Contribution à la formalisation et à l'identification de la stabilité humaine au regard de la sécurité : application aux transports guidés

Philippe Richard

▶ **To cite this version:**

Philippe Richard. Contribution à la formalisation et à l'identification de la stabilité humaine au regard de la sécurité : application aux transports guidés. Automatique. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2012. Français. NNT : 2012VALE0002 . tel-03416367

HAL Id: tel-03416367
https://uphf.hal.science/tel-03416367

Submitted on 5 Nov 2021

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.

2012VALE0002

INSTITUT FRANÇAIS DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DES TRANSPORTS, DE L'AMÉNAGEMENT ET DES RÉSEAUX - ÉVALUATION DES SYSTÈMES DE TRANSPORTS AUTOMATISÉS ET DE LEUR SÉCURITÉ (IFSTTAR - ESTAS)

Numéro d'ordre : 12-02

THÈSE

pour l'obtention du

DOCTORAT

Spécialité : AUTOMATIQUE, GÉNIE INFORMATIQUE

présentée par

Philippe RICHARD

Contribution à la formalisation et à l'identification de la stabilité humaine au regard de la sécurité : application aux transports guidés

Soutenue le 12 janvier 2012 devant la commission d'examen composée de :

Pascal BERRUET	Professeur à l'UBS, Lorient	Rapporteur
Walter SCHÖN	Professeur à l'UTC, Compiègne	Rapporteur
Eric CHATELET	Professeur à l'UTT, Troyes	Examinateur
Didier MAQUIN	Professeur à l'UL, Nancy	Examinateur
Christian BLATTER	Chef de Division Facteurs Humains de la Direction Circulation Ferroviaire de la SNCF, Paris	Invité
El-Miloudi EL-KOURSI	Directeur de l'unité de recherche ESTAS de l'IFSTTAR, Villeneuve d'Ascq	Co-directeur
Frédéric VANDERHAEGEN	Professeur à l'UVHC, Valenciennes	Co-directeur
Vincent BENARD	Ingénieur de recherche à l'IFSTTAR, Villeneuve d'Ascq	Co-encadrant
Patrice CAULIER	Maître de conférences à l'UVHC, Valenciennes	Co-encadrant

UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS – LE MONT-HOUY 59313 VALENCIENNES CEDEX 9

ÉCOLE DOCTORALE LILLE NORD DE FRANCE

Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire se sont déroulés au sein de l'**IFSTTAR** (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux) dans l'unité de recherche **ESTAS** (Évaluation des Systèmes de Transports Automatisés et de leur Sécurité) de Villeneuve d'Ascq.

J'exprime toute ma reconnaissance à mon co-directeur de thèse, Monsieur Frédéric VANDERHAEGEN, Professeur à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis et particulièrement à mon co-directeur de thèse, Monsieur El-Miloudi EL-KOURSI, directeur de l'unité de recherche ESTAS, pour leur soutien et leurs conseils avisés durant cette période.

Je remercie Monsieur Vincent BENARD Ingénieur de recherche dans l'unité de recherche **ESTAS** et Monsieur Patrice CAULIER Maitre de conférences à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, pour leur disponibilité, leurs conseils et leur présence.

Je remercie sincèrement Monsieur Pascal BERRUET, Professeur à l'Université Bretagne-Sud et Monsieur Walter SCHÖN, Professeur à l'Université Technologique de Compiègne pour l'intérêt qu'ils portent à mes travaux et pour avoir accepté d'en être les rapporteurs.

Pour m'avoir fait l'honneur de participer à mon jury de thèse, j'adresse aussi mes remerciements à Monsieur Eric CHATELET et Monsieur Didier MAQUIN, respectivement Professeur à l'Université Technologique de Troyes et Professseur à l'Université de Lorraine.

Je remercie également les différents services de l'**IFSTTAR** Villeneuve d'Ascq responsables de la logistique et plus particulièrement le service de documentation pour la mise à disposition d'un support scientifique indispensable à la concrétisation de mes travaux de recherche.

Un grand merci à Nathalie BOURBOTTE, secrétaire de l'unité de recherche **ESTAS**, qui malgré sa charge de travail, est toujours disponible pour les démarches administratives et la résolution de divers problèmes.

Au cours de cette thèse, j'ai eu de nombreuses occasions de me rendre compte de la serviabilité, de la gentillesse et de la disponibilité dont ont fait preuve mes collègues de travail. J'adresse un merci spécial à Monsieur Grégory MARLIÈRE pour son aide indispensable sur la plate-forme **ERTMS** (European Rail Traffic Management System).

à Mademoiselle Sonia SOBIERAJ pour sa disponibilité lors des problèmes informatiques et ses nombreux conseils et à Monsieur Cyril LEGRAND pour son travail et son autonomie durant le stage de Master qui s'inscrivait dans le cadre de mes travaux de recherche.

Je tiens également à remercier l'ensemble des personnes qui ont accepté de consacrer un peu de leur temps pour participer à la campagne expérimentale.

Je remercie l'ensemble des personnes rencontrées au cours d'évènements scientifiques pour leur regard critique et constructif sur mes travaux. Je remercie plus particulièrement les membres de l'**IMDR** et le groupe de travail Facteurs Humains. Dans ce groupe, un merci particulier à Monsieur Christian BLATTER de la SNCF pour sa disponibilité et les nombreuses discussions notamment sur ma problématique. Je tiens aussi à remercier le GDR-E HAMASYT (Groupe De Recherche Européen HumAn MAchine SYStem) qui m'a permis de présenter mes travaux à deux reprises et je les remercie également pour leur retour sur ces travaux.

Je remercie aussi Mademoiselle Sonia SOBIERAJ, Mademoiselle Delphine GUERY-DEVOS et Madame Marie RICHARD pour le temps consacré à la relecture des chapitres de ce mémoire.

Pour l'intérêt témoigné à mes travaux, je remercie les lecteurs de ce mémoire et leur souhaite une lecture agréable et profitable.

Finalement, je remercie à nouveau, mais tendrement cette fois, ma compagne Sonia SOBIERAJ pour son soutien et sa compréhension durant ces travaux de thèse.

À Sonia, ma compagne,
à Marie et Jacques, mes parents,
à Delphine, ma soeur
et à François, mon frère.

Table des matières

Introduction générale 1

1 La sécurité des modes de transports guidés 5
1.1 Introduction . . . 5
1.2 Prise en compte de la sécurité dans les transports guidés . . . 6
1.2.1 Aspects réglementaire et normatif . . . 7
1.2.1.1 Processus de certification d'un système ferroviaire . . . 9
1.2.1.2 Processus de certification d'un système de transport guidé urbain . . . 10
1.2.1.3 Prise en compte de la sécurité dans les rapports *a posteriori* 10
1.2.2 Procédures d'exploitation et de maintenance . . . 12
1.3 Méthodes d'évaluation de la sécurité . . . 12
1.3.1 Notion de risque et maîtrise des risques . . . 12
1.3.2 Méthodes centrées sur les facteurs techniques . . . 13
1.3.2.1 La méthode APR . . . 13
1.3.2.2 La méthode AMDEC . . . 14
1.3.2.3 Le nœud papillon ou diagramme causes-conséquences . . 14
1.3.3 Méthodes centrées sur le facteur humain . . . 15
1.3.3.1 Les modèles de fonctionnement de l'opérateur humain . 16
1.3.3.2 Les méthodes TESEO et HCR . . . 17
1.3.3.3 La méthode THERP . . . 18
1.3.3.4 La méthode ACIH . . . 19
1.3.3.5 La méthode HAZOP . . . 19
1.4 L'accidentologie dans les transports guidés . . . 21
1.4.1 Les origines des incidents et accidents . . . 21
1.4.2 Le retour d'expérience . . . 23
1.5 Conclusion . . . 26

2 De la résilience à la stabilité : émergence de nouvelles problématiques 27
2.1 Introduction . . . 27
2.2 Fondements de la sûreté de fonctionnement . . . 28
2.3 Le concept de résilience . . . 30
2.3.1 Étymologie . . . 30
2.3.2 Principaux domaines d'application de la résilience . . . 30
2.3.2.1 La résilience dans les sciences des matériaux . . . 30
2.3.2.2 La résilience dans le domaine de l'écologie . . . 31
2.3.2.3 La résilience en médecine . . . 31
2.3.2.4 La résilience dans les sciences de l'ingénierie . . . 32
2.3.2.5 La résilience dans les sciences de l'organisation . . . 32

2.3.3 Synthèse des domaines d'application 32
2.4 Etat de l'art de la stabilité 34
2.4.1 Résilience et stabilité : deux concepts complémentaires ? 34
2.4.2 Définition de la stabilité 36
2.4.2.1 Étymologie 36
2.4.2.2 La stabilité dans les différents domaines d'application . . 36
2.4.3 Synthèse sur la stabilité 41
2.5 La stabilité au regard de la sécurité 42
2.6 Conclusion 45

3 Formalisation et identification de la stabilité humaine 47
3.1 Introduction 47
3.2 Cadre des travaux 48
3.3 Caractérisation et formalisation de la stabilité humaine 48
3.3.1 Caractérisation de la stabilité humaine 48
3.3.2 Formalisation de la stabilité humaine 50
3.4 Identification de la stabilité humaine 51
3.4.1 Algorithmes d'identification de la stabilité humaine 51
3.4.1.1 Portée des algorithmes d'identification 51
3.4.1.2 Algorithme temporel (AT) 52
3.4.1.3 Algorithme fréquentiel (AF) 53
3.4.1.4 Algorithme séquentiel (AS) 54
3.4.2 Critères de la stabilité humaine 55
3.4.2.1 La facette « état » 57
3.4.2.2 La facette « comportement » 59
3.4.2.3 La facette « performance » 59
3.4.3 Exemple d'application de l'algorithme AT 60
3.5 Impact de la stabilité humaine sur la sécurité 61
3.6 Conclusion 65

4 Mise en œuvre de la stabilité humaine dans le domaine des transports guidés 67
4.1 Introduction 67
4.2 Le système ERTMS/ETCS 68
4.2.1 Spécifications techniques ERTMS/ETCS 69
4.2.2 Présentation de la plate-forme **ERTMS** 71
4.3 Présentation de la campagne expérimentale 73
4.3.1 Objectifs de la campagne expérimentale 73
4.3.2 Les scénarios de l'expérimentation 74
4.3.2.1 Caractéristiques du scénario non perturbé 74
4.3.2.2 Caractéristiques du scénario perturbé 75
4.3.2.3 Zone de danger de la stabilité humaine 78
4.3.3 La population 79

4.3.4 Le déroulement des passations 79
4.3.4.1 Briefing 80
4.3.4.2 Passation 80
4.3.4.3 De-briefing 81
4.4 Pré-traitement des données expérimentales 81
4.4.1 Présentation des données obtenues 81
4.4.1.1 Formatage du fichier de données 81
4.4.1.2 Récupération des données étudiées 83
4.5 Conclusion 84

5 Résultats expérimentaux et perspectives de recherche 85
5.1 Introduction 85
5.2 Analyse et synthèse des résultats 86
5.2.1 Analyse du scénario sans perturbation 87
5.2.1.1 Analyse temporelle du critère « vitesse » 87
5.2.1.2 Analyse temporelle du critère « confort des passagers » . 88
5.2.1.3 Analyse temporelle du critère « qualité de service » . . . 90
5.2.2 Analyse du scénario avec perturbations 90
5.2.2.1 Étude de la stabilité humaine par l'algorithme AT 91
5.2.2.2 Étude de la stabilité humaine par l'algorithme AS 93
5.2.3 Synthèse des résultats de la campagne expérimentale 113
5.2.3.1 Observations durant l'expérimentation 113
5.2.3.2 Synthèse de la nature des états et changements d'état de la stabilité humaine face aux perturbations 113
5.3 Perspectives de valorisation de la stabilité humaine 120
5.3.1 Prise en compte des signatures de la stabilité humaine 120
5.3.2 Le contrôle de la stabilité en ligne 121
5.3.3 Extension de la stabilité aux systèmes homme-machine 121
5.3.4 De nouveaux critères d'évaluation de la stabilité humaine 122
5.3.5 L'étude multi-critère 124
5.3.5.1 Approche par pondération de critères 124
5.3.5.2 Approche multi-objectif 124
5.4 Conclusion 125

