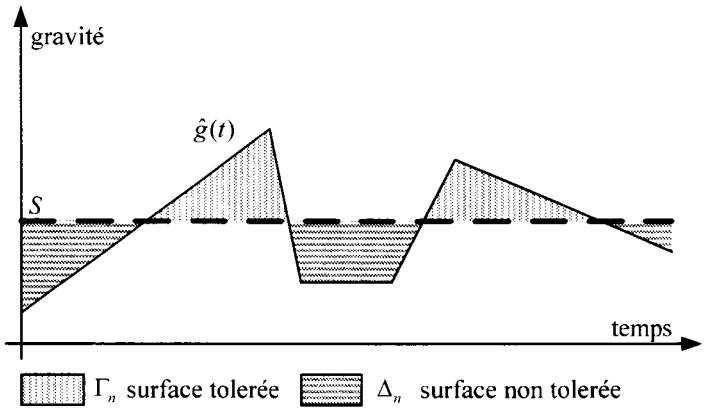


Figure 36 : Surfaces tolérées et non tolérées

Par conséquent, la situation sera d'autant mieux maîtrisée que la surface tolérée est importante. Par ailleurs, la situation sera d'autant moins tolérée que la surface non tolérée est importante. Ainsi, sur une durée donnée, une évaluation de la gravité peut être donnée en effectuant la différence entre la maîtrise de la situation quantifiée par la surface tolérée Γ_n et la perte de contrôle quantifiée par la surface Δ_n.

3.3.2 Identification de l'adaptation et de la réaction

Afin d'analyser l'adaptabilité et la réactivité humaines aux événements courants déclenchés lors de l'expérimentation, on considère les actions effectuées lors de la phase 1 de l'expérimentation et liées aux changements suivants :

- changement de la mission au départ ;
- diminution des capacités de freinage au départ ;
- changement de la vitesse consigne ;
- changement de l'état de la signalisation.

Configuration de référence	Consigne de vitesse	Etat de la signalisation	Mission	Capacité de freinage	Total
Réf 1	149	138	84	16	387
Réf 2	576	0	0	4	580
Réf 3	0	0	0	0	0
Total	725	138	84	20	967

Tableau 21 : Répartition du nombre de configurations de référence identifiées

Le Tableau 21 montre la répartition du nombre d'événements en fonction de la configuration de référence. On constate que pour cette phase, la majorité des actions effectuées (60 %) pour gérer les différents changements correspondent à une configuration de type Réf.2. On a donc

des actions essentiellement adaptatives. Néanmoins la gestion réactive existe également puisque 40 % des actions sont identifiées à une configuration Réf. 1 où l'on trouve à la fois adaptation et réaction.

3.3.3 Identification des dérives

Le Tableau 22 présente les résultats de l'étape d'identification des dérives, on y trouve donc par type de changement, le type de dérive identifié (Dér. 1 à Dér. 10) ou l'absence de dérive (Hdér).

Configuration de référence	Consigne de vitesse	Etat de la signalisation	Mission	Capacité de freinage	Total
Dér.1	186	35	0	0	221
Dér.4	4	0	0	0	4
Dér.7	116	18	0	2	136
Dér.8	116	0	84	0	200
Dér. Adaptation	422	53	84	2	561
Dér.2	61	0	0	0	61
Dér.5	7	0	0	0	7
Dér.9	7	14	0	0	21
Dér.10	16	0	0	0	16
Dér. Réaction	91	14	0	0	105
Dér.3	40	4	0	0	44
Dér.6	3	1	0	0	4
Dér. Ad. & Ré.	43	5	0	0	48
Hdér	169	66	0	18	253
Non identifiés	169	66	0	18	253
Total	725	138	84	20	967

Tableau 22 : Répartition du nombre de changements en fonction du type de dérive

Les résultats de cette phase d'identification sont en cohérence avec l'identification des configurations de référence puisque l'adaptation (et ses dérives potentielles) est beaucoup plus importante que la réaction (58% de tous les changements observés).

La dérive Dér.1 est la dérive la plus fréquemment rencontrée dans la gestion des changements de vitesse et d'état de la signalisation. Les conducteurs ont donc plutôt des comportements basés sur les connaissances au détriment des comportements basés sur les règles.

Tous les changements de missions ont eu pour conséquences des dérives de type Dér.8, il s'agit d'un des types de dérives où la tâche de gestion du changement est effectuée uniquement avec de l'adaptation et à partir de la régulation par les règles. Lorsque l'on regarde plus attentivement ces changements, on constate (cf. annexe 1 - Tableau 30) que ce changement n'a entraîné aucune erreur de la part des sujets. Ceci vient conforter la définition d'une dérive (cf. chapitre 3 §2.2.3) comme source d'erreur ou au contraire de fiabilité.

Enfin, concernant les changements de capacité de freinage, seul 2 changements sur 20 au total, ont permis d'identifier des dérives de type Dér.7.

3.3.4 Evaluation de l'adaptabilité et de la réactivité

Les quatre tableaux suivants présentent les résultats de l'évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité (à travers la répartition des dérives) par rapport aux trois fonctions de gravité s(t) pour la sécurité, q(t) pour la qualité de service et w(t) pour la charge de travail. Pour chacun des critères, les tableaux présentent la moyenne de la différence entre la maîtrise et la perte de contrôle avec un seuil S pris comme étant égal à 0.

Configuration de dérive	Sécurité	Qualité de service	Charge de travail
Dér.1	-702,34	268,76	138,72
Dér.4	-590,63	-26,58	112,84
Dér.7	-672,57	525,32	117,07
Dér.8	-754,13	447,60	111,18
Dér. Adaptation	-707,34	385,64	124,95
Dér.2	-492,85	-23,99	102,23
Dér.5	-375,18	61,80	59,59
Dér.9	-116,17	-12,24	25,21
Dér.10	-1310,30	-457,51	103,56
Dér. Réaction	-598,55	-92,71	93,26
Dér.3	-522,62	14,23	124,20
Dér.6	-318,48	-485,73	79,23
Dér. Ad. & Ré.	-508,38	-20,65	121,06
Hdér	-489,25	1914,51	116,68
Non identifiés	-489,25	1914,51	116,68
Total	-631,04	657,89	113,82

Tableau 23 : Evaluation objective de la performance de conduite en fonction des dérives suite au changement courant de consigne de vitesse

Les résultats du Tableau 23 concernent l'analyse de la tâche de gestion du changement de vitesse consigne, montrent que les dérives d'adaptation sont évaluées positivement par rapport au critère qualité de service. Par contre, ces mêmes dérives dégradent de manière plus importante le critère sécurité.

Les résultats du Tableau 24 ci-dessous concernent l'analyse de la tâche de gestion du changement de l'état de la signalisation. Les résultats sont identiques au tableau précédent. On retrouve les dérives d'adaptation évaluées positivement par rapport au critère qualité de service ; ces mêmes dérives dégradent de manière plus importante le critère sécurité.

Dans ces tableaux, on trouve également le critère charge de travail. On constate pour celui-ci que les dérives de la réaction ont une gravité plus faible que les dérives de l'adaptation. Ceci est cohérent avec les définitions de l'adaptation et de la réaction. En effet la charge de travail apparaît plus élevée pour l'adaptation que pour la réaction

Configuration de dérive	Sécurité	Qualité de service	Charge de travail
Dér.1	-295,00	100,80	63,03
Dér.7	-551,41	-46,89	100,20
Dér. Adaptation	-382,08	50,64	75,65
Dér.9	-151,28	-43,54	9,95
Dér. Réaction	-151,28	-43,54	9,95
Dér.3	-154,10	-59,51	81,77
Dér.6	-36,16	-30,31	14,83
Dér. Ad. & Ré.	-130,51	-53,67	68,38
Hdér	-137,44	14,85	33,38
Non identifiés	-137,44	14,85	33,38
Total	-232,55	20,19	48,51

Tableau 24 : Evaluation objective de la performance de conduite en fonction des dérives suite au changement courant de l'état de la signalisation

Les résultats du Tableau 25, relatif à la gestion du changement de mission, sont cohérents avec les conclusions déduites dans le paragraphe précédent. L'unique type de dérive identifiée Dér.8 est évalué positivement pour la qualité de service. En effet, ce type de changement n'a pas provoqué d'erreur par rapport aux consignes d'actions. Pour rappel, la consigne était, en cas de nouvelle mission, d'annoncer la mission. Or cette annonce fait partie des critères d'évaluation de la qualité de service. Au niveau de la charge de travail, la gravité apparaît élevée par rapport aux autres évaluations obtenues précédemment. Ceci tient certainement au fait que les annonces effectuées demandent beaucoup d'interactions avec l'interface.

Configuration de dérive	Sécurité	Qualité de service	Charge de travail
Dér.8	-9430,87	8367,61	1459,75
Dér. Adaptation	-9430,87	8367,61	1459,75
Dér. Réaction	/	/	/
Dér. Ad. & Ré.	/	/	/
Non identifiés	/	/	/
Total	-9430,87	8367,61	1459,75

Tableau 25 : Evaluation objective de la performance de conduite en fonction des dérives suite au changement courant de mission

Enfin les résultats de la tâche de gestion du dernier changement considéré, celui des capacités de freinage, sont présentés dans le Tableau 25. On y observe principalement que les dérives

Dér.7 identifiées dégradent moins les critères qualité de service et charges de travail. Cette observation est, tout de même, à nuancer puisque l'on a vu que ce type de dérive ne représente que 2 cas sur 20 changements gérés.

Configuration de dérive	Sécurité	Qualité de service	Charge de travail
Dér.7	-8216,63	-3212,96	1491,34
Dér. Adaptation	-8216,63	-3212,96	1491,34
Dér. Réaction	/	/	/
Dér. Ad. & Ré.	/	/	/
Hdér	-9038,70	-7263,11	5705,35
Non identifiés	-9038,70	-7263,11	5705,35
Total	-8956,50	-5283,94	7377,00

Tableau 26 : Evaluation objective de la performance de conduite en fonction des dérives suite au changement courant de capacité de freinage

Grâce à l'obtention de tous ces résultats, on peut estimer le risque en combinant l'occurrence d'apparition d'une dérive d'adaptation et/ou de réaction avec la gravité du critère sécurité. L'estimation du risque lié aux dérives d'adaptation et/ou de réaction pour chacun des changements à gérer est présentée dans le Tableau 27.

Configuration de dérive	Consigne de vitesse	Etat de la signalisation	Mission	Capacité de freinage
Dér.1	182,61	73,75	0	0
Dér.4	5,91	0	0	0
Dér.7	107,61	71,68	0	821,66
Dér.8	120,66	0	9430,9	0
Dér. Adaptation	410,26	145,19	9430,9	821,66
Dér.2	39,43	0	0	0
Dér.5	3,75	0	0	0
Dér.9	1,16	15,13	0	0
Dér.10	26,21	0	0	0
Dér. Réaction	77,81	15,13	0	0
Dér.3	31,36	4,62	0	0
Dér.6	0	0,36	0	0
Dér. Ad. & Ré.	30,5	5,22	0	0
Hdér	112,53	65,97	0	8134,83
Non identifiés	112,53	65,97	0	8134,83
Total	631,04	232,55	9430,9	8956,5

Tableau 27 : Estimation du risque de dérive de l'adaptation et/ou de la réaction pour le critère sécurité

Pour le changement de vitesse, les types de dérives qui présentent le plus de risque du point de vue de la sécurité sont les dérives d'adaptation. La même conclusion peut être faite en ce qui concerne les changements d'état de la signalisation. Pour le changement de mission, le

risque évalué n'est pas comparable avec d'autres dérives puisque l'on identifie un seul type de dérive. Enfin, pour le changement de capacité de freinage, le risque apparaît beaucoup plus faible (l'estimation du risque est dix fois plus faible) pour les dérives Dér.7 identifiées que pour les comportements où aucune dérive n'est identifiée. Ceci est néanmoins à nuancer puisque seules 2 dérives sont identifiées sur 20 changements de capacité de freinage.