Conclusion générale 127

Bibliographie 131

Glossaire 141

Annexes 142

Table des figures

1.1 *La norme IEC 61508 et ses dérivées* 7
1.2 *Illustration du processus français d'approbation de systèmes ferroviaires [EPSF 2009]* 9
1.3 *Illustration du processus français d'approbation de systèmes de transport guidé urbain [MODSAFE 2011]* 11
1.4 *Courbe de risque de Farmer* 13
1.5 *Représentation de scénarios d'accident selon le modèle du nœud papillon* 14
1.6 *Modèle de résolution de problèmes de Rasmussen* 16
1.7 *Modèle de mauvais fonctionnement de l'opérateur humain de Reason* . . 17
1.8 *Exemple d'application de la méthode Therp* 18
1.9 *Causes directes d'accidents et d'incidents selon Kumamoto [Kumamoto 1996]* 22
1.10 *Modèles séquentiel (a) et épidémiologique (b) d'accidents d'après Hollnagel [Hollnagel 2004]* 22
1.11 *Collision du 15 février 2010 en Belgique (source REUTERS)* 25

2.1 *Les paramètres de la sûreté de fonctionnement, [Benard 2004]* 28
2.2 *Démarche de la sûreté de fonctionnement [Schneider Electric 2004]* . . . 29
2.3 *Test de résilience d'un matériau* 31
2.4 *Interprétation temporelle de la notion de résilience* 32
2.5 *Graphes d'états représentant l'absorption des perturbations* 33
2.6 *Relation entre résilience et stabilité en fonction du type d'évènements* . . 35
2.7 *La relation entre résilience et stabilité* 35
2.8 *Représentation de la stabilité d'un navire [Lavoille]* 37
2.9 *Position d'équilibre en économie* 38
2.10 *Représentation des attributs de la stabilité écologique selon [Pérez-Espana 1999]* 39
2.11 *Ligne de stabilité de la réaction nucléaire* 39
2.12 *Diagrammes de Bode et de Nyquist* 40
2.13 *Schéma général de la stabilité* 42
2.14 *Positionnement de la notion de stabilité d'un système* 42
2.15 *Représentation des espaces de la cyndinique* 43
2.16 *Représentation d'un glissement des espaces de la cyndinique* 44
2.17 *Translation des états de stabilité* 45

3.1 *Niveaux de comportement d'un SHM en situation perturbée* 48
3.2 *Illustration des états de la stabilité humaine* 49
3.3 *Tâche de l'opérateur en situation de conduite* 52
3.4 *Exemple de traitement d'un indicateur par l'AT* 53
3.5 *Exemple de traitement d'un indicateur par approche fréquentielle* 54

3.6 *Exemple de signature de la stabilité humaine* 54
3.7 *Organigramme des algorithmes d'identification de la stabilité humaine* . . 56
3.8 *Critères liés à l'opérateur humain* 57
3.9 *Théorie de la dissonance cognitive [Brunel 2011]* 59
3.10 *Courbes et graphes d'états de la stabilité humaine appliquée à SPECTRA avec association des évènements* 61
3.11 *Lien entre charge de travail et performance de l'opérateur humain d'après [Mitchell 2010]* 62
3.12 *Lien entre charge de travail et performance de l'opérateur humain* 62
3.13 *Association des évènements redoutés et des états de stabilité* 64
3.14 *Distribution des évènements en fonction de la nature des états et changements d'état* 64

4.1 *Carte des systèmes de contrôle commande ferroviaire européen [Corridor A]* 68
4.2 *Vue du système bord et du système sol* 69
4.3 *Vue d'un DMI à bord d'un convoi* 70
4.4 *Représentation de l'équipement ETCS de bord* 70
4.5 *ERTMS niveau 1 [Winter 2009]* 70
4.6 *ERTMS niveau 2 [Winter 2009]* 71
4.7 *Modalité de changement de mode [European Railway Agency 2008]* 72
4.8 *Architecture de la plate-forme ERTMS de l'IFSTTAR* 72
4.9 *Vue de la plate-forme ERTMS de l'IFSTTAR* 73
4.10 *Zone de dissonance cognitive par signal fermé* 77
4.11 *Zone de changement de niveau* 77
4.12 *Zone de conduite à vue* 77
4.13 *Vue du DMI de la plateforme* 80
4.14 *Extrait des données du fichier .dat de la plate-forme ERTMS* 81
4.15 *Courbes de vitesse consigne du système ERTMS/ETCS* 82
4.16 *Ensemble des courbes de contrôle du scénario sans perturbation* 83
4.17 *Ensemble des courbes de contrôle du scénario avec perturbations* 83
4.18 *Écart entre la vitesse permise et la vitesse réelle, scénario sans perturbation* 83
4.19 *Écart entre la vitesse permise et la vitesse réelle, scénario avec perturbations* 83
4.20 *Exemple de courbe d'accélération/décélération sur le scénario sans perturbation* 84
4.21 *Exemple de courbe d'accélération/décélération sur le scénario avec perturbations* 84

5.1 Étapes de l'analyse des données par les algorithmes de la stabilité humaine 86
5.2 *États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » - sujet 1* 87
5.3 *États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » - sujet 2* 88

5.4 *États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » - sujet 1* . . . 89
5.5 *États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » - sujet 2* . . . 89
5.6 *États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « Qualité de service » - sujet 1* . . . 90
5.7 *Signature recommandée de stabilité humaine pour la perturbation ZT sur le critère « vitesse »* . . . 94
5.8 *Signature recommandée de stabilité humaine pour la perturbation ZT sur le critère « confort des passagers »* . . . 96
5.9 *Signature recommandée de stabilité humaine pour la perturbation ZT sur le critère « qualité de service »* . . . 97
5.10 *Exemple de signature recommandée de stabilité humaine pour la perturbation CN0-2* . . . 105
5.11 *Association des évènements redoutés et des états de stabilité* . . . 115
5.12 *Distribution des évènements en fonction de la nature des états et changement d'état* . . . 115
5.13 *Association des évènements redoutés et des états de stabilité* . . . 117
5.14 *Distribution des évènements en fonction de la nature des états et changements d'état* . . . 117
5.15 *Association des évènements redoutés et des états de stabilité* . . . 119
5.16 *Distribution des évènements en fonction de la nature des états et changements d'état* . . . 119
5.17 *Utilisation des signatures de stabilité humaine* . . . 121
5.18 *Stabilité du système Homme-Machine* . . . 122
5.19 *Exemple d'électrocardiogramme (source : Google images)* . . . 122
5.20 *Exemple d'onde issu d'un électroencéphalogramme (source : Google images)* 122
5.21 *Exemple d'électrocardiogramme* . . . 123
5.22 *Exemple d'émotions tiré de [Luong 2006]* . . . 123
5.23 *Schéma général du processus de reconnaissance faciale issu de [Chelali 2005]* 123
5.24 Les méthodes multi-objectif . . . 125
A.1 Arbre des causes du système d'injection de sécurité d'une centrale nucléaire 146
A.2 La méthode Therp . . . 148

Liste des tableaux

1.1 *Définition des évènements du nœud papillon* 15
1.2 *Exemple d'application de la méthode Hazop* 19
1.3 *Méthodes d'évaluation de la sécurité* 20
1.4 *Nombre de SPADS en Europe (Partie 1)* 24
1.5 *Nombre de SPADS en Europe (Partie 2)* 24

3.1 *Exemple illustratif du formalisme de la stabilité humaine* 51
3.2 *Évènements observés durant la simulation* 62

4.1 *Caractéristiques du scénario sans perturbation* 75
4.2 *Liste des perturbations* 75
4.3 *Caractéristiques du scénario avec perturbation* 78
4.4 *Nature des états et changements d'état et leurs risques envisagés* 78
4.5 *Répartition des sujets par tranches d'âge* 79
4.6 *Répartition des sujets par niveau de connaissance* 79

5.1 *Temps de passage des sujets des différentes étapes des perturbations* . . . 91
5.2 *Comparaison des états de stabilité et changements d'état entre le scénario sans perturbation et celui avec perturbations* 91
5.3 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « vitesse » pour la perturbation ZT* 93
5.4 *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation ZT* 94
5.5 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation ZT* 95
5.6 *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation ZT* 95
5.7 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « qualité de service » pour la perturbation ZT* 95
5.8 *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation ZT* 96
5.9 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « vitesse » pour la perturbation DF* 97
5.10 *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation DF* 97
5.11 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation DF* 98
5.12 *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation DF* 98

5.13 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « qualité de service » pour la perturbation DF* 98
5.14 *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation DF* 99
5.15 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN2-0* 99
5.16 *Signature recommandée et risquée des natures de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN 2-0* 101
5.17 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-0* 101
5.18 *Signature recommandée et risquée des natures de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-0* 102
5.19 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN2-0* 103
5.20 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN0-2* 104
5.21 *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN0-2* 104
5.22 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN0-2* 105
5.23 *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN0-2* 106
5.24 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN0-2* 106
5.25 *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN0-2* 106
5.26 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN2-1* 107
5.27 *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation DF* 107
5.28 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-1* 107
5.29 *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-1* 108
5.30 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN2-1* 108
5.31 *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN2-1* 109
5.32 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « vitesse » pour la perturbation CM* 109
5.33 *Signature recommandée et risquée de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CM* 110

5.34 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CM* 111
5.35 *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CM* 112
5.36 *Signature recommandée et risquée de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CM* 113
5.37 *Tableau récapitulatif des perturbations et nature des états et changements d'état d'occurrence sur le critère « vitesse »* 114
5.38 *Évènements redoutés observés* 115
5.39 *Tableau récapitulatif des perturbations et nature des états et changements d'état d'occurrence sur le critère « confort des passagers »* 115
5.40 *Évènements redoutés observés* 116
5.41 *Tableau récapitulatif des perturbations et nature des états et changements d'état d'occurrence sur le critère « qualité de service »* 117
5.42 *Évènements redoutés observés* 118
5.43 *Nature des états et changements d'état et leurs risques envisagés* 119
A.1 *Tableau de la méthode HAZOP* 147

Introduction générale

Contexte et motivation de la thèse

La fin du XX^{ème} siècle a vu le développement rapide des transports publics au sein même des villes mais également entre les différentes agglomérations et régions. Les systèmes de transports guidés ont tiré leur épingle du jeu. Les raisons, qui ont poussé les communautés urbaines et les gouvernements à développer ce mode de transport, sont essentiellement écologiques et économiques. En effet, les communautés urbaines cherchent à diminuer la densité du trafic routier au sein de leurs centres et sur les grandes artères. En France, la liste des villes équipées de tramways ne cesse d'augmenter : par exemple, Valenciennes en 2006, Le Mans en 2007 ou, plus récemment, Toulouse en 2010, Reims et Angers en 2011. Le transport ferroviaire connaît lui aussi un essor important : ouverture de nouvelles lignes TGV, par exemple la ligne TGV-Est. L'implication de l'**UE** (Union Européenne) dans cette évolution et dans l'harmonisation des réseaux européens est forte et se matérialise, dans le cas du ferroviaire, par la mise en place d'un système de contrôle/commande Européen appelé **ERTMS**.

La sécurité de ce mode de transport est essentielle pour les concepteurs, mais aussi pour les exploitants. Actuellement, un ensemble de méthodes permettant de prendre en compte les risques lors de la conception et de l'exploitation de ces systèmes existe. Ces méthodes prennent en compte les aspects techniques mais aussi ponctuellement les aspects humains. Les études relatives aux systèmes techniques commencent à être relativement fiables. Quant à l'aspect humain, il est très peu pris en compte. Pourtant l'opérateur humain est au cœur du système, il est en charge de son bon fonctionnement au travers de diverses activités (conduite, supervision, maintenance, *etc.*). La nécessité de prendre en compte l'opérateur dans l'étude des systèmes est primordiale. Les chiffres parlent d'eux-mêmes. Dans les systèmes dits complexes, dont font partie les systèmes de transport, une part importante des incidents et accidents est liée à des « défaillances » de l'opérateur humain [Amalberti 2001], appelées erreurs humaines.