Au final, l'évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité humaines est effectuée par une analyse du risque. Il est maintenant possible, grâce au protocole expérimental décrit précédemment, d'analyser l'influence du facteur mode dégradé et changement d'interface sur l'estimation du risque.

.3.3.4.1 Analyse du facteur mode dégradé

Afin d'analyser l'adaptabilité et la réactivité humaines aux changements perturbateurs déclenchés lors de l'expérimentation, on considère les actions effectuées lors de la phase 2.1 de l'expérimentation et liées aux changements suivants :

- diminution des capacités de freinage en cours de mission ;
- limitation temporaire de vitesse ;
- dysfonctionnement d'un feu.

La suppression d'une gare en cours de mission n'est pas étudiée. En effet, les données enregistrées sur la plateforme CoR&GesT n'ont pas permis de calculer les critères indispensables à l'application de la démarche.

Après application de la démarche, on obtient les résultats présentés dans l'annexe 2 §1. On peut en déduire une estimation du risque et comparer cette estimation avec celle obtenue lors de la phase 1.

Le Tableau 28 présente les résultats de cette comparaison. On y trouve, pour les trois types d'événements à gérer, une estimation du risque relative aux événements courants (mode normal) et aux événements perturbateurs (mode dégradé).

Configuration de dérive	Consigne de vitesse		Etat de la signalisation		Capacité de freinage	
	Mode normal	Mode dégradé	Mode normal	Mode dégradé	Mode normal	Mode dégradé
Dér.1	182,61	73,69	73,75	439,44	0	0
Dér.4	5,91	122,1	0	0	0	0
Dér.7	107,61	43,35	71,68	88,43	821,66	0
Dér.8	120,66	30,71	0	0	0	0
Dér. Adaptation	410,26	273,61	145,19	523,74	821,66	0
Dér.2	39,43	0	0	0	0	0
Dér.5	3,75	24,81	0	0	0	0
Dér.9	1,16	0	15,13	0	0	56,91
Dér.10	26,21	0	0	0	0	0
Dér. Réaction	77,81	24,81	15,13	0	0	56,91
Dér.3	31,36	0	4,62	0	0	0
Dér.6	0	0	0,36	0	0	0
Dér. Ad. & Ré.	30,5	0	5,22	0	0	0
Hdér	112,53	83,62	65,97	6,66	8134,83	471,82
Non identifiés	112,53	83,62	65,97	6,66	8134,83	471,82
Total	631,04	382,11	232,55	529,82	8956,5	437,74

Tableau 28 : Estimation du risque lié au critère sécurité comparé entre les événements courants et perturbateurs

Les résultats des estimations présentées dans le Tableau 28 font apparaître que le risque lié à la gestion du changement de consigne de vitesse par des dérives issues de l'adaptation (dont on a vu qu'elles constituaient la majorité des comportements impliqués dans cette gestion) est plus élevé en mode normal qu'en mode dégradé. On constate également que si l'on prend tous les changements (ayant été gérés ou non par des dérives) le risque en mode dégradé est plus faible qu'en mode normal. Ceci est paradoxal puisque l'on peut penser que le risque est plus élevé en mode dégradé qu'en mode normal. Néanmoins ceci peut se justifier par le fait que les changements perturbateurs de vitesse ont eu un taux de réussite plus important (60 % - cf. Annexe 1 Tableau 31) que dans les changements courants de vitesse (30 % - cf. Annexe 1 Tableau 32).

En ce qui concerne la gestion du changement de l'état de la signalisation, les dérives de l'adaptation identifiées comme étant majoritaires, présentent un risque plus élevé en mode dégradé qu'en mode normal. Pour la gestion de changement de capacité de freinage, on constate que le passage de mode normal au mode dégradé a provoqué une modification de la dérive identifiée. Néanmoins, il est difficile de conclure sur ce changement. En effet, dans les deux cas (mode normal ou mode dégradé) les dérives identifiées ne correspondent qu'à très peu de cas (2 changements sur 20 pour le mode normal et 2 changements sur 15 pour le mode dégradé).

Au final, on peut dire que le facteur passage de la gestion d'événements courants à des événements perturbateurs a une influence sur le risque associé aux dérives de l'adaptation et/ou de la réaction.

.3.3.4.2 Analyse du facteur changement d'interface

Afin d'analyser le facteur changement d'interface, la démarche d'évaluation de l'adaptabilité et la réactivité humaines est appliquée aux enregistrements obtenus lors de la phase 2.2 de l'expérimentation par rapport aux changements suivants :

- changement de la mission au départ ;
- diminution des capacités de freinage au départ ;
- changement de la vitesse consigne ;
- changement de l'état de la signalisation.

Après application de la démarche, on obtient les résultats présentés dans l'annexe 2 §2. On peut en déduire une estimation du risque et comparer cette estimation avec celle obtenue lors de la phase 1.

Le Tableau 29 présente les résultats de cette comparaison. On y trouve, pour les quatre types d'événements courants à gérer, une estimation du risque relatif à l'utilisation de l'interface 1 (notée Int1) et de l'interface 2 (notée Int2).

Configuration de dérive	Consigne de vitesse		Etat de la signalisation		Mission		Capacité de freinage	
	Int1	Int2	Int1	Int2	Int1	Int2	Int1	Int2
Dér.1	182,61	155,54	73,75	62,5	0	0	0	0
Dér.4	5,91	11,25	0	0	0	0	0	0
Dér.7	107,61	109,68	71,68	60,43	0	0	821,66	0
Dér.8	120,66	111,36	0	0	9430,9	7798,7	0	0
Dér. Adaptation	410,26	381,72	145,19	123,72	9430,9	7798,7	821,66	0
Dér.2	39,43	31,8	0	0	0	0	0	0
Dér.5	3,75	1,8	0	0	0	0	0	0
Dér.9	1,16	0,59	15,13	3,85	0	0	0	0
Dér.10	26,21	39,11	0	0	0	0	0	0
Dér. Réaction	77,81	71,07	15,13	3,85	0	0	0	0
Dér.3	31,36	31,98	4,62	36,22	0	0	0	0
Dér.6	0	0	0,36	0,85	0	0	0	0
Dér. Ad. & Ré.	30,5	31,98	5,22	37,07	0	0	0	0
Hdér	112,53	65,7	65,97	45,37	0	0	8134,83	822,78
Non identifiés	112,53	65,7	65,97	45,37	0	0	8134,83	822,78
Total	631,04	549,12	232,55	212,48	9430,9	7798,7	8956,5	822,78

Tableau 29 : Estimation du risque lié au critère sécurité comparé par rapport au changement d'interface

Les résultats présentés par ce tableau ne font pas apparaître de différences significatives entre l'évaluation du risque de dérives pour l'interface 1 et celui pour l'interface 2 pour les trois premiers changements qui concernent le changement de consigne de vitesse, de l'état de la signalisation et de la mission à effectuée. Le dernier changement qui concerne la capacité de freinage donne des résultats différents. Premier constat, avec l'interface 1, des dérives de type Dér.7 sont identifiées alors qu'aucune dérive n'est identifiée pour l'interface 2. Deuxième constat, le risque est beaucoup plus faible avec l'interface 2. Compte tenu du fait que la phase 1 (où les sujets utilisaient l'interface 1) permettait d'acquérir de l'expérience de conduite, on peut émettre l'hypothèse que les dérives liées à la gestion des capacités de freinage sont liées à cette acquisition d'expérience.

4 Conclusion

Ce chapitre a commencé par appliquer la démarche méthodologique d'analyse de l'adaptabilité et la réactivité humaines à l'étude d'une base d'incidents de franchissement de signaux. Cette application a permis de mettre en évidence l'importance de la réaction et d'analyser les comportements de dérives impliqués dans les erreurs de franchissement de signaux fermés. Une tentative d'estimation du risque de dérive de l'adaptation et/ou de la réaction a été effectuée. Elle situe la gravité à un niveau équivalent aux erreurs de franchissement de signaux en général. Malheureusement les données ne permettent pas d'accéder à l'occurrence d'une dérive, c'est pourquoi une étude des facteurs influençant l'adaptation et/ou la réaction humaines a été initiée. L'expérience des conducteurs ne semble pas influencer de manière significative l'apparition de dérives d'adaptation et/ou de réaction dans la tâche de franchissement de signal. A l'inverse, les observations concernant le facteur antécédent d'erreurs de conduite semblent montrer l'influence de celui-ci sur les dérives d'adaptation et/ou de réaction. Ceci montre l'intérêt d'obtenir des données complémentaires pour estimer le risque de dérive des conducteurs avec antécédents d'erreurs de conduite afin de confirmer ces résultats.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, la méthode d'obtention d'enregistrements de paramètres d'exploitation est exposée. Il s'agit de données obtenues par la mise en place d'un protocole expérimental sur une plateforme de simulation de conduite ferroviaire CoR&GesT du LAMIH. L'évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité s'effectue par rapport aux tâches de gestion de quatre types de changement qui sont : le changement de vitesse consigne, le changement de l'état de la signalisation, le changement de mission et le changement des capacités de freinage. La principale différence avec l'application à la base d'incidents concerne l'évaluation de la performance qui ne s'effectue plus uniquement avec le critère sécurité mais aussi en prenant en compte la qualité de service et la charge de travail. Enfin l'étude analyse l'influence de deux facteurs influençant potentiellement l'adaptabilité et/ou la réactivité humaines. Cette analyse s'effectue en comparant le risque lié aux dérives identifiées dans chaque modalité des changements. Au final, le changement mode normal/mode dégradé semble avoir une influence sur la gestion des changements de vitesse et d'état de la signalisation. A l'inverse, le changement d'interface ne semble pas avoir eu d'influence sur l'adaptabilité et les réactivités liées à la gestion des changements étudiés.

Chapitre 5 : Discussion et perspectives

1 INTRODUCTION 130

2 DISCUSSION 131

2.1 APPLICATION AUX BASES D'INCIDENTS 131

2.2 APPLICATION AUX ENREGISTREMENTS DES PARAMETRES D'EXPLOITATION 132

2.3 APPORTS ET CRITIQUES DE LA DEMARCHE 133

3 PERSPECTIVES 134

3.1 PERSPECTIVES POUR LES SYSTEMES DE TRANSPORT URBAIN GUIDES 135

3.1.1 Intégration de la démarche dans la maîtrise des risques 135

3.1.2 Analyse du système Tramway 136

3.2 PERSPECTIVES POUR LES SYSTEMES HOMME MACHINE 137

3.2.1 Intégration de la monotonie de la tâche de conduite 138

3.2.2 Intégration du modèle Bénéfice Coût Déficit 138

3.2.3 Intégration de la dimension organisationnelle 139

4 CONCLUSION 140

Chapitre 5 : Discussion et perspectives

1 Introduction

Le chapitre précédent s'est focalisé sur l'application de la démarche à deux types d'ensemble de données que sont les bases d'incidents et les enregistrements des paramètres d'exploitation. Ces applications ont ainsi permis d'évaluer la performance du système Homme Machine du point de vue de la sécurité mais aussi dans le cas des EPE de la qualité de service et de la charge de travail.

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons nous concentrer sur une discussion de l'application de la démarche à chacun des ensembles de données. Puis les apports et critiques de la démarche vont être exposés.

La deuxième partie de ce chapitre expose d'autres perspectives ouvertes par ce travail de thèse. Elles concernent tout d'abord le domaine des transports urbains guidés, puis plus généralement l'étude des systèmes Homme Machine.

2 *Discussion*

L'objet de cette partie est de conclure sur l'application de la démarche aux deux ensembles de données, effectuée dans le chapitre précédent. Il s'agit également d'exposer les apports et les critiques vis-à-vis de la démarche.

2.1 Application aux bases d'incidents

Concernant l'application à la base d'incidents de franchissements de signaux, l'étape d'identification de l'adaptation et de la réaction a montré que la tâche de franchissement de signaux concerne principalement la configuration de référence de type Réf.3. Cette identification est à nuancer lorsque l'on différencie les signaux de manœuvre et les signaux d'espacement. Dans le premier type de signaux, la configuration de référence Réf.3 est majoritaire. Par contre, pour les signaux d'espacement, les deux configurations de référence sont Réf.3 et Réf.2.

La deuxième étape a identifié une forte proportion de configurations de dérives de type Dér.7 et Dér.9. On en conclut que les franchissements de signaux résultent de comportements de dérives où l'opérateur humain n'utilise que de l'adaptation ou de la réaction. Dans chacun de ces cas, la régulation par les règles n'est plus appliquée.

Enfin la dernière étape d'analyse de l'adaptabilité et de la réactivité a tenté d'estimer le risque de dérive de l'adaptation et/ou de la réaction. La gravité est estimée au même niveau que dans le cas général (i.e. des franchissements de signaux pour lesquels aucune dérive n'est identifiée). Malheureusement l'occurrence des dérives ne peut être estimée car la base d'incident ne fournit pas la valeur de la sollicitation c'est-à-dire le nombre de signaux rencontrés fermés par les conducteurs. L'étude de deux facteurs pouvant influencer l'adaptabilité et la réactivité a donc été effectuée. L'expérience des conducteurs ne semble pas influencer de manière significative, l'apparition de dérives d'adaptation et/ou de réaction dans la tâche de franchissement de signal. A l'inverse, les observations concernant le facteur antécédent d'erreurs de conduite semble influencer les dérives d'adaptation et/ou de réaction.

Au final, l'absence de données sur la sollicitation liée au changement des signaux ainsi que l'hypothèse formulée selon laquelle les antécédents d'erreur de conduite ont une influence sur

la gestion des changements montre l'intérêt d'obtenir des données complémentaires sur ce type de base d'incidents.

Au final, l'application de la démarche a permis de mieux comprendre les comportements de dérives impliqués dans les franchissements de signaux fermés notamment par l'identification de deux types principaux de dérives Dér.7 et Dér.9. Elle permet d'affirmer que les franchissements de signaux sont le résultat, pour une grande partie d'entre eux, de comportements s'appuyant uniquement sur l'adaptation ou sur la réaction en n'utilisant pas du tout la régulation basée sur les règles.

2.2 Application aux enregistrements des paramètres d'exploitation

Concernant l'application de la démarche aux enregistrements des paramètres d'exploitation fournis par la campagne expérimentale sur la plateforme Cor&GesT, les résultats sont les suivants. La première étape d'identification de l'adaptation et de la réaction a montré que la tâche de gestion du changement de vitesse consigne concerne les configurations Réf.1 et Réf.2. Pour les trois autres changements, c'est exclusivement la configuration Réf.1 qui a été identifiée.

La seconde étape d'identification des dérives a montré une importance de l'identification des dérives de type Dér.1 pour les tâches de gestion de changement de vitesse consigne et de l'état de la signalisation. Ce type de dérives concerne un comportement de gestion du changement basé sur une régulation à partir des connaissances sans faire appel à la régulation par les règles. La gestion du changement de mission a permis d'identifier des dérives de type Dér.8 correspondant à des comportements d'adaptation n'utilisant pas la régulation par les connaissances. Enfin concernant la gestion du changement de capacité de freinage, seules 2 dérives sur 20 changements à gérer ont été identifiées.

La troisième étape a fourni des évaluations de l'adaptabilité et de la réactivité humaines (identifiées par les dérives de l'étape précédente), pour les quatre changements étudiés, par rapport au trois critères : sécurité, qualité de service et charge de travail. Les résultats de cette évaluation ont montré que concernant l'analyse de la tâche de gestion du changement de vitesse consigne et de l'état de la signalisation, les dérives d'adaptation sont évaluées positivement par rapport au critère qualité de service. Ceci montre que la valeur de la maîtrise

de la qualité de service a été supérieure à la perte de contrôle. Par contre, ces mêmes dérives dégradent de manière plus importante le critère sécurité que la gestion des changements pour lesquels aucune dérive n'a été identifiée. Pour la gestion du changement de mission, l'adaptabilité identifiée par les dérives Dér.8 correspond à une maîtrise de la gravité liée au critère qualité de service. Au niveau de la charge de travail, la gravité apparaît élevée par rapport aux autres évaluations obtenues précédemment. Enfin le dernier changement considéré est celui des capacités de freinage. On observe principalement que les dérives Dér.7 identifiées dégradent moins les critères qualité de service et charges de travail. Cette observation est, tout de même, à nuancer puisque l'on a vu que ce type de dérive ne représente que 2 cas sur 20 changements gérés.

Tous ces résultats montrent la possibilité d'appliquer la démarche à un enregistrement des paramètres d'exploitation. Celui-ci présente plusieurs avantages par rapport aux bases d'incidents :

- pouvoir effectuer une analyse continue du comportement de l'opérateur de conduite ;
- pouvoir prendre en compte le double aspect fiabilisant ou source d'erreur de l'opérateur de conduite ;
- pouvoir évaluer la performance sur d'autres critères que la seule sécurité.

L'application effectuée doit être considérée comme une illustration ne permettant pas véritablement de tirer des conclusions quand à la gestion des différents changements sur des réseaux de transports guidés réels. En effet, l'intégralité des sujets ne connaissait pas la conduite ferroviaire et les données résultantes présentent des dispersions importantes (caractérisées par de grand écart-types). Ceci est certainement à l'origine de l'absence d'identification de configuration de référence Réf.3, où la réaction est requise seule. Dans le cas de la gestion des changements de l'état de la signalisation, cette identification aurait été logique compte tenu des résultats de l'application de la démarche à la base d'incidents précédente.

2.3 Apports et critiques de la démarche

De manière générale, la démarche d'évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité humaines a rempli les objectifs d'amélioration de la prise en compte du facteur humain dans l'analyse des systèmes de transport urbains guidés. En effet, la démarche permet d'évaluer l'adaptabilité et

la réactivité humaines pas rapport à d'autres critères que la sécurité. C'est un point qui a été démontré par l'application de la démarche aux enregistrements des paramètres d'exploitation. L'évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité prend en compte le double aspect (source de fiabilité ou d'erreur) de la contribution de l'opérateur humain dans le système. Rappelons que cette problématique faisait partie des besoins tirés des conclusions du chapitre 1. La prise en compte de la variabilité de la contribution de l'opérateur est notamment permise par le calcul des critères utilisant la maîtrise et la perte de contrôle de la fonction de gravité associée à chaque critère.

L'évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité humaines est faite de manière objective. En effet, en ce qui concerne l'application aux EPE, aucune connaissance particulière de la conduite n'est nécessaire pour appliquer la démarche si ce n'est la définition du changement et des actions requises pour y répondre. Dans les deux cas d'application étudiée, l'étude peut être effectuée de manière indépendante de connaissances particulières sur le facteur humain. A l'ingénieur fiabiliste en charge d'évaluer l'impact d'une modification des contraintes d'exploitation, elle permet de fournir une évaluation de la performance des dérives actuelles en terme de sécurité bien sûr mais aussi de qualité de service par exemple. Dans ce contexte, la démarche et ses résultats constituent une aide précieuse.

Par contre des limites à la démarche peuvent être également évoquées. Le premier point concerne évidemment la nécessité d'appliquer la démarche propre aux enregistrements des paramètres d'exploitation sur des données réelles. Outre ce point qui n'est pas spécifique à la démarche en elle-même, c'est aussi le positionnement a posteriori de l'évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité qui peut constituer une limite. En effet, dans le cadre d'une étude (de risque notamment) préalable à l'exploitation d'une ligne de transport urbain guidé, cette démarche n'est pas applicable puisqu'elle nécessite une définition des tâches prescrites ainsi que l'observation du comportement des conducteurs. On peut néanmoins envisager son application dans une configuration en ligne. Ceci peut constituer une première perspective à ce travail.

3 *Perspectives*

Plusieurs autres perspectives peuvent être envisagées après cette étude. C'est l'objet de cette partie qui commence par celles propres au domaine des transports urbains guidés. Puis d'autres perspectives feront l'objet de l'étude, plus général, des systèmes Homme Machine.

3.1 Perspectives pour les systèmes de transport urbain guidés

Les premières perspectives de cette étude concernent les systèmes de transport urbain guidés par l'intégration de la démarche dans le processus de maîtrise des risques. Cette intégration est présentée en deux parties. Tout d'abord en explicitant l'intérêt de la démarche par rapport à plusieurs problématiques puis en l'illustrant d'un exemple, celui du système tramway.

3.1.1 Intégration de la démarche dans la maîtrise des risques

.3.1.1.1 Analyse quotidienne des événements d'exploitation

La démarche proposée peut être utilisée comme un moyen d'analyse quotidien des événements d'exploitation. En effet tous les jours, des événements d'exploitation survenus sur les différents réseaux de transport sont répertoriés dans des bases de données. Actuellement aucune démarche analytique effectuée sur ces bases ne se focalise sur l'action humaine dans sa gestion des changements. Or, comme on l'a vu dans ce mémoire, les deux capacités qui caractérisent cette gestion (l'adaptabilité et la réactivité humaines) sont pertinentes dans l'évaluation de la contribution humaine dans la conduite.

Il serait donc intéressant d'utiliser la démarche dans le cas où les premières remontées d'informations laissent apparaître une gestion d'un changement de manière différente des modes normaux. L'application de la démarche serait d'autant plus facile qu'une évaluation des conséquences sur l'exploitation (kilomètres perdus – dans les objectifs de service fixés par le Syndicat des Transport d'Ile de France – ou retard pris sur les horaires) est systématiquement associée à chacun des événements de ces bases.