L'actualité, souvent dans des circonstances dramatiques et médiatisées, rappelle que l'Homme peut être à l'origine d'accidents. Dans le domaine des transports guidés, ces exemples sont nombreux comme des collisions aux passages à niveau, des collisions entre trains ou encore des déraillements. Dans ce contexte, proposer une nouvelle voie d'étude des facteurs humains, tel que le concept de stabilité humaine dans la conduite de systèmes, est une préoccupation légitime.

Concrétiser une telle approche est une tâche de grande ampleur. En effet, cette voie se situe à un carrefour pluridisciplinaire : la sécurité, l'automatique, la résilience, les facteurs humains et les systèmes homme-machine. Elle nécessite aussi d'étudier les différentes

disciplines citées précédemment, dans leurs différents domaines d'application. En effet, aucune étude sur la stabilité humaine n'est, à ce jour et à notre connaissance, en cours.

Malgré cette diversité de disciplines mais aussi de domaines d'application, nos travaux s'appuient, en partie, sur des recherches menées au sein de l'unité **ESTAS** et de l'axe ASHM (Automatique et Système Homme-Machine) du LAMIH.

Objectifs

Le contexte général de la thèse étant maintenant décrit et justifié, les objectifs sont exposés.

La thèse défend l'amélioration de la prise en compte des facteurs humains dans la conception et l'exploitation des systèmes de transports guidés. Elle défend une nouvelle approche de prise en compte des facteurs humains dans la sécurité de ces systèmes. Elle s'appuie sur l'étude de la stabilité de l'opérateur en phase de conduite.

Les premiers objectifs de la thèse sont :
- de définir, de caractériser et de formaliser la stabilité humaine,
- de parvenir à détecter la nature des états et changements d'état de la stabilité humaine,
- d'identifier des signatures de stabilité en fonction de la nature des perturbations et des tâches de l'opérateur humain.

Dans le cadre des travaux, l'étude de la stabilité humaine s'effectue « a posteriori ». Néanmoins, à terme, l'objectif est d'effectuer un contrôle de la stabilité humaine en ligne. Le but est de permettre la prise en compte de l'opérateur humain également comme un capteur de sécurité du système.

Organisation du mémoire

Le mémoire est structuré en cinq chapitres. Le ***premier chapitre*** dresse un état de l'art de la sécurité dans les transports guidés. Il expose les principales normes imposant les règles de sécurité aux concepteurs et aux exploitants. Ensuite, il présente les principales méthodes liées à l'évaluation de la sécurité sur le plan technique et celles permettant de prendre en compte l'aspect facteurs humains. Un constat sur les accidents est ensuite effectué afin d'identifier le rôle du facteur humain dans leurs occurrences. Cette étude vise à montrer que la prise en compte des facteurs humains dans les systèmes de transports guidés est insuffisante et justifie le choix d'une nouvelle approche de prise en compte de ces facteurs.

Dans le but d'éclaircir la notion de stabilité, le ***deuxième chapitre*** présente un état de l'art sur ce concept dans différents domaines. Dans un premier temps, cet état de l'art se focalise sur deux concepts :

- la sûreté de fonctionnement,
- la résilience.

L'objectif de ce premier état de l'art est de positionner la notion de stabilité par rapport à ces deux concepts qui permettent de prendre en compte, notamment, la notion de sécurité. Ensuite, un état de l'art sur la stabilité dans les différents domaines est présenté et une synthèse sur ce concept est effectuée. Ce chapitre établit que la stabilité permet d'améliorer la sécurité du système, notamment en le maintenant dans un état de fonctionnement désiré. Il justifie la nouvelle approche proposée dans ce mémoire.

Le ***troisième chapitre*** expose une méthodologie permettant la caractérisation et l'identification de la stabilité humaine. Une définition de la stabilité humaine est proposée. Ensuite la nature des états et changements d'état relatifs à la stabilité humaine est définie. Un formalisme est alors associé à ces différents états et changements d'état. Sur la base de ce formalisme, trois algorithmes permettant la détection de la nature des états et changements d'état sont donnés. Le premier propose une détection temporelle de la stabilité humaine, le second une détection fréquentielle et enfin, le dernier, vise à identifier des séquences de stabilité et les associer aux perturbations afin d'identifier une signature de stabilité propre à l'évènement. Pour pouvoir appliquer ces algorithmes, un ensemble de critères permettant l'étude de la stabilité est présenté. Ces critères sont classifiés en trois facettes : « état », « comportement » et « performance ».

Le ***quatrième chapitre*** présente l'application de la stabilité humaine au domaine des transports guidés. Le choix a été fait de s'appuyer sur le nouveau système de contrôle/commande européen **ERTMS/ETCS** (European Train Control System) car peu d'études sur l'impact des facteurs humains dans l'exploitation de ce système existent. Deux scénarios ont été définis. Le premier vise à familiariser les sujets avec la plate-forme (interface de conduite, environnement 3D) et à étudier la stabilité humaine dans le cadre d'un fonctionnement normal de conduite ferroviaire. Le second scénario propose une étude de la stabilité humaine dans une situation de conduite perturbée. La population qui a participé à la campagne expérimentale est décrite ainsi que les modalités de passations. La passation se déroule en deux phases. La première propose une formation aux systèmes **ERTMS/ETCS** et à la plate-forme elle-même puis les sujets sont invités à participer au scénario. En fin de passage, un debriefing est effectué. La seconde phase consiste à dérouler le scénario suivant. De nouveau, à la fin de la passation, un debriefing est effectué. Enfin, le travail de formatage des données récoltées en vue de leur analyse est présenté.

L'application au transport ferroviaire est achevée dans le ***dernier chapitre***. Il présente l'ensemble des résultats issus de l'analyse des données de la campagne expérimentale. Les évaluations des données des différents sujets ayant participé à la campagne délivrent plusieurs enseignements importants. À leur lumière, une discussion permet de tirer un bilan des travaux accomplis. Elle permet aussi de proposer un ensemble de

perspectives relatif aux travaux de la thèse.

Note de lecture

Les sigles disponibles dans le glossaire apparaissent en gras dans le texte.

CHAPITRE 1

La sécurité des modes de transports guidés

Table des matières

1.1 Introduction **5**
1.2 Prise en compte de la sécurité dans les transports guidés **6**
1.2.1 Aspects réglementaire et normatif 7
1.2.1.1 Processus de certification d'un système ferroviaire 9
1.2.1.2 Processus de certification d'un système de transport guidé urbain 10
1.2.1.3 Prise en compte de la sécurité dans les rapports *a posteriori* 10
1.2.2 Procédures d'exploitation et de maintenance 12
1.3 Méthodes d'évaluation de la sécurité **12**
1.3.1 Notion de risque et maîtrise des risques 12
1.3.2 Méthodes centrées sur les facteurs techniques 13
1.3.2.1 La méthode APR 13
1.3.2.2 La méthode AMDEC 14
1.3.2.3 Le nœud papillon ou diagramme causes-conséquences . . 14
1.3.3 Méthodes centrées sur le facteur humain 15
1.3.3.1 Les modèles de fonctionnement de l'opérateur humain . . 16
1.3.3.2 Les méthodes TESEO et HCR 17
1.3.3.3 La méthode THERP 18
1.3.3.4 La méthode ACIH 19
1.3.3.5 La méthode HAZOP 19
1.4 L'accidentologie dans les transports guidés **21**
1.4.1 Les origines des incidents et accidents 21
1.4.2 Le retour d'expérience 23
1.5 Conclusion **26**

1.1 Introduction

Avec l'ouverture des frontières, des marchés et des espaces d'échanges, le transport des personnes et des biens est désormais un enjeu économique et écologique majeur pour

la majorité des états. Cet intérêt se traduit par un effort constant de développement des réseaux, des infrastructures, des matériels et par l'amélioration des services associés aux différents modes de transport. A titre d'exemple, l'Union Européenne subventionne, depuis quelques années, les systèmes ferroviaires (TGV, TER et fret) et les systèmes de transports guidés urbains (métros, tramways, téléphériques, *etc.*) par le biais d'aides financières ou d'appels à projets de recherche. De tels projets (**UGTMS**, **MODURBAN**, **MODSAFE**, **PANsafer**, **ITERATE**, *etc.*) visent non seulement à éprouver l'emploi de nouvelles technologies et à optimiser les performances de ces systèmes, mais également à assurer le confort et la sécurité des usagers et des biens. Malgré les innovations technologiques associées à ces différents projets (nouvelle architecture pour la commande, le contrôle, *etc.* des transports guidés urbains concernant le projet **MODURBAN**, autoroute ferroviaire sans signalisation sol dans le cadre de l'implémentation **ERTMS** niveau 3), l'occurrence d'incidents/accidents reste significative.

Les conséquences des accidents, souvent tragiques, plus particulièrement dans les transports, sont régulièrement sujettes à des couvertures médiatiques qui peuvent être néfastes en terme d'image pour toute la filière du secteur (concepteurs, constructeurs, pouvoirs publics, exploitants, *etc.*).

Afin de réduire le risque d'occurrence d'accidents, des fonctions et des moyens sont mis en œuvre à chaque phase du cycle de vie du système. Ces mesures visent, de façon évidente, à assurer la sécurité du système lui-même mais aussi de son environnement. Plus généralement, le critère « sécurité » est défini par l'aptitude de l'entité ou du système à éviter l'occurrence d'états critiques ou catastrophiques [Beugin 2006].

Dans le secteur ferroviaire, la terminologie du terme « sécurité » fait référence à un ensemble de moyens techniques et humains permettant d'éviter l'occurrence d'incidents et d'accidents ou d'en limiter les conséquences. Ce chapitre propose d'étudier les moyens techniques et humains permettant d'assurer la sécurité des transports guidés, ce domaine constituant le domaine applicatif des travaux de recherche présentés dans ce mémoire. Il est divisé en trois parties. La première partie se focalise sur la prise en compte de la sécurité en conception des transports guidés dans un cadre réglementaire. La partie suivante présente les méthodes d'évaluation qualitative et quantitative de la sécurité intégrant les aspects techniques et humains. Enfin, la troisième partie s'intéresse à l'accidentologie dans les transports guidés et souligne l'intérêt de renforcer les études centrées sur l'humain.

1.2 Prise en compte de la sécurité dans les transports guidés

La sécurité dans les transports guidés est intégrée tout au long du cycle de vie du système, non seulement pour les aspects réglementaires et normatifs durant les phases de conception et d'exploitation, mais également pour la phase de démantèlement. Elle s'accompagne de la mise en place de procédures de conduite, de supervision et de maintenance. La législation dans le domaine du transport ferroviaire et guidé urbain est une priorité de l'**UE** (Union Européenne) pour l'harmonisation des processus et des réseaux.

1.2.1 Aspects réglementaire et normatif

Le domaine ferrovaire est très normalisé. Dans le domaine des transports guidés urbains, ces mêmes normes sont très souvent utilisées, mais néanmoins, aucune directive européenne n'encadre leur utilisation. La norme générique IEC 61508 [CEI61508 1998], pour les **E/E/PE** (Electrical/Electronic/Programmable Electronic) est définie par le **CENELEC** (Comité Européen de la Normalisation Electrotechnique) et est utilisée comme référentiel dans les grands secteurs industriels (*figure 1.1*).

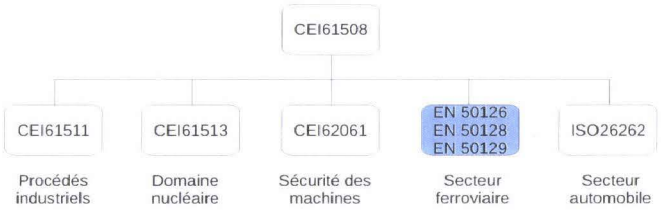


Figure 1.1 – *La norme IEC 61508 et ses dérivées*

La norme IEC 61508 dans son cadre d'application au secteur ferroviaire est déclinée en trois normes :

- la norme EN 50126 (janvier 2000) [EN50126 2000] : elle impose la démonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité. Elle permet une approche cohérente et peut être appliquée tout au long du cycle de vie du système ferroviaire,
- la norme EN 50128 (juillet 2001) [EN50128 2001] : elle se focalise sur la partie logicielle des systèmes ferroviaires et permet de prouver que les logiciels satisfont aux exigences du niveau de sécurité intégré. Les **SIL** (Safety Integrated Level), définis dans la norme, permettent de spécifier l'exigence d'intégrité des fonctions de sécurité attribuée aux systèmes. Les **SIL** représentent la probabilité de défaillances dangereuses par heure et sont divisés en quatre niveaux :
  - **SIL**4 : cette probabilité d'occurrence est comprise entre 10^{-9} et 10^{-8},
  - **SIL**3 : cette probabilité d'occurrence est comprise entre 10^{-8} et 10^{-7},
  - **SIL**2 : cette probabilité d'occurrence est comprise entre 10^{-7} et 10^{-6},
  - **SIL**1 : cette probabilité d'occurrence est comprise entre 10^{-6} et 10^{-5},
- la norme EN 50129 (mai 2003) [EN50129 2003] : elle est appliquée aux systèmes électroniques de sécurité pour la signalisation ferroviaire.

Associé à cette volonté de l'**UE** d'intégrer les transports guidés urbains dans la législation, le projet de norme IEC 62290-2 [IEC62290-2 2011] est en cours de publication. Il spécifie les exigences fonctionnelles systèmes et d'interface des systèmes de contrôle/commande et de gestion destinés à être utilisés sur les lignes et les réseaux de transport guidé urbain de voyageurs. Cette norme ne traite pas directement des aspects

liés à la sécurité publique mais les exigences de sécurité technique sont prises en compte. Ces exigences peuvent contribuer à la garantie de la sécurité publique à l'intérieur des transports guidés urbains.

L'article 2 de l'Arrêté du 1er juillet 2004 (mise à jour le 19 février 2010) du **RFN** (Réseau Ferré National) et dont l'intégralité est disponible en Annexe 1, met en évidence l'apport des normes dans les processus de conception et d'exploitation des systèmes guidés. Il impose aux acteurs du transport ferroviaire d'éditer des dossiers s'appuyant sur ces normes : *« En vue de pourvoir à la sécurité des personnes, au bon fonctionnement du système ferroviaire et à la préservation de l'environnement, ces dossiers, rédigés en français, font référence aux prescriptions techniques, ainsi qu'aux recommandations et règles de l'art représentatives de l'expérience acquise en matière de matériel roulant... »*. Le paragraphe suivant énumère les différents dossiers :

- Le **DDS** (Dossier de Définition de la Sécurité) constitue la première phase de l'étude de la sécurité des systèmes. Cette phase initie une communication entre l'**AOT** (Autorité Organisatrice des Transports), les représentants de l'autorité nationale (**DRIEA** (Direction Régionale et Interdépartementale de l'Équipement et de l'Aménagement)/**DDE** (Direction Départementale de l'Équipement)), le **STRMTG** (Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés), le préfet pour les transports guidés urbains et l'**EPSF** (Établissement Public de Sécurité Ferroviaire) pour le ferroviaire en France. Le dossier établit le cadre juridique et propose le plan préliminaire de sécurité et de qualité. Il contient les caractéristiques principales du système, à savoir les caractéristiques fonctionnelles et techniques du système et les objectifs de sécurité globaux. Enfin, il liste les évènements pouvant conduire à des incidents ainsi que les principes de leur prévention. L'évaluation du **DDS** par un organisme indépendant n'est cependant pas obligatoire.
- Le **DPS** (Dossier Préliminaire de Sécurité) détaille les exigences de sécurité. Il présente les risques naturels et technologiques tout en démontrant que l'ensemble des évènements redoutés est identifié. Pour chacun de ces évènements, les causes, les principes de prévention et de limitation des conséquences sont fournis. Un rapport indépendant, rédigé par un **EOQA** (Expert ou Organisme Qualifié Agréé), est ajouté au dossier. Il peut y avoir plusieurs **EOQA** s'il y a plusieurs sous-systèmes impliqués. L'**AOT** approuve le **DPS**.
- Le **DS** (Dossier de Sécurité) est le document de sécurité final. Il reprend le **DDS** et le **DPS**. Son objectif est de démontrer que les exigences décrites dans le **DPS** sont validées. Il précise de façon quantitative les objectifs en matière de sécurité ainsi que les indicateurs de suivi tout au long du cycle de vie du système. Le **DS** assure que le système a atteint ses objectifs de sécurité.
- Le dossier d'autorisation des tests et essais pouvant présenter des risques pour les tiers, les riverains et les utilisateurs, comporte le descriptif des tests ou essais programmés ainsi que leurs modes d'évaluation.
- Le règlement de sécurité de l'exploitation définit l'organisation de l'exploitation. Il précise les procédures d'exploitation normale, particulière et dégradée ainsi que les

procédures de maintenance à appliquer.

Le processus de certification, que ce soit dans le domaine ferroviaire ou dans les transports guidés urbains, s'appuie sur ces dossiers.

1.2.1.1 Processus de certification d'un système ferroviaire

Le processus de certification des systèmes ferrovaires est illustré par la figure *1.2*.

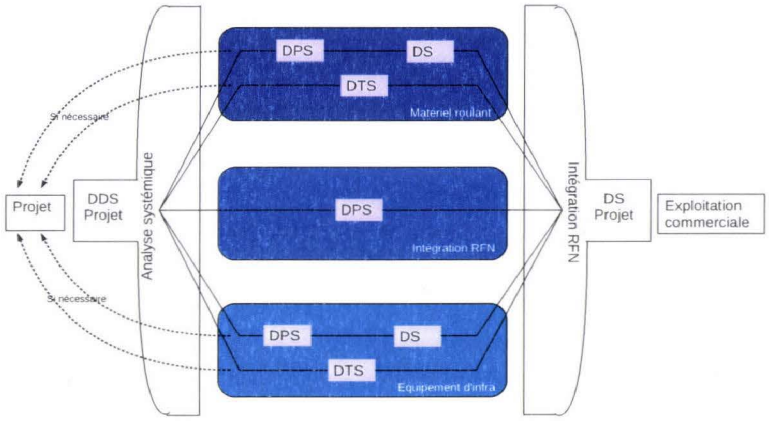


Figure 1.2 – *Illustration du processus français d'approbation de systèmes ferroviaires [EPSF 2009]*

Il s'articule autour de trois grandes phases d'homologation :
- une sur le matériel roulant,
- une pour l'intégration sur le **RFN**,
- une sur l'infrastructure.

Le processus de certification dans le domaine ferrovaire débute par des négociations entre le promoteur et l'**EPSF**. Suite à ces échanges, le **DDS** et le **DPS** sont successivement rédigés. Si l'**EPSF** juge les propositions de ces dossiers insuffisantes, il peut demander la réévaluation des hypothèses ou des compléments sur ces dossiers. Dans le cas contraire, les dossiers sont validés. L'**EOQA**, désigné dans le **DDS**, est chargé d'adjoindre un rapport sur la sécurité au **DPS**. Ensuite le **DS** est fourni et reprend les évaluations et éléments de preuve du respect des engagements pris dans le **DPS** et apporte aussi la preuve que les hypothèses de sécurité formulées dans le **DPS** sont valables. L'**EOQA** juge et valide la pertinence et l'efficacité des mesures prises par le promoteur. Pour le matériel roulant et l'infrastructure, s'il s'agit d'une modification de matériel déjà homologué, le **DDS**, le **DPS** et le **DS** sont remplacés par le **DTS** (Dossier Technique de Sécurité).

1.2.1.2 Processus de certification d'un système de transport guidé urbain

La figure *1.3* présente le cheminement complet de l'analyse de sécurité en vue de l'homologation et de la mise en service d'un système de transport guidé urbain..

Le processus débute par la réalisation du **DDS** par l'**AOT**. Lorsque celui-ci est rédigé, il est vérifié par l'autorité de sécurité avec le soutien de l'autorité accréditée. Ensuite, l'**AOT** prépare le **DPS**. Le cheminement demeure identique à celui du **DDS**. L'autorité de sécurité l'évalue avec l'aide de l'autorité accréditée. Une fois le dossier approuvé, les fonds sont accordés et l'**AOT** peut alors entamer le **DS** en concertation avec les acteurs associés au processus. Les experts de sécurité évaluent ce dossier avant de le fournir à l'autorité de sécurité qui l'approuvera avec la collaboration de l'autorité accréditée. Une fois ce dernier dossier approuvé, la mise en service est autorisée.

Les processus d'homologation des systèmes ferroviaires et des systèmes guidés urbains présentent des points communs. Ils nécessitent la préparation des mêmes dossiers mais cependant avec certaines différences. Dans le transport ferroviaire, les processus d'évaluation sont divisés en trois parties (matériel roulant, infrastructures et intégration **RFN**). Pour les transports guidés urbains, ces trois parties sont traitées conjointement. Cette différence est liée à l'organisation de ces deux systèmes. Dans le transport ferroviaire, l'exploitant (la **SNCF** (Société Nationale des Chemins de fer Français) par exemple) et le gestionnaire du réseau (**RFF** (Réseau Ferré de France)) sont deux entités différentes. Ceci explique le traitement séparé de l'infrastructure et du matériel roulant mais aussi l'intégration de ce dernier sur le **RFN**. Dans les transports guidés urbains, l'exploitant est également responsable de l'infrastructure, il n'est donc pas nécessaire de séparer les dossiers. Un autre dossier peut apparaître dans le transport ferroviaire : le **DTS** s'il s'agit d'intégrer des modifications sur le matériel existant. Dans les transports guidés urbains, ce dossier n'apparaît pas.

Dans le processus d'homologation des systèmes de transport guidé, le facteur humain est peu pris en compte. Pourtant, il peut influer sur la sécurité du système. Les aspects humains sont un peu plus présents dans la prise en compte de la sécurité *a posteriori*.

1.2.1.3 Prise en compte de la sécurité dans les rapports *a posteriori*

Certaines analyses de la sécurité sont effectuées *a posteriori* [Richard 2008a]. Elles comportent :

- les rapports annuels de sécurité de l'exploitation qui doivent être établis par les exploitants des systèmes de transports publics guidés. Ces rapports contiennent le descriptif des évènements affectant la sécurité du système de transport,
- les rapports circonstanciés sur chacun des évènements importants survenus lors de l'exploitation du système en précisant les causes, les conséquences, les dangers potentiels, les enseignements et les mesures prises.