.3.1.1.2 Analyse individuelle des conducteurs afin de mettre en exergue des stratégies

La deuxième perspective d'application de la démarche à l'étude des transports urbains guidés concerne l'évaluation des différences interindividuelles qui peuvent être observées. En effet, des observations ont montré que les conducteurs emploient différentes stratégies qui les conduisent à plus ou moins se rapprocher du cadre prescrit [TERRAL, 2007]. Un exemple de ces différences concerne la stratégie de gestion de la vitesse dans la conduite de métro Certains conducteurs préfèrent notamment un contrôle ponctuel, ils favorisent alors un tracé

d'activité en dent de scie, accélérant et freinant de manière plus prononcée mais moins régulière.

L'application individuelle de la démarche à chacun des conducteurs permettrait d'identifier les différentes stratégies en les caractérisant par les différentes dérives proposées dans le modèle MAdRéH. Ainsi, par rapport à la gestion de la vitesse, on peut distinguer une approche plus adaptative favorisant une supervision continue et une approche réactive basée sur des interventions ponctuelles en réponse à des éléments précis.

Au final, l'application de la démarche permettrait d'avoir une sorte de cartographie des stratégies des opérateurs de conduite dans les tâches nécessitant la gestion de changements. L'intérêt pourrait être ensuite d'adapter en conséquence les modules de formation.

3.1.2 Analyse du système Tramway

Un exemple qui illustre les perspectives d'application de la démarche concerne la gestion des changements par le machiniste en charge de la conduite de tramway. La situation particulière du machiniste est rappelée dans la Figure 37. On y constate que l'opérateur doit gérer deux types de changements :

- le changement de matériel d'un matériel tramway à un matériel bus ;
- le changement d'environnement de conduite de site protégé ou de site urbain.

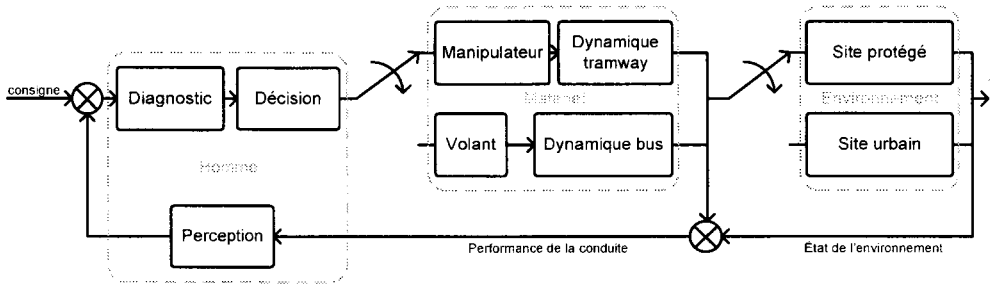


Figure 37 : Problématique de la conduite de tramway

L'influence du changement de site d'évolution pourrait être étudiée à partir de la base d'accidentologie tramway du STRMTG (Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés). En effet celle-ci présente des champs basés sur une codification du lieu d'accident qui permettrait de déterminer précisément le type de site. Par contre, cette même base se limite aux accidents alors que plus généralement ce sont les incidents qui seraient intéressant d'analyser.

En ce qui concerne l'utilisation d'enregistrement des paramètres d'exploitation, le STRMTG préconise l'utilisation de dispositifs type « boite noire » [STRMTG, 2007]. Le fait que ces enregistrements soient principalement utilisés en cas d'accidents limite la portée de leurs informations à quelques kilomètres. Afin d'appliquer la démarche d'analyse de l'adaptabilité et de la réactivité humaines, il serait intéressant de disposer d'enregistrements des paramètres d'exploitation facilement accessibles et relatifs à une durée d'enregistrement de l'ordre de la journée d'exploitation Cette remarque constitue une recommandation pour la spécification des futures matériels roulant de type tramway. Ceci est d'autant plus important si l'organisation de l'exploitation des nouvelles lignes de tramway en projet continue à utiliser la polyvalence des machinistes tramway et bus.

3.2 Perspectives pour les systèmes Homme Machine

Comme nous l'avons vu dans l'exemple du tramway, l'analyse de l'adaptabilité et de la réactivité humaines se justifie par le fait que l'opérateur doit gérer plusieurs types de véhicules dans plusieurs environnements potentiels d'évolution. Ceci peut être généralisé à tous les systèmes Homme Machine, où l'opérateur peut être confronté à plusieurs interfaces associées à plusieurs dynamiques pour un procédé. De plus la tâche de l'opérateur de conduite peut s'effectuer dans plusieurs contextes comme cela est indiqué dans la Figure 38.
On peut donc envisager des perspectives d'enrichissement de la modélisation et/ou de la démarche d'évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité humaines pour l'étude des systèmes Homme Machine.

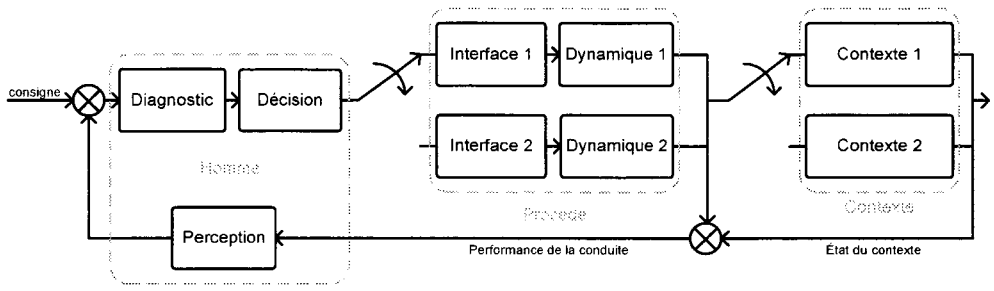


Figure 38 : Problématique de l'adaptabilité et de la réactivité humaines dans la conduite de système Homme Machine

3.2.1 Intégration de la monotonie de la tâche de conduite

Le premier point relatif à l'étude des systèmes homme machine concerne l'intégration de la monotonie de la tâche de conduite. L'exemple de la conduite automobile [SONNERAT et al., 2004] ou de la conduite de métro [TERRAL, 2007] montre l'importance de ce phénomène. Dans la conduite automobile, la monotonie est associée au danger apporté par les phénomènes d'hypovigilance du conducteur. La situation monotone y est caractérisée par des activités prolongées et répétitives de faibles difficultés avec une impossibilité pour l'esprit de se dégager ou par des activités de surveillance prolongées avec une faible fréquence d'excitation [GRANDJEAN, 1972] [SCHERRER, 1981]. On retrouve dans ces deux aspects la distinction qui peut être faite entre adaptation et réaction.
L'intégration de la problématique de la monotonie dans la démarche pourrait donc se faire en caractérisant le degré de monotonie à partir de l'évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité humaines.

3.2.2 Intégration du modèle Bénéfice Coût Déficit

L'une des questions que peut susciter l'analyse de l'adaptabilité et la réactivité humaines concerne le positionnement des dérives par rapport aux violations. Nous avons déjà vu qu'une dérive n'implique pas forcément une erreur de la part de l'opérateur humain. Néanmoins il peut être intéressant de comparer l'analyse des dérives d'adaptation et/ou de réaction avec l'évaluation basé sur le modèle BCD (Bénéfice – Coût – Déficit) [VANDERHAEGEN, 2003]. En effet, ceci peut être une manière de formaliser le processus de décision qui fait que l'opérateur choisisse un type de dérive plutôt qu'un autre. Dans ce cas, on peut utiliser de calcul de l'utilité espérée [CHAALI, 2007] du passage de la dérive $Dér_i$ vers une dérive $Dér_j$.

$$u(Dér_i / Dér_j) = \sum B_l + \sum C_l + \sum D_l$$

Équation 4 : Calcul de l'utilité espérée du passage d'une dérive $Dér_i$ à une dérive $Dér_j$

où - $\sum B_l$ est la somme des bénéfices pour les critères de performance de l'activité de conduite obtenus en cas de passage de $Dér_i$ à $Dér_j$;
- $\sum C_l$ est la somme des coûts immédiats pour les critères de performance de l'activité de conduite obtenus en cas de passage de $Dér_i$ à $Dér_j$;
- $\sum D_l$ est la somme des déficits potentiels pour les critères de performance de l'activité de conduite obtenus en cas de passage de $Dér_i$ à $Dér_j$;

3.2.3 Intégration de la dimension organisationnelle.

La démarche proposée dans ce mémoire est une étude centrée sur l'homme. Nous pouvons nous poser la question du rôle de l'organisation. En effet celle-ci est souvent identifiée comme la cause d'accidents importants (collision de Paddington en 1999 ou l'explosion d'AZF en 2001).

Par rapport à la problématique d'intégration de la dimension organisationnelle dans la démarche d'évaluation de l'adaptabilité et de la réactivité humaines, deux perspectives sont envisageables. La première concerne la prise en compte des changements organisationnels, comme la modification d'une structure hiérarchique par exemple, dans le comportement individuel des opérateurs. Cette problématique fait d'ailleurs l'objet d'une thèse [TILLEMENT et al., 2008] dont le terrain d'étude fait partie de la RATP. L'autre perspective concerne la propagation des erreurs selon le concept de risque système [PERROW, 1984]. Dans cette optique une dérive d'un opérateur, observée à l'échelle microscopique, peut avoir des conséquences sur le système à l'échelle macroscopique du fait de sa complexité sociotechnique.

4 Conclusion

Dans la première partie, les résultats de l'application de la démarche méthodologique à une base d'incidents ont été présentés et commentés. Ils font principalement apparaître que l'analyse de la base d'incidents a permis de mieux comprendre les dérives impliquées de franchissement de signaux fermés. Par contre, l'estimation du risque n'est pas complètement aboutie par manque d'information fournie par la base. En ce qui concerne l'application aux enregistrements des paramètres d'exploitation, celle-ci a permis d'illustrer l'opportunité d'appliquer la démarche à ce type de données. Au final, les apports de la démarche concernent la prise en compte du double aspect fiabilisant et source d'erreur de l'opérateur humain dans une démarche d'évaluation de sa performance de conduite. L'autre apport de la démarche concerne le fait qu'elle est applicable sans connaissances préalables du facteur humain mais seulement avec des connaissances de la tâche de conduite. Les limites de la démarche concernent, tout d'abord, l'application de la démarche aux EPE qui doit encore être appliquée à des données réelles. L'autre limite est ensuite le fait que la démarche se situe a posteriori des actions de l'opérateur et ne permet donc pas une analyse temps réel ou prospective de l'adaptabilité et de la réactivité humaines.

Enfin les perspectives de cette étude de l'adaptabilité et de la réactivité humaines concernent tout d'abord son utilisation dans la démarche de maîtrise des risques. Ceci pourrait s'effectuer par l'analyse quotidienne des événements d'exploitation ou par l'évaluation individuelle des stratégies des conducteurs. En ce qui concerne l'étude des systèmes Homme Machine, l'application de la démarche d'analyse de l'adaptabilité et de la réactivité humaines permettrait d'évaluer la monotonie de la tâche de conduite qui est une source potentielle d'hypovigilance notamment dans la conduite automobile. La méthode BCD serait également un bon moyen d'évaluer le processus de passage d'une dérive de l'adaptation et/ou de la réaction à une autre dérive. Enfin, l'aspect organisationnel pourrait être pris en compte en abordant la question de la gestion individuelle de changement organisationnel ou celle de la propagation des dérives dans l'organisation.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire de thèse contribue à l'amélioration de la prise en compte du facteur humain dans l'analyse des risques des systèmes Homme Machine. L'objectif de nos travaux était de proposer une approche d'évaluation de deux capacités importantes de l'opérateur humain de conduite de transport urbain guidés : l'adaptabilité et la réactivité. Cet objectif est le résultat d'un constat faisant apparaître les faiblesses des méthodes actuelles qui ne prennent pas en compte l'homme comme source de fiabilité ou d'erreur. Nous avons proposé une modélisation MAdRéH (Modélisation de l'Adaptabilité et de la Réactivité Humaines) prenant en compte l'adaptabilité et la réactivité ainsi qu'une démarche permettant d'évaluer les comportements humains de dérives pour le système.

Dans le premier chapitre, nous avons traité de la problématique du risque dans les systèmes Homme Machine. L'évaluation de ce risque et les moyens de défense face aux dangers y sont présentés. Dans ce cadre, l'opérateur apparaît comme une source de fiabilité ou d'erreur potentielle. Le second chapitre a concerné plus spécifiquement le domaine des transports urbains guidés. La description du système effectuée à travers une présentation des risques spécifiques et des éléments le constituant a permis d'en comprendre les particularités. La question de la place de l'opérateur humain a ensuite été abordée afin de montrer son omniprésence et l'importance de sa prise en compte. La nécessité d'obtenir un modèle de l'opérateur humain a justifié l'analyse fonctionnelle du métier de conducteur. Celle-ci a permis de comprendre les fonctions et les exigences de la conduite de transport urbain guidé. Parmi les fonctions qui lui sont allouées, la plus pertinente est sans nul doute la capacité qu'il doit mettre en place afin de gérer les événements.

Le troisième chapitre a défini les concepts d'adaptabilité et de réactivité humaines au centre de la gestion de ces événements. La modélisation MAdRéH s'inspirant de travaux en ingénierie cognitive a été proposée ainsi que des critères d'identification de l'adaptation et de la réaction. Par la suite, la démarche d'analyse de l'adaptabilité et de la réactivité a été présentée. Celle-ci est constituée de trois étapes : l'identification de l'adaptation et de la réaction, l'identification des dérives et l'analyse de l'adaptabilité et de la réactivité.

Le quatrième chapitre a présenté l'application de la démarche à deux ensembles de données :

- une base d'incidents de franchissement de signaux obtenue à partir de la base REx de la RATP;
- un enregistrement des paramètres d'exploitation obtenu par une expérimentation de simulation de conduite ferroviaire effectuée au LAMIH sur la plateforme CoR&GesT (Conduite sur Rail et Gestion de Trafic).

Au final, le cinquième chapitre présente les apports de la démarche. Elles concernent d'abord la prise en compte du double aspect fiabilisant et source d'erreur de l'opérateur humain dans une démarche d'évaluation de sa performance de conduite. L'autre apport de la démarche est le fait qu'elle est applicable sans connaissances préalables du facteur humain mais seulement avec des connaissances de la tâche de conduite. Les perspectives de cette étude concernent tout d'abord son utilisation dans la démarche de maîtrise des risques. Ceci pourrait s'effectuer par l'analyse quotidienne des événements d'exploitation ou par l'évaluation individuelle des stratégies des conducteurs. En ce qui concerne l'étude des systèmes Homme Machine, l'application de la démarche d'analyse de l'adaptabilité et de la réactivité humaines permettrait d'évaluer la monotonie de la tâche de conduite qui est une source potentielle d'hypovigilance notamment dans la conduite automobile. La méthode BCD serait également un bon moyen d'évaluer le processus de passage d'une dérive de l'adaptation et/ou de la réaction à une autre dérive. Enfin, l'aspect organisationnel pourrait être pris en compte en abordant la question de la gestion individuelle des changements organisationnels ou celle de la propagation des dérives dans l'organisation.

Bibliographie

[AFGI, 1991]

AFGI, 1991, *Evaluer pour évoluer: pilotage et évaluation de la performance industrielle*

[AMENDOLA et al., 1985]

Amendola A., Reina G., Ciceri, F., 1985, *Dynamic simulation of Man-Machine interaction in incident control*, Paper in IFAC Man-Machine Systems Conference, Varese, Italy.

[AMALBERTI, 1996]

Amalberti R., 1996, *La conduite de systèmes à risques*, Le Travail Humain, Presses Universitaires de France, 242p.

[AMALBERTI, 1997]

Amalberti R., 1997, *Paradoxes aux confins de la sécurité absolue*, Annales des mines.

[BARTHE et al., 2004]

Barthe B., Gadbois C., Prunier-Poulmaire S., Queinnec Y., 2004, *Travailler en horaires atypiques*, in Falzon, P. Ergonomie. PUF, Paris.

[BEUGIN, 2006]

Beugin J., 2006, *Contribution à l'évaluation de la sécurité des systèmes complexes de transport guidé*. Thèse de doctorat. Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis Valenciennes.

[CACCIABUE et al., 1992]

Cacciabue, P.C., Decortis, F., Drozdowicz, B., Masson M. and Norvik, J-P., 1992, *COSIMO : a cognitive simulation model of human decision making and behaviour management of complex plants*, IEEE Trans on Systems Man Cybernet 22, (5), 1058-1074.

[CASTRO et HORBERRY, 2004]

Castro C., Horberry T., 2004, *The Human Factors of Transport Signs*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

[CE-DG ET, 1992]
Commission Européenne DG Énergie et Transports, 1992,*Une nouvelle vie pour le rail en Europe*. Brochure ISBN 92-894-4286-7

[CELLIER, 1996]
Cellier J.M., 1996, *Exigences et gestion temporelle dans les environnements dynamiques*. In J.- M. Cellier, V. De Keyser & C. Valot (Eds.) La gestion du temps dans les environnements dynamiques. Paris : Presses Universitaires de France.

[CHAALI, 2007]
Chaali-Djelassi A., 2007, *Modélisation et prédiction des franchissements de barrières basées sur l'utilité espérée et le renforcement de l'apprentissage. Application à la conduite automobile*. Thèse de doctorat. Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, mai.

[CHAALI et al, 2007]
Chaali-Djelassi A., Vanderhaegen F., Cacciabue P C., Cassani M., 2007, *Barrier Removal prediction based on a new approach. Application to a degraded train speed procedure.* EAM'07, Copenhague, juin.

[CHALANDON, 2007]
Chalandon X., 2007, *Conscience de la situation : invariants internes et invariants externes.* Thèse de doctorat. Conservatoire National des Arts et Métiers.

[CHEN et al., 2007]
Chen, C.-M., Lin, C.-W., Chen, Y.-C., 2007, *Adaptive error-resilience transcoding using prioritized intra-refresh for video multicast over wireless networks*. Signal Processing: Image and Communication, 22, pp.277-297.

[COINTET et LAVAL, 2006]
Cointet A., Laval C, 2006, *Défense en Profondeur - Appropriation du concept par la RATP,* document interne RATP, Contrôle Général de Sécurité, Maîtrise des Risques d'Entreprise.

[COTTERILL et JONES, 2005]
Cotterill R., Jones H., 2005, *The HSE revised fatigue index in the rail industry: from application to understanding*. In: J.R. Wilson, B.J. Norris, T. Clarke and A. Mills, Editors, Rail Human Factors: Supporting the Integrated Railway, Ashgate Publishing, London, pp.215–223.

[DA SILVA, 2006]
Da Silva, L., 2006, *L'erreur humaine en conduite de Tramway*. Rapport Master 2 Ergonomie et conception des systèmes de travail, Université Charles-de-Gaulle Lille3.

[DEBERNARD, 1993]
Debernard, S., 1993, *Contribution à la répartition dynamique de tâches entre opérateur et système automatisé : application au contrôle du trafic aérien*. Thèse de doctorat. Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.

[EMBREY, 1986]
Embrey, D.E., 1986, SHERPA : A Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach. Paper presented at the International Topical Meeting on Advances in Human Factors in Nuclear Power Systems, Knoxville, Tennessee

[ENDSLEY, 1995]
Endsley, M.R., 1995, *Toward a theory of situation awareness in dynamic systems*. Human Factors, 37 (1), pp.32-64.

[EPSF, 2007]
Etablissement Public de Sécurité Ferroviaire, 2007, *L'autorité française de sécurité ferroviaire*. Plaquette de présentation.

[ETSC, 2003]
European Transport Safety Council, 2003, *Statistique sur le transport dans l'union européenne sur la période 2001 - 2002*.

[FADIER, 1990]
Fadier E., 1990, *Fiabilité Humaine : Méthodes d'analyse et domaines d'application.* Editions Octares.

[GERBINO et STRANO, 2002]
Gerbino W., Strano F., 2002, *Testing the interface of a cab signalling system.* In: D. de Waard, K.A. Brookhuis, J. Moraal and A. Toffetti, Editors, Human Factors in Transportation, Communication, Health, and the Workplace, Shaker Publishing, Maastricht, The Netherlands, pp.255–264.

[GIBSON, 1979]
Gibson, J.J., 1979, *The ecological approach to visual perception.* Boston : Houghton-Mifflin.

[GOGUELIN, 1988]
Goguelin P., 1988, *Risque et prise de décision*, Editions Octares.

[GOUIN et al., 2001]
Gouin V., Sagot J.C., Roussel B, 2001, *Train drivers' fatigue during a seven hour daytime trip.* In: D. Harris, Editor, Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics, vol. 5: Aerospace and Transportation Systems, Ashgate Publishing, Aldershot, Hampshire, pp.455–462.

[GOUSSE, 2005]
Goussé V., 2005, *Apport de la génétique dans les études sur la résilience : l'exemple de l'autisme.* Annales Médico-Psychologiques, Sous presse.

[GRABAREK, 2002]
Grabarek I., 2002, *Ergonomic diagnosis of the driver's workplace in an electric locomotive*, International Journal Occup. Safety Ergon. 8 (2), pp.225–242.

[GRANDJEAN, 1972]
Grandjean, E., 1972, *Précis d'ergonomie, organisation physiologique du travail*, Dunod, Paris.

[HADJ-MABROUK et al., 1998]
Hadj-Mabrouk H., Sturapu A., Bied-Charreton D., 1998, *Exemple de typologie d'accidents dans le domaine des transports guidés*. Revue générale des chemins de fer. pp.17-55, mars.

[HAMILTON et CLARCKE, 2005]
Hamilton I., Clarke T., 2005, *Driver performance modelling and its practical application to railway safety.* In: J.R. Wilson, B.J. Norris, T. Clarke and A. Mills, Editors, Rail Human Factors: Supporting the Integrated Railway, Ashgate Publishing, London, pp.25–39.

[HAREL et PNUELI, 1985]
Harel D., Pnueli A., 1985, *On the development of reactive systems*, NATO ASI Series, Vol. F13, Logics and Models of Concurrent Systems, Edited by K.R. Apt, Springer-Verlag, Berlin, january.

[HOC et AMALBERTI, 1994]
Hoc J.M., Amalberti R., 1994, *Diagnostic et prise de décision dans les situations dynamiques*. Psychologie Française, 39 (2).

[HOLLNAGEL et EMBREY, 1994]
Hollnagel E., Embrey D.E., 1994, *Human Reliability Assessment in Safety Assessment: Adressing Cognitive and Actions Errors*. HRA Ltd, Parbold, Lancashire

[HOLLNAGEL, 1998]
Hollnagel E., 1998, *Cognitive Reliability and Error Analysis Model*, Elsevier Science Ed, New York.