Ces différents rapports prennent en compte, sporadiquement, le facteur humain de par la description des évènements. Les aspects humains sont pris en compte à un plus

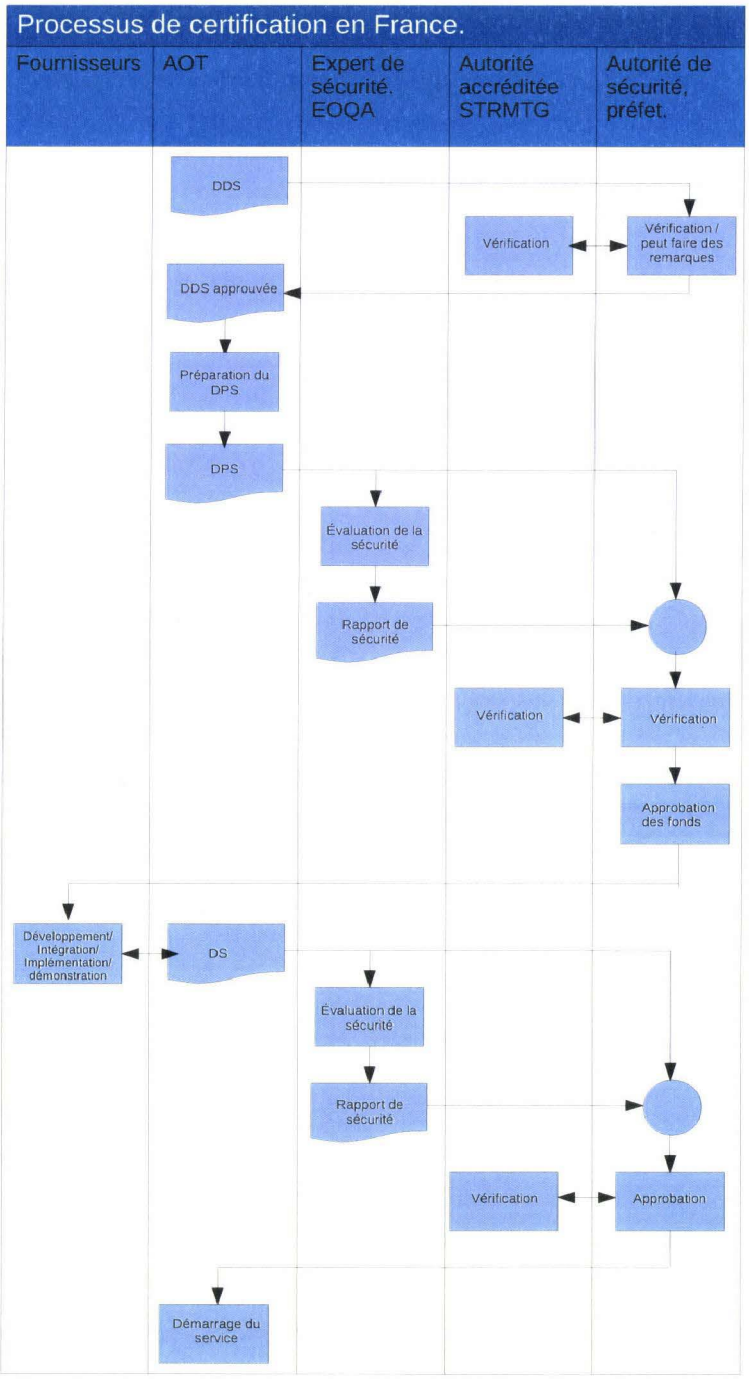


Figure 1.3 – *Illustration du processus français d'approbation de systèmes de transport guidé urbain [MODSAFE 2011]*

haut niveau dans l'élaboration des procédures.

1.2.2 Procédures d'exploitation et de maintenance

Les procédures, qu'elles soient destinées à l'exploitation ou à la maintenance, tiennent compte de la sécurité. Elles permettent de gérer les risques en conduite et en supervision des systèmes de transports ou induits par les opérateurs de maintenance. Par exemple, concernant les chantiers de maintenance, les risques sont :

- heurts par un mobile guidé sur rail,
- mise en danger par l'effet de souffle lors du passage d'un train,
- *etc.*

Afin de pallier à ces risques, toute une série de procédures a été mise en place. Ces procédures peuvent imposer des interdictions de circulation. Si, pour des raisons de service, il n'est pas possible de confiner la voie, des procédures d'annonce sont mises en place. Ces procédures imposent aux agents de maintenance de quitter la zone de chantier afin de se placer dans une zone dite sûre. Cette procédure est définie en plusieurs étapes :

- annonce de la circulation qui représente la source de danger,
- déplacement du personnel de maintenance et du matériel vers une zone sûre,
- surveillance de la circulation depuis la zone sûre,
- reprise du chantier après le passage de la circulation.

Les procédures montrent la prise en compte de l'aspect humain en imposant des tâches à effectuer afin d'éviter l'occurence d'évènements indésirables.

L'ensemble des textes, normes ou procédures permet d'effectuer une étude sur les risques en sécurité dès la conception. Ils imposent aux concepteurs et aux exploitants de systèmes de transport guidé l'utilisation de méthodes permettant d'évaluer les risques.

1.3 Méthodes d'évaluation de la sécurité

Pour satisfaire aux exigences de ces normes de sécurité, les acteurs du secteur des transports guidés ont à leur disposition plusieurs méthodes. Ces méthodes sont appliquées *a priori*. Elles se focalisent soit sur les facteurs techniques, sous la forme de « check-lists » des risques techniques, soit sur les facteurs humains.

1.3.1 Notion de risque et maîtrise des risques

Afin d'évaluer au mieux les systèmes à concevoir et à exploiter, les acteurs du secteur des transports guidés utilisent des méthodes d'analyse des risques répondant, notamment, aux principes **GAME** (Globalement Au Moins Équivalent) ou **ALARP** (As Low As Reasonably Practicable). Le principe **GAME** permet de s'assurer que le nouveau système répond, au moins, aux mêmes exigences que les anciens systèmes de même type. Il se base sur le cadre réglementaire et technique du système. Le principe **ALARP** permet de déterminer si l'amélioration de la sécurité est suffisante par rapport aux coûts en matériel,

personnel, *etc.* qu'elle nécessiterait. Les modalités d'utilisation de ces deux principes sont disponibles dans [MODURBAN 2009].

Selon la définition de la sécurité évoquée dans la section 1, il apparaît évident de déterminer l'ensemble des évènements dits « redoutés », c'est-à-dire laissant apparaître un niveau de risque inacceptable et de proposer des fonctions, outils, sous-systèmes et/ou procédures faisant obstacle à l'occurrence de tels évènements. Le risque à mesurer est une fonction à 2 variables caractérisant un évènement redouté [Heurtel 2003] :

- la probabilité d'apparition,
- la gravité des conséquences.

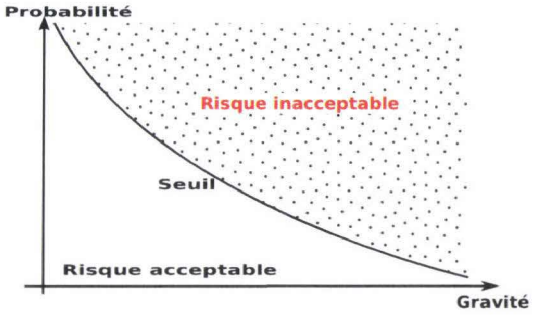


Figure 1.4 – *Courbe de risque de Farmer*

Lorsque le « compromis » gravité/probabilité (cf. *figure 1.4*) est au-dessus du seuil, le risque est considéré comme inacceptable, lorsqu'il est en-dessous, le risque est considéré comme acceptable. Dans la littérature, ce compromis peut aussi être appelé criticité.

Les deux sections suivantes décrivent les principales méthodes et démarches employées, en conception et/ou en exploitation, pour évaluer les risques et la sécurité d'un système de transport guidé.

1.3.2 Méthodes centrées sur les facteurs techniques

1.3.2.1 La méthode APR

L'**APR** (Analyse Préliminaire de Risques) [Sourisse 1996] et [Châtelet 2008] suit le cycle de vie du système à partir de la phase de conception. L'objectif de cette méthode est, d'une part, de déterminer les risques, leurs causes et la gravité de leurs conséquences, et d'autre part, de définir la probabilité des évènements initiateurs et les règles en conception ou les procédures. Elle débouche sur une liste aussi complète que possible des **ER** (Évènements Redoutés). Pour chaque évènement redouté elle établit sa gravité, sa vraisemblance et sa criticité. Pour cela, elle se base sur (Annexe 2) :

- la matrice de gravité,
- l'échelle de vraisemblance,
- la table de criticité.

Le tableau, disponible en annexe 3, traite l' exemple d'une livraison de marchandises par ferroutage selon la méthode **APR**.

1.3.2.2 La méthode AMDEC

L'APR permet d'identifier les scénarios ou les environnements et sous-systèmes menant à un accident. L'**AMDEC** (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité) [Sourisse 1996] et [Châtelet 2008], quant à elle, est utilisée pour identifier les modes de défaillances simples susceptibles de conduire à des effets sur la sécurité, la fiabilité, la disponibilité et la maintenabilité du système. Il s'agit d'une méthode statique d'analyse des systèmes pour l'étude des causes et la maîtrise des défaillances et de leur criticité pouvant affecter les composants du système. Son objectif est d'estimer l'occurrence d'une défaillance et ses conséquences. Un exemple est fourni en Annexe 3.

Certaines rubriques apparaissent parfois afin de prendre en compte des aspects spécifiques, comme l'aspect humain, susceptibles de provoquer ou non, l'apparition d'une défaillance.

1.3.2.3 Le nœud papillon ou diagramme causes-conséquences

Le nœud papillon est une méthode arborescente. Il est très utilisé en Europe, notamment dans les pays qui possèdent une approche probabiliste. La méthode regroupe les approches de l'arbre des causes [Rodriguez 1999] (Annexe 4) et de l'arbre des évènements. Le fonctionnement général de la méthode est décrit par la figure *1.5*. Le tableau *1.1* fournit les différents évènements du scénario.

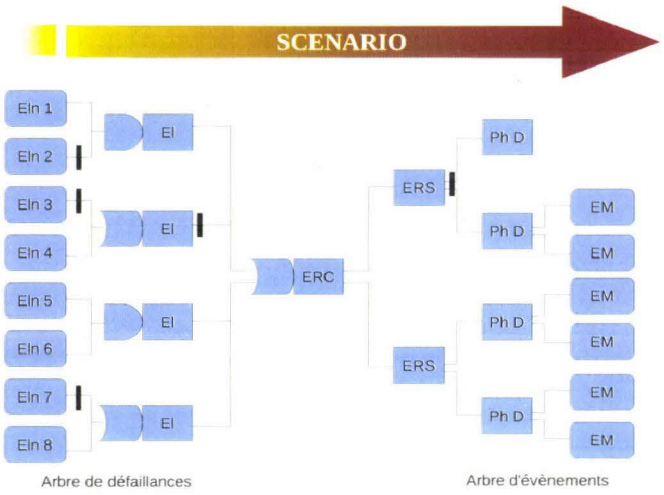


Figure 1.5 – *Représentation de scénarios d'accident selon le modèle du nœud papillon*

Cette méthode est très coûteuse en temps. Néanmoins, elle permet d'obtenir une vision complète d'un ou plusieurs scénarios d'accident depuis ses causes initiales jusqu'à

Tableau 1.1 – *Définition des évènements du nœud papillon*

Désignation	Signification	Définition
Eln i	Évènement indésirable i	Dérive ou défaillance issue des conditions d'exploitation
EC	Évènement courant	Évenement admis survenant de façon régulière pendant la durée de vie du système
ERC	Évènement redouté central	Perte d'intégrité physique du système
ERS	Évènement redouté secondaire	Conséquence directe de l'ERC
Ph D	Phénomène dangereux	Phénomène pouvant engendrer des dégats majeurs
EM	Effet majeur	Dommages causés aux personnes, à l'environnement, aux biens
Barrières et/ou mesures de prévention		Barrières visant à prévenir la perte d'intégrité physique
Barrières et/ou mesures de protection		Barrières visant à prévenir la perte d'intégrité physique

ses conséquences.

De plus, cet outil met en valeur l'utilisation des barrières de sécurité qui s'opposent au scénario étudié [Polet 2002].

Ces méthodes sont parfois utilisées de manière complémentaire. Néanmoins, elles ne prennent pas, ou trop partiellement, en compte les facteurs humains. Pour combler cette insuffisance, ces dernières années, des méthodes basées sur des modèles cognitifs de l'opérateur humain, sur un calcul de probabilité d'échec de comportements, sur des taxonomies d'erreur, sur les conséquences des erreurs humaines, *etc* ont été développées. La section suivante présente ces différentes méthodes.

1.3.3 Méthodes centrées sur le facteur humain

En conception, les facteurs humains sont intégrés, partiellement, dans les analyses de sécurité à partir de méthodes telles que l'**AMDEC** ou la méthode de l'arbre de causes. De plus, l'erreur humaine est souvent identifiée dans l'occurrence d'un évènement indésirable comme un facteur isolé sans en décliner les causes. Depuis les années 70, afin de contrôler et fixer les erreurs humaines, des études spécifiques sur l'opérateur humain ont vu le jour. Les travaux se sont penchés, d'une part, sur la fiabilité humaine, la définition et la classification de l'erreur humaine et, d'autre part, sur la mise au point de méthodes de quantification de l'erreur humaine [Vanderhaegen 2003]. Cette partie présente ces différents travaux.

1.3.3.1 Les modèles de fonctionnement de l'opérateur humain

Le modèle de résolution de problèmes le plus connu est certainement celui de Rasmussen (*figure 1.6*) [Rasmussen 1982].

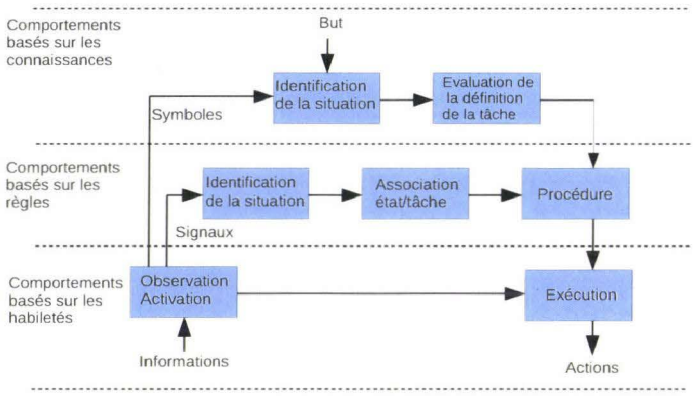


Figure 1.6 – *Modèle de résolution de problèmes de Rasmussen*

Il est décomposé selon trois niveaux comportementaux :

1. Le comportement fondé sur les habiletés. L'opérateur humain exécute de façon quasi-automatique des actions en réponse à des informations sur la situation courante.
2. Le comportement basé sur les règles. Les règles permettent d'identifier l'état du procédé puis de choisir rapidement la procédure de résolution appropriée.
3. Le comportement basé sur les connaissances. Aucune règle ou procédure n'est disponible pour résoudre le problème ce qui oblige l'opérateur humain à chercher, dans sa base de connaissance, une solution.

Pour les problèmes relevant de l'erreur humaine, ce modèle est complété par celui de Reason [Reason 1990], lié au mauvais fonctionnement de l'opérateur humain, présenté figure *1.7*.

Ce modèle permet d'établir un diagnostic d'erreur humaine à partir d'une taxonomie intégrant quatre modes d'erreur :

1. les ratés. Ils correspondent à des défaillances attentionnelles telles que intrusion, contre-temps, omission...
2. les lapsus. Ils sont induits par des défaillances de la mémoire comme la perte de lieu, l'oubli d'intention...
3. les fautes. Elles se focalisent sur des règles telles que mauvaise application d'une règle, application d'une mauvaise règle...
4. les violations. Elles représentent des actions volontaires.

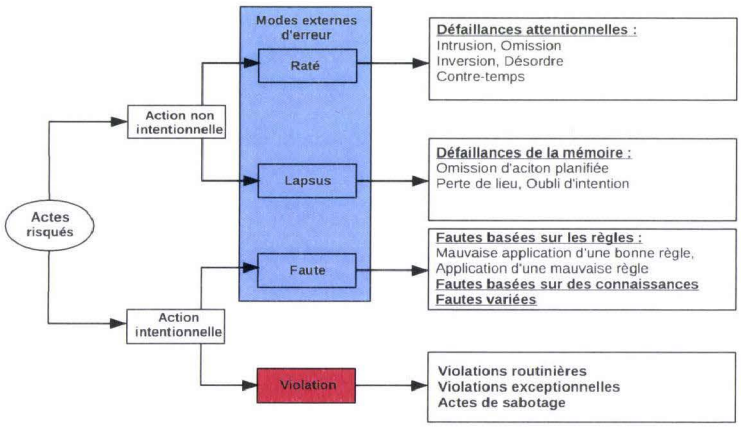


Figure 1.7 – Modèle de mauvais fonctionnement de l'opérateur humain de Reason

Les actes risqués présentent ici une intention préalable d'agir sur le procédé. Les actions dites non intentionnelles sont les actions pour lesquelles l'opérateur n'avait pas l'intention de diverger par rapport à ce qu'il avait prévu, mais pour lesquelles le résultat obtenu est néanmoins différent de celui attendu. Dans ce type d'actions, ce sont les ratés et les lapsus qui sont responsables des erreurs. Dans les actions dites intentionnelles, il n'y a pas de divergence entre ce qu'avait prévu de faire l'opérateur et ce qu'il a fait réellement. La distinction entre faute et violation s'effectue de la manière suivante : il y a faute quand le résultat obtenu est différent du résultat prescrit sans intention et il y a violation quand cette action est volontaire. Les ratés et les lapsus sont dus à des défaillances dans l'exécution et/ou la mémorisation d'actions préalablement sélectionnées, alors que les fautes sont dues à des défaillances dans la sélection de tâches. Par rapport au modèle de bon fonctionnement de l'opérateur humain de Rasmussen, les ratés et les lapsus se retrouvent dans le comportement de bas niveau basé sur les habiletés. Les fautes se manifestent dans les deux autres types de comportement humain. Elles concernent une dérive entre l'intention de l'opérateur et celle qu'il aurait dû avoir pour satisfaire les objectifs.

Suite à cette classification des erreurs humaines, les études se sont focalisées sur la quantification de l'erreur humaine. Des méthodes permettant d'évaluer quantitativement ou qualitativement l'erreur humaine sont détaillées dans la suite.

1.3.3.2 Les méthodes TESEO et HCR

Les méthodes **TESEO** (Tecnica Empirica Stuma Errori Operati) et **HCR** (Human Cognitive Reliability) se basent sur des tables prédéfinies. Les coefficients nécessaires au calcul sont choisis dans ces tables par des experts. Cette démarche heuristique engendre des résultats fortement contrastés pour une même étude. En effet, les estimations de l'erreur humaine sont biaisées par le choix des critères, par leurs interprétations et par leurs domaines d'application. Elles amènent à des résultats hétérogènes si une même équipe

utilise différentes méthodes pour quantifier l'erreur humaine ou si une même méthode est utilisée par différentes équipes [Kirwan 1997]. En conséquence, elles ne sont pas détaillées dans ce mémoire.

1.3.3.3 La méthode THERP

La méthode **THERP** (Technique for Human Error Rate Prediction) [Swain 1983] permet, pour une tâche, de prédire l'erreur humaine sous forme d'une probabilité.

Pour chaque tâche de l'opérateur, une probabilité de succès ou d'échec est estimée. Une tâche est une prescription qui permet à l'opérateur d'accomplir une fonction. Elle est liée à l'objectif des moyens techniques ou humains qui réalise la fonction. Une fonction, quant à elle, est liée à l'objectif du procédé piloté, c'est-à-dire aux services rendus par celui-ci. Pour chaque tâche suivante, la probabilité de succès ou d'échec est donnée en fonction de la probabilité de succès ou d'échec de la tâche précédente. Lors de la dernière tâche, la probabilité de succès ou d'échec générale peut être déterminée.

Dans l'exemple de la figure *1.8*, décrit par la méthode de Bernouilli, la probabilité de succès final est $P(S) = 0,999$ et celle d'échec est de $P(E) = 1 - P(S)$.

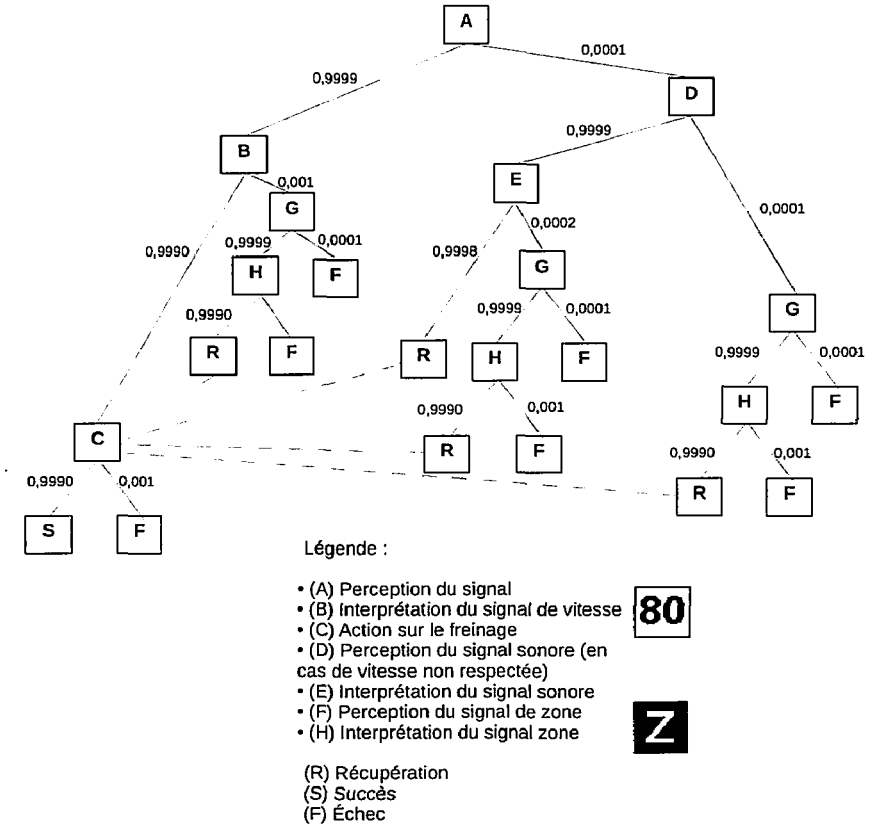


Figure 1.8 – *Exemple d'application de la méthode Therp*

Enfin, cette méthode permet de connaître la probabilité de succès de la tâche mais ne permet pas d'identifier les causes ni le type d'erreur qui pourraient engendrer l'échec de la tâche.

1.3.3.4 La méthode ACIH

La méthode **ACIH** (Analyse des Conséquences de l'Infiabilité Humaine) étudie les conséquences de l'infiabilité humaine [Vanderhaegen 2003]. Une analyse fonctionnelle identifie les fonctions du système et le rôle des opérateurs dans la réalisation des fonctions identifiées. Ces fonctions sont exprimées en terme de procédures. Une analyse procédurale et contextuelle définit les contextes associés à chaque procédure ainsi que les tâches à réaliser dans ces contextes. Une analyse des tâches et de l'activité détermine les comportements prescrits.

En complément, une analyse de l'activité permet d'obtenir les comportements réels. A partir de ces différents comportements, il est possible de cerner les modes erronés, détournés et ajoutés et, ainsi, d'en analyser les conséquences. Cette méthode ne vise donc pas à donner des probabilités de succès de la tâche ou d'occurrence d'erreurs humaines mais vise à analyser les conséquences liées à l'activité humaine.

1.3.3.5 La méthode HAZOP

La méthode **HAZOP** (HAZardous OPerability) ne considère pas les modes de défaillances mais les dérives potentielles des paramètres liées à l'exploitation de l'installation.Á la différence de l'**AMDEC**, elle est centrée sur l'installation et non sur les composants.

Des études [Richard 2008a] ont été menées afin de pouvoir la transposer à l'opérateur humain. Dans un premier temps, il s'agit de déterminer les paramètres de l'opérateur humain pouvant dévier et présenter un risque potentiel. La tâche de l'opérateur se divise en trois phases essentielles :

- La perception : l'opérateur humain perçoit son environnement.
- L'interprétation : l'opérateur humain interprète ce qu'il a précédemment perçu.
- L'action : en fonction de son interprétation, l'opérateur effectue une ou plusieurs actions.

L'exemple du tableau *1.2* illustre la méthode **HAZOP**. Il reprend les paramètres de l'exemple de la méthode **THERP** (*figure 1.8*).