[HOLLNAGEL, 1999]
Hollnagel E., 1999, *Accident and barriers*, 7th European Conference on Cognitive Science Approaches to Process Control, 21-24 Septembre, Villeneuve d'Ascq, France.

[HOLLYWELL, 2005]
Hollywell P., 2005, *ORAM: a structured method for integrating human factors into SPAD risk assessment.* In: J.R. Wilson, B.J. Norris, T. Clarke and A. Mills, Editors, Rail Human Factors: Supporting the Integrated Railway, Ashgate Publishing, London, pp.189–200.

[IEF, 2004]
IEF (Ingénierie d'Exploitation Ferroviaire), 2004, *Réflexions sur le pourquoi et le comment des fautes vis-à-vis de la Réglementation de Sécurité Ferroviaire.* Document interne RATP, janvier.

[IEF, 2005]
IEF (Ingénierie d'Exploitation Ferroviaire), 2005, *Enregistrement des Paramètres d'Exploitation et des évènements de conduite des matériels roulants METRO.* Directive IEF 034, document interne RATP.

[IMR-CIT-03]
BUS/IE/SFT, 2005, *Procédures défaut Citadis TW01.* Instruction Matériel Roulant N°IMR-CIT-03, document interne RATP.

[INERIS, 2004]
Ineris, 2004, *ARAMIS : Développement d'une méthode intégrée d'analyse des risques pour la prévention des accidents majeurs*, Rapport Final, septembre.

[ITOH et al., 2001]
Itoh K., Arimoto M., Akachi Y., 2001, *Eye-tracking applications to design of a new train interface for the Japanese high-speed railway.* In: M.J. Smith, G. Salvendy, D. Harris and R.J. Koubek, Editors, Usability Evaluation and Interface Design: Cognitive Engineering, Intelligent Agents and Virtual Reality, Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, New Jersey, pp.1328–1332.

[JOUGLET, 2000]
Jouglet D., 2000, *Coopération Homme Machine pour le diagnostic technique : application aux dérangements téléphoniques.* Thèse de doctorat. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.

[KECKLUND, 2001]
Kecklund L., Ingre M., Kecklund G., Söderström M., Åkerstedt T., Lindberg E., Jansson A., Olsson E., Sandblad B., Almqvist P., 2001, *The TRAIN-Project: Railway safety and the train driver information environment and work situation.* Signalling safety 2001, 26-27 février, London.

[KIRWAN, 1997]
Kirwan B., 1997, *Validation of human reliability assessment techniques: Part 1 - Validation issues*, Safety Science Vol. 27, No. 1, pp.25-41.

[KIRWAN, 1998]
Kirwan B., 1998, *Human error identification techniques for risk assessment of high risk systems: Part 1 – Review and evaluation techniques*, Applied Ergonomics Vol. 29, No. 3, pp.157-177.

[KIRWAN et JAMES, 1989]
Kirwan, B., James, N. J., 1989 *Development of a human reliability assessment system for the management of human error in complex systems*, Reliability '89, Brighton, 14-16 juin, pp.5Al2/1-5A/2/11

[KORVE et al., 1996]
Korve H W., Farran J I., Mansel D M., Levinson H S., Chira-Chavala T., Ragland D R., 1996, *Integration of Light Rail Transit into City Streets.* Transportation Research Board National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.

[LANDAU et DUGARD, 1986]
Landau I.D., Dugard L., 1986, *Commande adaptative : aspects pratiques et théoriques.* Masson Editons, Série Automatique.

[LI et al., 2005]
Li G., Hamilton I, Morrisroe G., Clarke T., 2005, *Driver detection and recognition of lineside signals and signs at different approach speeds.* In: J.R. Wilson, B.J. Norris, T. Clarke and A. Mills, Editors, Rail Human Factors: Supporting the Integrated Railway, Ashgate Publishing, London, pp.145–157.

[LOWE et TURNER, 2005]
Lowe E., Turner C., 2005, *A human factors SPAD checklist.* In: J.R. Wilson, B.J. Norris, T. Clarke and A. Mills, Editors, Rail Human Factors: Supporting the Integrated Railway, Ashgate Publishing, London, pp.182–188.

[LUO et YANG, 2002]
Luo, M.-Y., Yang, C.-S., 2002, *Enabling fault resilience for web services.* Computer Communications, 25, pp.198-209.

[MACK et al., 2004]
Mack Z., Broadbent S., Miller M., 2004, *Train cab ergonomics—from a driver's perspective.* In: P.T. McCabe, Editor, Contemporary Ergonomics, CRC Press, Boca Raton, FL, pp.281–285.

[MAGNE et VASSEUR, 2006]
Magne L., Vasseur D., 2006, *Risques industriels. Complexité, incertitude et décision : une approche interdisciplinaire,* Editions Lavoisier TEC & DOC, Collection EDF R&D.

[MARTIN, 2005]
Martin, S., 2005, *La résilience : définition et évaluation dans le cadre de la théorie de la viabilité.* 7e journée ' complexité ' sur la Modélisation, Viabilité et Résilience des Systèmes Complexes, 24 novembre, Paris.

[MCLEOD et al., 2005]
McLeod R., Walker G., Mills A., 2005, *Assessing the human factors risks in extending the use of AWS.* In: J.R. Wilson, B.J. Norris, T. Clarke and A. Mills, Editors, Rail Human Factors: Supporting the Integrated Railway, Ashgate Publishing, London, pp.109–119.

[MERAT et al., 2002]
Merat N., Mills A., Bradshaw M., 2002, *Allocation of attention among train drivers.* In: P.T. McCabe, Editor, Contemporary Ergonomics, Taylor & Francis, London, pp.185–190.

[MILLANVOYE, 2004]
Millanvoye M., 2004, *Les ambiances physiques au poste de travail.* In Falzon P. Ergonomie. PUF, Paris.

[MILLOT, 1988]
Millot P., 1988, *Supervision des procédés automatisés et ergonomie*, Edition Hermès, Paris, France.

[NAKAYAMA et al., 2007]
Nakayama, H., Ansari, N., Jamalipour, A., Kato, N., 2007, *Fault-resilient sensing in wireless sensor networks*. Computer Communication, 30, 2375-2384.

[NUMANOGLU et al., 2006]
Numanoglu, T., Tavli, B., Heinzelman, W., 2006, *Energy efficiency and error resilience in coordinated and non-coordinated medium access control protocols*. Computer Communications, 29, 3493-3506.

[ORWINA et WARDLE, 2004]
Orwina, K. H., Wardle D. A., 2004, *New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances*. Soil Biology & Biochemistry, 36, 1907-1912.

[PARK, 1997]
Park K., 1997, *Human reliability – analysis, prediction, and prevention of human errors*, Elsevier.

[PASQUINI et al., 2004]
Pasquini A., Rizzo A., Save L., 2004, *A Methodology for the analysis of SPAD*, Safety. Science. 42 (5), pp.437–455.

[PEREZ-ESPANA et ARREGUIN-SANCHEZ, 2001]
Pérez-España, H., Sánchez, A., 2001, *An inverse relationship between stability and maturity in models of aquatic ecosystems.* Ecological Modelling, 145, pp.189-196.

[PERROW, 1984]
Perrow C., 1984, *Normal Accidents : living with high-risk technologie*, Basic Books Editions, New-York, 386p.

[PLANCHETTE et al., 2002]
Planchette G., Nicolet J-L., Valancogne J., 2002, *Et si les risques m'étaient comptés*, Editions Octares.

[POLET, 2002]
Polet P., 2002, *Modélisation des Franchissements de Barrières pour l'Analyse des Risques des Systèmes Homme Machine*, Thèse de doctorat. Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis. Valenciennes.

[POLET et al., 2002a]
Polet P., Vanderhagen F., Amalberti R., 2002, *Modelling Border-line Tolerated Conditions of Use (BCTUs) and associated risks*, Safety Science, vol. 41/2-3 pp.111-136.

[POLET et al., 2002b]
Polet P., Vanderhaegen F., Wieringa P., 2002, *Theory of safety related violation of system barriers*. Cognition, Technology and Work, Vol 4 (3), pp.171-179.

[PULAKOS et al., 2000]
Pulakos E D., Arad S., Donovan A., Plamondon K E., 2000, *Adaptability in the workplace : Development of taxonomy of adaptive performance,* Journal of Applied Psychology, Vol. 85 (4), pp.612-624.

[QUEVA et al., 2005]
Quéva S., Vanderhaegen F., Marion J., 2005, *Human reactivity an adaptability in transport system*. Proceeding of 24th Annual European Conference on Human Decision Making and Manual Control, EAM'2005, octobre, Athens, Greece.

[QUEVA, 2006]
Quéva S., 2006, *Visite de réseaux de tramway*, Rapport de synthèse, document interne RATP, août.

[QUEVA et al., 2006a]
Quéva S., Marion J., Vanderhaegen F., 2006, *Contrat CIFRE Année 1 – juin 2005 à juin 2006*, Rapport de recherche, juin.

[QUEVA et al., 2006b]
Quéva S., Marion J., Vanderhagen F., 2006, *Adaptabilité et réactivité humaines dans la conduite de tramway*. 15ème congrès de la maîtrise des risques, IMdR-SdF, octobre, Lille.

[QUEVA et al., 2007]
Quéva S., Marion J., Vanderhaegen F., 2007, *Contrat CIFRE Année 2 – juin 2006 à juin 2007*, Rapport de recherche, juin.

[RASMUSSEN et al., 1981]
Rasmussen, J., Pedersen, O.M., Camino, A., Griffon, M., Mancini, C. and Gagnolet, P., 1981, *Classification system for reporting events involving human malfunctions*, Report No. RISO-M-2240. Riso National Laboratories. Roskilde, Denmark.

[RASMUSSEN et al., 1994]
Rasmussen J, Pejtersen A. M., Goodstein L. P., 1994, *Cognitive Systems Engineering*, John Wiley & Sons.

[REASON, 1990]
Reason J., 1990, *Human Error*. Cambridge University Press.

[RICHARD et al., 2008]
Richard P., Quéva S., Dahiot R., Vanderhaegen F., 2008, *Prise en compte des facteurs humains dans la démonstration de la sécurité ferroviaire*, Papier présenté lors de la Conférence Internationale Francophone d'Automatique, septembre, Bucarest.

[ROACH et al., 2001]
Roach G.D, Dorrian J., Fletcher A., 2001, *Comparing the effects of fatigue and alcohol consumption on locomotive engineers' performance in a rail simulator*, J. Human Ergol. 30(1–2), pp.125–130.

[RSDF, 1997]
Réseau Sûreté de Fonctionnement, 1997, *Bilan du groupe de travail ' Fiabilité Humaine '*, RSdF 97/1.

[RSSB, 2005]
Rail Safety and Standars Board, 2005, *Rail-specific HRA technique for driving tasks T270*, Final Report.

[SCHERRER, 1981]
Scherrer, J., 1981, *Précis de physiologie du travail : notions d'ergonomie*, Masson.

[SCHMIDT, 1991]
Schmidt K., 1991, *Cooperative work : a conceptual framework*, in Rasmussen J., Brehmer B. et Leplat J. (eds), Distributed Decision Making : cognitive models for cooperative works, UK, John Wiley Ltd.