Tableau 1.2 – *Exemple d'application de la méthode Hazop*

N°	Mot-clé	Paramètre	Causes	Conséquences	Risques associés
1	Trop	Vitesse	Rattrape retard	Sur-vitesse	Freinage d'urgence, déraillement, collision

Continue sur la page suivante

Tableau 1.2 *Exemple d'application de la méthode Hazop – Suite*

N°	Mot-clé	Paramètre	Causes	Conséquences	Risques associés
2	Durée de fermeture paupières	Trop long	Endormissement	Non action	Retard, collision, déraillement...
3	Handicap	Trop fort	Physique	Action plus lente	Retard, collision, déraillement...
4	Temps de réaction	Trop long	Fatigue, stress, préoccupations...	Retard dans la procédure	Franchissement de signaux, collision...

La méthode **HAZOP** a pour avantages de prendre en compte les causes, les conséquences, et surtout, de proposer des parades aux différentes dérives des paramètres. Toutefois, elle ne permet pas de prendre en compte une succession de dérives de paramètres, chaque paramètre étant étudié indépendamment.

En conclusion, le tableau *1.3* dresse une synthèse des méthodes centrées, d'une part, sur les facteurs techniques et, d'autre part, sur les facteurs humains.

Tableau 1.3 – *Méthodes d'évaluation de la sécurité*

Méthode	Principe	Objectif	Avantages/Inconvénients
APR	Explicite les scénarios d'accidents	Déterminer les risques et leur causes et la gravité de leurs conséquences	Rapide à mettre en œuvre. Très performante en phase de conception car ne nécessite pas un niveau de description très détaillée du système. Son utilisation seule peut être jugée suffisante uniquement pour des systèmes simples.
AMDEC	Création d'un répertoire classifié des défaillances possibles.	Tableau et grille.	Facile à mettre en place et permet la mise en commun de l'expérience mais est très lourde à mettre en œuvre. La gravité est aussi parfois difficile à évaluer.
Nœud Papillon	Identifie les causes et les conséquences d'un évènement redouté.	Connaître chaque chemin conduisant d'une défaillance d'origine (évènements indésirables ou courants) jusqu'à l'apparition de dommages.	Permet d'avoir une vue complète des causes et conséquences d'un évènement redouté. Met en valeur l'action des barrières. Très coûteuse en temps.
THERP [Swain 1983]	Utilisation de probabilités. Prédiction de l'erreur humaine.	Calculer la probabilité d'erreur humaine pendant l'exécution d'une tâche.	Donne une probabilité de succès ou d'échec, mais ne permet pas de connaître les causes, les conséquences de cet échec.

Continue sur la page suivante

Tableau 1.3 Méthodes d'évaluation de la sécurité – Suite

Méthode	Principe	Objectif	Avantages/Inconvénients
TESEO [Bello 1980]	Utilise des tables de coefficients. Valeurs fournies par des experts.	Calculer la probabilité d'erreur humaine.	Résultats hétérogènes en fonction des experts ou du système.
HCR [Fadier 1994, Stamatelatos 2002]	Utilise des coefficients.	Calculer la probabilité de non réponse à un stimulus et déterminer la fiabilité de l'opérateur pour une tâche donnée.	Résultats hétérogènes en fonction des experts ou du système.
ACIH [Vanderhaegen 2001]	Comparaison entre procédures et erreurs humaines.	Analyser les conséquences de l'infiabilité humaine.	Ne se focalise pas sur l'occurrence d'une erreur humaine ou sur une probabilité de succès.
HAZOP [Richard 2008a]	Se base sur la dérive de paramètres.	Identifier les dérives potentiellement dangereuses et proposer des solutions.	Outil efficace mais ne permet pas d'analyser la combinaison de plusieurs dérives de paramètres. Il est aussi parfois difficile d'associer un mot-clé à un paramètre.

L'ensemble des méthodes décrites dans cette section 3 permet de réduire l'occurrence d'évènements indésirables. Néanmoins, si l'aspect technique est relativement bien maîtrisé, la prise en compte de l'aspect humain est limitée aux probabilités d'occurrence d'erreurs humaines et aux conséquences liées au comportement de l'opérateur humain. De plus, elles ne donnent pas de précision sur les moyens de palier ces erreurs humaines.

Il en résulte des accidents, parfois aux conséquences graves, souvent liés aux défaillances de l'opérateur humain. Cette catégorie d'accidents est celle qui motive notre recherche. Elle fait l'objet de la dernière partie de ce chapitre.

1.4 L'accidentologie dans les transports guidés

Comme montré dans ce chapitre, la prise en compte de la sécurité dans les transports guidés, tant en conception qu'en exploitation, est très réglementée. Néanmoins, des incidents et accidents demeurent, montrant les limites de cette réglementation. Cette section dresse une analyse de ces incidents et accidents et révèle souvent la mise en cause de l'opérateur humain.

1.4.1 Les origines des incidents et accidents

Les incidents et accidents dans les systèmes complexes peuvent avoir plusieurs origines que Kumamoto [Kumamoto 1996] a identifiées et structurées dans un modèle générique

des causes d'accidents présenté dans la figure *1.9* :

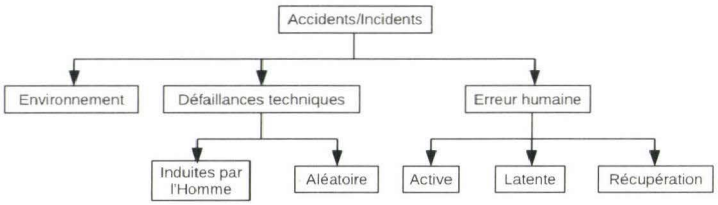


Figure 1.9 – *Causes directes d'accidents et d'incidents selon Kumamoto [Kumamoto 1996]*

Les incidents et accidents résultent de défaillances liées à :
- l'environnement : il regroupe les évènements extérieurs au système qui pourraient entraîner un risque en sécurité,
- les défaillances techniques : l'incident ou l'accident est engendré par une faille technique du système aléatoire ou induite par l'opérateur humain,
- l'erreur humaine : le comportement de l'opérateur humain est directement lié à la cause de l'accident ou de l'incident.

Les accidents sont liés au principe de causalité dont deux modèles permettent de tracer le cheminement (*figure 1.10*) :

1. le modèle séquentiel,
2. le modèle organisationnel ou épidémiologique.

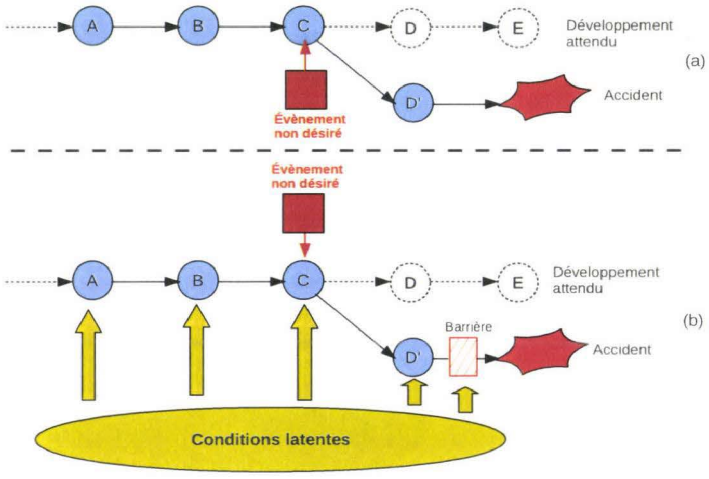


Figure 1.10 – *Modèles séquentiel (a) et épidémiologique (b) d'accidents d'après Hollnagel [Hollnagel 2004]*

Le modèle séquentiel décrit une succession d'évènements survenant dans un ordre déterminé et conduisant à l'accident. Cet accident correspond au dernier évènement de

la chaîne [Hardy 2010]. Leur prévention peut se faire en identifiant puis en éliminant leurs causes possibles. Le modèle épidémiologique décrit l'accident comme la dispersion d'une maladie. L'accident n'est pas la cause d'une simple erreur humaine mais est le résultat de défaillances entre les différentes couches d'une organisation [Hardy 2010]. Les accidents résultent d'une combinaison de défaillances actives et de conditions latentes. Ces accidents peuvent être prévenus par la mise en place de barrières de défense.

L'étude *a posteriori* des incidents et accidents issus de ces différentes sources est effectuée à l'aide de **REX** (Retour d'EXpérience).

1.4.2 Le retour d'expérience

Après chaque incident ou accident, une enquête est menée. L'ensemble des données recueillies permet de créer les **REX**. Ces **REX** regroupent différentes informations et sont utilisés dans de nombreux domaines. Le **REX** est *« la conjugaison de l'expérience passée et du bon sens de l'ingénieur. Il permet par extrapolation ou analogie d'améliorer une méthode, de trouver une solution, d'estimer des fréquences ou des comportements incertains »* [Lannoy 2008].

La procédure qui permet de dresser des **REX** dans le domaine ferroviaire est bien encadrée et fait partie intégrante de la sécurité. Pour l'exploitant, ici la **SNCF**, elle fait partie de la directive IN 2408 [Munier 2006]. Son objectif est de créer une réalité d'un évènement en recueillant tous les éléments possibles liés à cet évènement. Cette directive présente les différentes étapes de constitution d'un retour d'expérience :

1. la collecte : cette phase permet d'effectuer un recueil des évènements, de l'état de la signalisation...
2. l' analyse : elle permet de prendre en compte les éléments techniques et organisationnels de l'évènement étudié,
3. l'enregistrement, l'évènement est classé et archivé,
4. le traitement des informations.

Les **REX** sont divisés en deux grandes catégories en fonction de la « gravité » de l'évènement :

- le **REX** pour les incidents et les accidents. La collecte est effectuée par les agents de terrain. L'analyse est faite par une personne choisie en fonction de sa place hiérarchique et de sa sensibilité,
- le **REX** pour les « grands accidents ». La collecte et l'analyse sont effectuées par des personnes expertes. Il peut s'agir, par exemple, d'experts du **BEATT**.

Toujours dans le domaine ferroviaire, les **REX** ont mis en évidence des incidents lors de la conduite de trains. Certains de ces incidents peuvent avoir des conséquences graves sur la sécurité du système. Par exemple, les tableaux *1.4* et *1.5* présentent le nombre de **SPADs** (Signals passed at danger) relevé dans les différents pays d'Europe

[European Railway Agency 2010]. Il s'agit du franchissement par les conducteurs de signaux fermés. Ce type de franchissement peut engendrer des collisions...

Tableau 1.4 – *Nombre de SPADS en Europe (Partie 1)*

Année	AT	BE	BG	CT	CZ	DE	DK	EE	EL	ES	FI	FR	HU	IE
2006	15	55	5	-	60	-	756	-	1	93	18	35	3	35
2007	12	81	15	5	26	727	568	2	1	93	22	112	12	31
2008	16	97	12	3	26	760	510	2	1	111	30	124	8	22

Tableau 1.5 – *Nombre de SPADS en Europe (Partie 2)*

Année	IT	LT	LU	LV	NL	NO	PL	PT	RO	SE	SI	SK	UK	Total
2006	24	124	-	4	292	78	-	24	425	194	147	78	352	2823
2007	15	60	-	2	275	73	4013	20	425	217	154	79	324	7364
2008	20	3	-	5	240	70	2653	24	396	275	5	75	316	5804

Globalement, les facteurs humains restent responsables de nombreux accidents souvent dramatiques en terme de sécurité (environ 70% [Amalberti 2001]), par exemple :

- l'accident survenu à Zoufftgen en France [European Railway Agency 2010]. Deux trains sont entrés en collision au niveau de la frontière franco-luxembourgeoise le 11 octobre 2006. Cette collision est survenue suite à une erreur humaine. En effet, le régulateur a donné l'autorisation de passage à un train alors que celui-ci était soumis à un signal d'arrêt. Le bilan de cette catastrophe ferroviaire est lourd : 10 morts, 1 blessé grave et 15 blessés légers. Ce type d'accident laisse une empreinte négative dans l'opinion et coûte très cher à l'exploitant.
- l'accident survenu en Hongrie [European Railway Agency 2010] le 6 octobre 2008. Suite à une panne de signalisation, 2 trains sont entrés en collision. L'un des conducteurs n'a pas respecté la limitation de vitesse prescrite en cas de panne de signalisation. Malgré le déclenchement automatique du freinage d'urgence, la collision s'est avérée inévitable. Le bilan est de 4 morts et 4 personnes gravement blessées.
- l'accident survenu le 15 février 2010 en Belgique [European Railway Agency 2010], figure *1.11* où 2 trains de voyageurs sont entrés en collision frontale. Cette collision serait due au non-respect de la signalisation par l'un des conducteurs. Néanmoins, l'enquête est toujours en cours pour déterminer les causes exactes de cet accident.