[SEGAL, 2007]
Segal, J-P., 2007, *L'introduction de la conduite entièrement automatisée des métros : approche comparative des choix économiques, organisationnels et commerciaux dans les contextes français et européens*. Rapport final de recherche, mars.

[SMITH et HANCOCK, 1995]
Smith, K., Hancock, P.A.,1995, *Situation awareness is adaptative, externally directed consciousness*. Human Factors, 37 (1), pp.137-148.

[SONNERAT et al., 2004]
Sonnerat D., Quéva S., Desmedt S., Anceaux F., Popieul J-C., 2004, *Discrimination de la monotonie en conduite automobile*, Rapport Final de contrat de Recherche PSA, LAMIH, janvier.

[SPERANDIO, 1988]
Spérandio J.-C., 1988, *Ergonomie du travail mental*. Edition Masson.

[STEINICKE et MEISSNER, 2003]
Steinicke W.H., Meissner T., 2003, *The Project European Driver's Desk (EUDD)—a Multidisciplinary Approach towards the Future Modular Train, Ergonomics in the Digital Age*. Proceedings of the XVth Triennial Congress of the International Ergonomics Association and the 7th Joint Conference of the Ergonomics Society of Korea and the Japan Ergonomics Society, Seoul, Korea, August 24–29, vol. 3. Ergonomics Society of Korea, Seoul, Korea.

[STRMTG, 2006a]
STRMTG, 2006, *Systèmes de transport public guidés urbains de personnes. Liste générique des Evènements Redoutés de niveau système*, Guide d'application, 28 juin.

[STRMTG, 2006b]
STRMTG, 2006, *Systèmes de transport public guidés urbains de personnes. Décomposition en sous-systèmes 'structurels' et 'opérationnels'*, Guide d'application, 27 mars.

[STRMTG, 2007]
STRMTG, 2007, *Dispositif d'enregistrement des paramètres d'exploitation d'un tramway*, Guide technique, 1er juin.

[SWAIN et GUTTMANN, 1983]
Swain A. D., Guttmann H. E., 1983, *Handbook of Reliability Analysis with emphasis on Nuclear Plant Applications*. NUclear REGulatory Commission, NUREG/CR-1278, Washington DC.

[TERRAL, 2007]
Terral F., 2007, *Gestion de la vitesse observée dans la conduite du métro parisien*, mémoire de Master Professionnel 2ème année spécialité ergonomie et conception des systèmes de travail. Université de Lille 3, septembre.

[TILLEMENT et al., 2008]
Tillement S., Reverdy T., Cholez C., 2008, *Organisational resilience at the limit : projects integrating new technologies in complex operational systems,* 24th EGOS Colloquium, July 10–12, Amsterdam, the Netherlands.

[TODOSKOFF, 1999]

Todoskoff A., 1999, *Etude des évolutions temporelles du comportement du conducteur sur autoroute : analyse multidimensionnelle de signaux relatifs au véhicule et aux mouvements de tête sur simulateur.*Thèse de doctorat. Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis. Valenciennes.

[VALANCOGNE et NICOLET, 2002]

Valancogne J., Nicolet J-L., 2002, *Defence-in-depth : a new systematic and global approach in socio-technical system design to guarantee better the timelessness safety in operation*, λμ13-ESREL 2002 European Conference.

[VANDERHAEGEN, 2001]

Vanderhaegen F., 2001, *A non-probabilistic prospective and retrospective human reliability analysis method—application to railway system*, Reliability Engineering and System Safety. 71, Vol.1, pp. 1–13.

[VANDERHAEGEN, 2003]

Vanderhaegen F. 2003, *Analyse et contrôle de l'erreur humaine*, Editions Hermes, France.

[VANDERHAEGEN, 2008]

Vanderhaegen F., 2008, *A propos de la résilience*, note interne LAMIH.

[VANDERHAEGEN et MILLOT, 2001]

Vanderhaegen F., Millot P., 2001, *Cooperative redundancy to control human reliability*, proceeding of the 10th IFAC Symposium on information control problems in manufacturing, INCOM'01, 20-22 septembre, Vienna, Austria.

[VILLEMEUR, 1988]

Villemeur A., 1988, *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*, Collection de la direction des études et recherches d'EDF, Editions Eyrolles.

[WEICK et al., 1999]

Weick, K.E, Sutcliff, K.M, and Obstfeld, D., 1999, *Organizing for High Reliability : Processes of collective mindfullness*. Resarch in Organizational Behavior (21): pp.81-123.

[WHITLOCK et al., 2005]
Whitlock W., Pethick J., Mills A., 2005, *Driver vigilance devices*. In: J.R. Wilson, B.J. Norris, T. Clarke and A. Mills, Editors, Rail Human Factors: Supporting the Integrated Railway, Ashgate Publishing, London, pp. 120–130.

[WILLIAMS, 1986]
Williams, J. C., 1986, *HEART- a proposed method for assessing and reducing human error*. Ninth Advances in Reliability Technology Symposium, NEC, Birmingham, June, AEA Technology, Culcheth, Warrington.

[WILLIAMS, 1992]
Williams, J. C., 1992, *Toward an improved evaluation tool for users of HEART*. Proceedings of the International Conference on Hazard Identification, Risk Analysis, Human Factors and Human Reliability in ,Process Safety, Orlando, February, Chemical Centre for Process.

[WREATHALL, 2006]
Wreathall J., 2006, *Properties of resilient organizations: an initial view*. In Hollnagel E., Woods D., Leveson N. eds., Resilience Engineering, Ashgate Publishing.

[ZHANG, 2004]
Zhang Z., 2004, *Fiabilité humaine : prédiction des violations par réseaux de neurones et application aux systèmes de transport*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes.

[ZIEBA et al., 2007]
Zieba S., Jouglet D., Polet P., Vanderhaegen F., 2007, *Resilience and affordances: perspectives for human-robot cooperation?*. EAM'07, juin, Copenhagen, Denmark.

Annexe 1 : Résultats de l'étape d'identification de l'adaptation et de la réaction pour l'application de la démarche à un enregistrement des paramètres d'exploitation

Orange : critère identifié comme de l'adaptation
Vert : critère identifié comme de la réaction

Consigne de vitesse

Sujet	C1 (s)	C2 (%)	C4 (%)	C5 (chgt/min)	n	erreur
1	40,89	0	27,7	2,06E-03	65	44
2	39,24	24,4	38	1,60E-03	71	45
3	42,07	8,5	16,2	1,88E-03	74	59
4	43,29	30,2	40,9	1,47E-03	66	43
5	38,96	34,1	40,3	1,75E-03	72	41
6	44,88	40,8	46,7	1,70E-03	77	76
7	39,96	47,9	58,7	1,91E-03	75	48
8	38,40	38,5	42,9	1,01E-03	77	52
9	40,85	18,5	28,4	1,71E-03	74	54
10	38,64	50	55,4	1,79E-03	74	48

Etat de la signalisation

Sujet	C1 (s)	C2 (%)	C4 (%)	C5 (chgt/min)	n	erreur
1	31,53	100	0	6,02E-04	19	19
2	14,29	100	7,1	3,16E-04	14	13
3	13,27	90,9	0	2,79E-04	11	11
4	8,75	90,9	8,3	2,67E-04	12	11
5	6,87	66,7	0	3,65E-04	15	15
6	10	71,4	6,7	3,32E-04	15	14
7	9,79	92,9	0	3,56E-04	14	14
8	11	91,7	7,7	1,71E-04	13	12
9	9,50	100	0	2,77E-04	12	12
10	10,38	76,9	0	3,15E-04	13	13

Mission

Sujet	C1 (s)	C2 (%)	C4 (%)	C5 (chgt/min)	n	erreur
1	777,33	0	0	1,90E-04	6	0
2	610,00	0	0	1,81E-04	8	0
3	540,78	0	0	2,28E-04	9	0
4	599,88	0	0	1,78E-04	8	0
5	613,25	0	0	1,95E-04	8	0
6	556,33	0	0	1,99E-04	9	0
7	581,56	0	0	2,29E-04	9	0
8	646,11	0	0	1,18E-04	9	0
9	550,11	0	0	2,07E-04	9	0
10	553,33	0	0	2,18E-04	9	0

Capacité de freinage

Sujet	C1 (s)	C2 (%)	C4 (%)	C5 (chgt/min)	n	erreur
1	1195,5	100	0	4,29E-04	2	4
2	618,5	100	0	4,75E-04	2	4
3	555	66,7	0	4,02E-04	2	6
4	629	60	0	4,94E-04	2	5
5	621,5	100	0	4,07E-04	2	5
6	616	40	0	3,99E-04	2	5
7	652	85,7	0	3,82E-04	2	7
8	891	71,4	0	3,44E-04	2	7
9	606	14,3	0	4,04E-04	2	7
10	596	100	0	4,01E-04	2	2

Tableau 30 : Résultats pour la phase de changement courant

Orange : critère identifié comme de l'adaptation
Vert : critère identifié comme de la réaction

Consigne de vitesse

Sujet	C1 (s)	C2 (%)	C4 (%)	C5 (chgt/min)	n	erreur
1	35	0	0	3,22E-05	1	0
2	18,5	0	0	6,09E-05	2	0
3	24	0	0	6,87E-05	2	2
4	27	0	50	5,92E-05	2	1
5	32	0	0	3,46E-05	1	0
6	14	0	0	6,50E-05	2	2
7						
8	17	0	0	3,47E-05	1	1
9	28	0	0	7,06E-05	2	0
10	29	0	0	6,83E-05	2	0

Etat de la signalisation

Sujet	C1 (s)	C2 (%)	C4 (%)	C5 (chgt/min)	n	erreur
1	52	0	0	6,44E-05	2	1
2	17	0	0	6,09E-05	2	2
3	65	0	0	6,87E-05	2	2
4	53	0	0	5,92E-05	2	2
5	27,5	0	0	6,92E-05	2	2
6	40	0	0	9,75E-05	3	3
7						
8	3	0	0	3,47E-05	1	1
9	8,5	0	0	7,06E-05	2	2
10	44	0	0	6,83E-05	2	2

Capacité de freinage

Sujet	C1 (s)	C2 (%)	C4 (%)	C5 (chgt/min)	n	erreur
1	419	100	0	3,22E-05	1	3
2	328,5	100	0	6,09E-05	2	3
3	382	85	0	6,87E-05	2	3
4	699	87,5	0	5,92E-05	2	5
5	414,5	100	0	6,92E-05	2	4
6	411	63,6	0	6,50E-05	2	1
7						
8	404,5	100	0	6,94E-05	2	3
9	459,5	55	0	7,06E-05	2	1
10						

Tableau 31 : Résultats pour la phase de changements perturbateurs

Orange : critère identifié comme de l'adaptation
Vert : critère identifié comme de la réaction

Consigne de vitesse

Sujet	C1 (s)	C2 (%)	C4 (%)	C5 (chgt/min)	n	erreur
1	37,24	0	39,4	1,06E-03	33	11
2	38,14	0	30,9	1,42E-03	42	24
3	38,79	0	16,7	1,39E-03	42	29
4	41,26	26,3	37,1	4,47E-04	35	19
5	38,23	32	32,6	1,48E-03	43	25
6	42,55	44,8	42,4	1,20E-03	33	29
7	37,72	48,4	53,5	1,44E-03	43	31
8	39,19	57,9	50	1,01E-03	32	19
9	37,90	40,8	45,2	1,29E-03	42	27
10	37,86	44,4	40,5	1,46E-03	42	27

Etat de la signalisation

Sujet	C1 (s)	C2 (%)	C4 (%)	C5 (chgt/min)	n	erreur
1	53	100	50	6,44E-05	2	1
2	21,86	100	14,3	4,72E-04	14	12
3	29	88,9	10	3,30E-04	10	9
4	10,45	62,5	27,3	1,41E-04	11	8
5	12,2	80	0	3,44E-04	10	10
6	11,11	83,3	33,3	3,27E-04	9	6
7	10,7	90	0	3,35E-04	10	10
8	12	100	0	2,52E-04	8	8
9	10,27	90,9	0	3,39E-04	11	11
10	11,33	70	16,7	4,18E-04	12	10

Mission

Sujet	C1 (s)	C2 (%)	C4 (%)	C5 (chgt/min)	n	erreur
1	481,4	0	0	1,61E-04	5	0
2	581	0	0	1,69E-04	5	0
3	564	0	0	1,65E-04	5	0
4	767,33	0	0	3,83E-05	3	0
5	549,8	0	0	1,72E-04	5	0
6	713,67	0	0	1,09E-04	3	0
7	557	0	0	1,67E-04	5	0
8	553,75	0	0	1,26E-04	4	0
9	565,4	0	0	1,54E-04	5	0
10	547,2	0	0	1,74E-04	5	0

Capacité de freinage

Sujet	C1 (s)	C2 (%)	C4 (%)	C5 (chgt/min)	n	erreur
1	1016	0	0	1,96E-03	2	2
2	1228	100	0	1,62E-03	2	2
3	1185	100	0	1,68E-03	2	5
4	1801	100	0	1,11E-03	2	3
5	1136	100	0	1,76E-03	2	1
6	650	0	0	1,53E-03	1	3
7	1162	100	0	1,72E-03	2	4
8					0	
9	1163	100	0	1,71E-03	2	7
10	1135	100	0	1,76E-03	2	4

Tableau 32 : Résultats pour la phase de changement d'interface

Annexe 2 : Résultats de l'application de la démarche aux événements perturbateurs et au changement d'interface obtenus lors de l'expérimentation.

1 Application de la démarche aux événements perturbateurs

1.1 Identification de l'adaptation et de la réaction

Le Tableau 33 montre la répartition du nombre de configurations de référence identifiées.

Configuration de référence	Consigne de vitesse	Etat de la signalisation	Capacité de freinage	Total
Réf 1	0	0	15	15
Réf 2	15	18	0	30
Réf 3	0	0	0	0
Total	15	18	15	45

Tableau 33 : Répartition du nombre de configuration de référence identifiée

1.2 Identification des dérives

Le Tableau 34 présente les résultats de l'étape d'identification des dérives, on y trouve donc par type de changement, le type de dérive identifié (Dér. 1 à Dér. 10) ou l'absence de dérive (Hdér).

Configuration de référence	Consigne de vitesse	Etat de la signalisation	Capacité de freinage	Total
Dér.1	2	15	0	17
Dér.4	5	0	0	5
Dér.7	2	1	0	3
Dér.8	2	0	0	2
Dér. Adaptation	11	16	0	27
Dér.2	0	0	0	0
Dér.5	1	0	0	1
Dér.9	0	0	2	2
Dér.10	0	0	0	0
Dér. Réaction	1	0	2	3
Dér.3	0	0	0	0
Dér.6	0	0	0	0
Dér. Ad. & Ré.	0	0	0	0
Hdér	3	2	13	18
Non identifiés	3	2	13	18
Total	15	18	15	48

Tableau 34 : Répartition du nombre de changements en fonction du type de dérive

1.3 Evaluation de l'adaptabilité et de la réactivité

Le Tableau 35, le Tableau 36 et le Tableau 37 présentent les résultats des évaluations des dérives identifiés par rapport aux trois événements perturbateurs, respectivement changement de la vitesse consigne, changement de l'état de la signalisation et changement de la capacité de freinage. L'évaluation présentée est la moyenne des différences entre la maîtrise et la perte

de contrôle des fonctions de gravité de la sécurité, de la qualité de service et de la charge de travail avec un seuil S=0.

Configuration de référence	Sécurité	Qualité de service	Charge de travail
Dér.1	-566,85	-19511,81	71,18
Dér.4	-369,99	16,11	74,21
Dér.7	-333,44	-38,07	80,93
Dér.8	-236,20	171,15	108,24
Dér. Adaptation	-374,81	-3516,08	81,07
Dér.5	-354,36	450,60	40,32
Dér. Réaction	-354,36	450,60	40,32
Dér. Ad. & Ré.	/	/	/
Hdér	-418,10	16,37	52,88
Non identifiés	-418,10	16,37	52,88
Total	-382,11	-2545,15	72,72

Tableau 35 : Evaluation objective de la performance de conduite en fonction des dérives suite aux perturbations de consigne de vitesse

Configuration de référence	Sécurité	Qualité de service	Charge de travail
Dér.1	-529,45	-693,95	112,37
Dér.7	-1473,82	2181,40	269,06
Dér. Adaptation	-588,47	-514,24	122,16
Dér. Réaction	/	/	/
Dér. Ad. & Ré.	/	/	/
Hdér	-60,57	-80,24	7,00
Non identifiés	-60,57	-80,24	7,00
Total	-529,82	-466,02	109,37

Tableau 36 : Evaluation objective de la performance de conduite en fonction des dérives suite aux perturbations de l'état de la signalisation

Configuration de référence	Sécurité	Qualité de service	Charge de travail
Dér. Adaptation	/	/	/
Dér.9	-437,74	-73,21	190,66
Dér. Réaction	-437,74	-73,21	190,66
Dér. Ad. & Ré.	/	/	/
Hdér	-542,32	-955,39	239,24
Non identifiés	-542,32	-955,39	239,24
Total	-437,74	-976,76	223,89

Tableau 37 : Evaluation objective de la performance de conduite en fonction des dérives suite aux perturbations de capacité de freinage

2 *Application de la démarche au changement d'interface*

2.1 Identification de l'adaptation et de la réaction

Le Tableau 38 montre la répartition du nombre de configuration de référence identifié pour le changement d'interface. On y retrouve un nombre de changement aussi important que dans la phase de gestion des événements courants. En effet, cette phase étudie l'influence du changement d'interface. Dans ce but, des changements courants sont soumis au sujet et une

comparaison peut être faite avec les dérives et la performance de la phase de gestion des événements courants.

Configuration de référence	Consigne de vitesse	Etat de la signalisation	Mission	Capacité de freinage	Total
Réf 1	75	97	45	16	233
Réf 2	312	0	0	4	316
Réf 3	0	0	0	0	0
Total	387	97	45	20	549

Tableau 38 : Répartition du nombre d'événements en fonction de la configuration de référence

2.2 Identification des dérives

Le tableau présente les résultats de l'étape d'identification des dérives, on y trouve donc par type de changement, le type de dérive identifié (Dér. 1 à Dér. 10) ou l'absence de dérive (Hdér).

Configuration de référence	Consigne de vitesse	Etat de la signalisation	Mission	Capacité de freinage	Total
Dér.1	91	35	0	0	126
Dér.4	6	0	0	0	6
Dér.7	74	13	0	0	87
Dér.8	70	0	45	0	115
Dér. Adaptation	241	48	45	0	334
Dér.2	28	0	0	0	28
Dér.5	4	0	0	0	4
Dér.9	3	7	0	0	10
Dér.10	10	0	0	0	10
Dér. Réaction	45	7	0	0	52
Dér.3	18	9	0	0	27
Dér.6	0	1	0	0	1
Dér. Ad. & Ré.	18	10	0	0	28
Hdér	83	32	0	20	135
Non identifiés	83	32	0	20	135
Total	387	97	45	20	549

Tableau 39 : Répartition du nombre de changements en fonction du type de dérive

2.3 Evaluation de l'adaptabilité et de la réactivité

Le Tableau 40, le Tableau 41, le Tableau 42 et le Tableau 43 présentent les résultats des évaluations des dérives identifiés par rapport à la gestion des quatre événements courants, en changeant l'interface de conduite utilisée par le sujet. L'évaluation présentée est la moyenne des différences entre la maîtrise et la perte de contrôle des fonctions de gravité de la sécurité, de la qualité de service et de la charge de travail avec un seuil S=0.

Configuration de référence	Sécurité	Qualité de service	Charge de travail
Dér.1	-648,07	-250,99	145,59
Dér.4	-562,73	-287,44	124,37
Dér.7	-577,28	-70,46	108,89
Dér.8	-618,67	-102,93	96,32
Dér. Adaptation	-615,67	-153,46	119,48
Dér.2	-454,23	72,57	109,35
Dér.5	-179,79	-204,99	37,58
Dér.9	-59,08	-103,31	20,25
Dér.10	-1303,64	-177,50	60,92
Dér. Réaction	-592,25	-19,40	86,27
Dér.3	-639,57	-93,90	120,61
Dér. Ad. & Ré.	-639,57	-93,90	120,61
Hdér	-312,88	-75,29	87,06
Non identifiés	-312,88	-75,29	87,06
Total	-549,12	-118,34	108,72

Tableau 40 : Evaluation objective de la performance de conduite en fonction des dérives suite aux changement courants de consigne de vitesse

Configuration de référence	Sécurité	Qualité de service	Charge de travail
Dér.1	-173,60	-70,69	39,65
Dér.7	-464,86	-311,97	93,80
Dér. Adaptation	-252,49	-136,04	54,32
Dér.9	-55,06	-34,72	9,39
Dér. Réaction	-55,06	-34,72	9,39
Dér.3	-402,42	-51,33	77,13
Dér.6	-85,19	-84,03	9,14
Dér. Ad. & Ré.	-370,69	-54,60	70,33
Hdér	-137,48	-4,57	42,37
Non identifiés	-137,48	-4,57	42,37
Total	-212,48	-76,96	48,79

Tableau 41 : Evaluation objective de la performance de conduite en fonction des dérives suite aux changement courants de l'état de la signalisation

Configuration de référence	Sécurité	Qualité de service	Charge de travail
Dér.8	-7798,66	-1575,63	1375,56
Dér. Adaptation	-7798,66	-1575,63	1375,56
Dér. Réaction	/	/	/
Dér. Ad. & Ré.	/	/	/
Non identifiés	/	/	/
Total	-7798,66	-1575,63	1375,56

Tableau 42 : Evaluation objective de la performance de conduite en fonction des dérives suite aux changement courants de consigne de mission

Configuration de référence	Sécurité	Qualité de service	Charge de travail
Dér. Adaptation	/	/	/
Dér. Réaction	/	/	/
Dér. Ad. & Ré.	/	/	/
Hdér	-822,78	-495,78	337,38
Non identifiés	-822,78	-495,78	337,38
Total	-822,78	-495,78	337,38

Tableau 43 : Evaluation objective de la performance de conduite en fonction des dérives suite aux changement courants de consigne de capacité de freinage

Bibliothèque Universitaire de Valenciennes
00900527