Ces méthodes ont aussi abouti à la conception de systèmes automatisés de sécurité qui mettent en place des barrières ou des moyens de contrôle, notamment :

- le **KVB** (contrôle de Vitesse par Balise). Ce système est divisé en 2 grandes parties :
  - la partie bord. Ce système est paramétré par le conducteur qui renseigne les caractéristiques de son train (vitesse maximale, longueur du train, poids du train...),

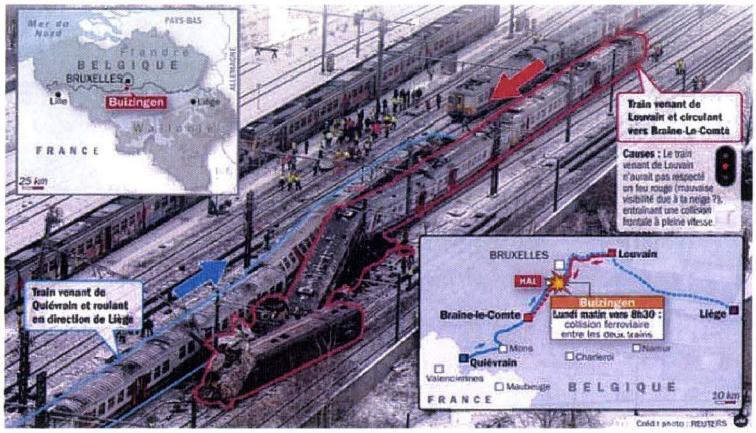


Figure 1.11 – *Collision du 15 février 2010 en Belgique (source REUTERS)*

- la partie sol. Il s'agit de balises qui transmettent des informations de vitesse au train lorsque celui-ci les franchit.

Son rôle est d'empêcher le conducteur de dépasser la vitesse limite sans y être autorisé. Si le conducteur dépasse la première courbe de vitesse autorisée, un signal sonore retentit afin de l'alerter et de lui permettre de réduire sa vitesse au plus vite. S'il dépasse la deuxième courbe de vitesse maximale, un arrêt d'urgence est alors enclenché.

– la **VACMA** (Veille Automatique par Contrôle du Maintien d'Appui), aussi appelé « homme-mort ». Ce système oblige l'opérateur humain à prouver qu'il est « vigilant ». Le conducteur doit maintenir successivement une pédale enfoncée puis la relâcher après un temps déterminé puis appuyer à nouveau dessus afin de prouver qu'il est bien présent et conscient en cabine de conduite. Néanmoins, des cas où les conducteurs effectuaient ce geste de manière automatique et inconsciente ont été rapportés.

Malgré la conception de systèmes automatisés pour s'assurer que l'opérateur humain est dans la capacité d'effectuer les tâches nécessaires à la conduite et à la supervision des transports guidés, la majorité des accidents lui restent imputables. Les accidents ne sont pas le fait de hasards mais sont dus à la présence commune d'éléments généraux. Ils peuvent être liés aux concepts de :

– déficits qui symbolisent des lacunes. Elles peuvent être d'origine culturelle, organisationnelle, managériale...
– dissonances qui représentent des tensions [Kervern 2005], un désaccord. Dans le cadre de l'être humain, la littérature fait apparaître le terme de dissonance cognitive qui marque un désaccord entre les connaissances, les opinions, les croyances sur l'environnement ou sur le propre comportement de l'individu [Festinger 1956].

Ces deux concepts impactent naturellement la sécurité par l'apparition de dangers.

1.5 Conclusion

Pourtant *« le besoin de sécurité a toujours été fortement ressenti par les Hommes »* [Lannoy 2008]. C'est ce besoin de sécurité qui a poussé l'Homme à maîtriser le risque dans les systèmes. Il a développé des méthodes et outils permettant de lister, gérer et contrôler l'occurrence d'évènements redoutés. Les méthodes d'analyse se sont généralisées à partir des années 1960. Néanmoins, ces méthodes connaissent des limites face à la complexité des systèmes actuels dont font partie les systèmes de transports guidés [Le Moigne 1999] et face à l'apparition régulière de nouvelles technologies qui nécessitent la mise en place de nouvelles méthodes. *« Les méthodes deviennent de plus en plus inadaptées compte tenu de la croissance de complexité des systèmes qui imagine l'analyse fonctionnelle d'un circuit intégré à* 10^9 *composants ? »* [Ligeron 2006]. Cette complexité rend extrêmement difficile la prise en compte de tous les scénarios possibles, de leurs causes et/ou de leurs séquences de causes. Ces méthodes ont permis de limiter le nombre d'occurrences d'évènements redoutés. Les analyses techniques ne suffisent plus. Les recherches doivent porter en priorité sur la nature des dangers afin de s'en prémunir par l'intégration des facteurs humains et des organisations, ces deux éléments étant indispensables aux systèmes. En effet, des incidents et accidents surviennent toujours. Ils sont liés, au sens large, à l'activité de conduite, de supervision, de maintenance et non pas aux seules tâches de l'opérateur humain. Selon [Amalberti 2001], 70% des incidents et accidents survenant dans les systèmes complexes, sont liés au comportement de l'opérateur humain. Néanmoins, la prise en compte du facteur humain reste marginale dans la définition et l'application des normes. Elle apparaît de façon ponctuelle et disparate, les systèmes étant de plus en plus complexes. Les procédures, les normes et les études *a priori* ne parviennent pas à les contrôler. Les systèmes d'aide à la décision restent parfois impuissants face à ces évènements. Il est donc nécessaire de prendre en compte la sécurité liée à l'opérateur humain en ligne. C'est dans ce cadre que l'étude de la stabilité humaine, concept clé de ce mémoire, est envisagée. Le chapitre suivant présente les concepts de la stabilité et leurs possibles applications à l'opérateur humain.

CHAPITRE 2

De la résilience à la stabilité : émergence de nouvelles problématiques

Table des matières

2.1 Introduction 27
2.2 Fondements de la sûreté de fonctionnement 28
2.3 Le concept de résilience 30
2.3.1 Étymologie 30
2.3.2 Principaux domaines d'application de la résilience 30
2.3.2.1 La résilience dans les sciences des matériaux 30
2.3.2.2 La résilience dans le domaine de l'écologie 31
2.3.2.3 La résilience en médecine 31
2.3.2.4 La résilience dans les sciences de l'ingénierie 32
2.3.2.5 La résilience dans les sciences de l'organisation 32
2.3.3 Synthèse des domaines d'application 32
2.4 Etat de l'art de la stabilité 34
2.4.1 Résilience et stabilité : deux concepts complémentaires ? 34
2.4.2 Définition de la stabilité 36
2.4.2.1 Étymologie 36
2.4.2.2 La stabilité dans les différents domaines d'application . . 36
2.4.3 Synthèse sur la stabilité 41
2.5 La stabilité au regard de la sécurité 42
2.6 Conclusion 45

2.1 Introduction

Le chapitre précédent a présenté les efforts en matière de sécurité dans les transports guidés. Dans un premier temps, ces efforts se concentrent sur le développement de méthodes et outils visant à améliorer la fiabilité technique et ainsi diminuer le risque d'occurrence d'accidents lié à une défaillance technique. Dans un second temps, ils se

focalisent sur les aspects humains. Des méthodes ont vu le jour pour quantifier les erreurs humaines. Elles sont basées sur les principes quantitatifs de la sûreté de fonctionnement. Toutefois, il demeure des accidents significatifs. Ce constat induit que les méthodes et outils de la sûreté de fonctionnement ont atteint leurs limites : *« Ceci implique de réviser les fondements de la sûreté de fonctionnement et de développer un nombre de recherches conséquent permettant de rendre cohérents les différents outils et méthodes, en pratiquant une sorte de diététique de la sûreté de fonctionnement »* [Ligeron 2006]. Certains auteurs suggèrent actuellement d'explorer de nouveaux concepts et d'utiliser de nouveaux outils sans se concentrer sur les outils existants de la sûreté de fonctionnement. *« Je ne crois pas qu'il est nécessaire de faire progresser les outils de la sûreté de fonctionnement, il faut aller voir ailleurs »* [Ligeron 2006].

Dans ce contexte, des groupes de recherche, de travail, au sein de l'**IMDR** (Institut pour la Maîtrise Des Risques) par exemple, s'attachent à développer de nouveaux concepts tels que la résilience des systèmes. L'objectif n'est pas de remplacer la sûreté de fonctionnement mais de la compléter. Après avoir rappelé les fondements de la sûreté de fonctionnement, ce chapitre présente un état de l'art sur la résilience des systèmes et positionne la notion de stabilité vis-à-vis de ce concept. La partie suivante aborde les différents domaines d'application de la stabilité des systèmes. Enfin, le chapitre discute de l'impact de la stabilité sur la sécurité globale.

2.2 Fondements de la sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement est « l'aptitude d'une entité à satisfaire à une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données » [Heurtel 2003, Schneider Electric 2004]. Elle est constituée de quatre paramètres interdépendants, [Villemeur 1988, Beugin 2006, Clarhaut 2009] *figure 2.1* :

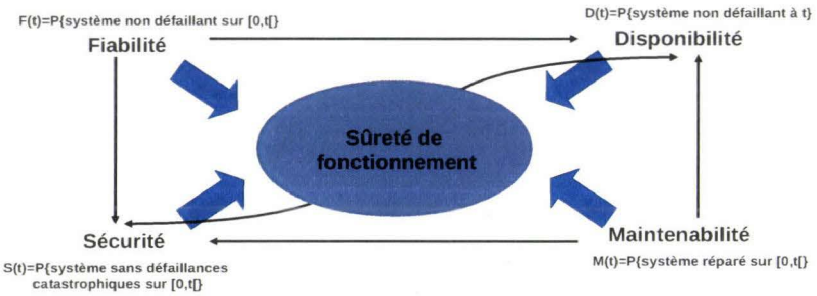


Figure 2.1 – Les paramètres de la sûreté de fonctionnement, [Benard 2004]

1. la fiabilité correspond à la continuité de service et représente la capacité d'une entité à accomplir une fonction requise dans des conditions données, sur un intervalle de temps donné,

$$F(t) = P(\textit{système non défaillant sur } [0,t]) \tag{2.1}$$

2. la disponibilité représente l'état de fonctionnement à un instant donné. Elle est définie par l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir sa ou ses fonctions, dans des conditions données à un instant donné,

$$D(t) = P(\textit{système non défaillant à l'instant } t) \tag{2.2}$$

3. la maintenabilité est la capacité du système à être maintenu. Il s'agit de l'aptitude d'une entité à être maintenue ou remise en état de fonctionnement après une défaillance,

$$M(t) = P(\textit{système réparé sur } [0, t[) \tag{2.3}$$

4. la sécurité illustre l'absence de conséquences critiques ou catastrophiques pour les acteurs, le système technique et l'environnement. C'est la capacité d'une entité à éviter l'occurrence d'évènements redoutés [Zwingelstein 2000, Heurtel 2003, Schneider Electric 2004].

$$S(t) = P(\textit{système sans défaillance catastrophique sur } [0, t[) \tag{2.4}$$

La perte de sécurité et/ou de disponibilité entraîne une perte de fiabilité. La maintenabilité permet de retrouver cette fiabilité suite à l'occurrence d'un évènement redouté.

La démarche de la sûreté de fonctionnement enchaîne quatre étapes, *figure 2.2* :

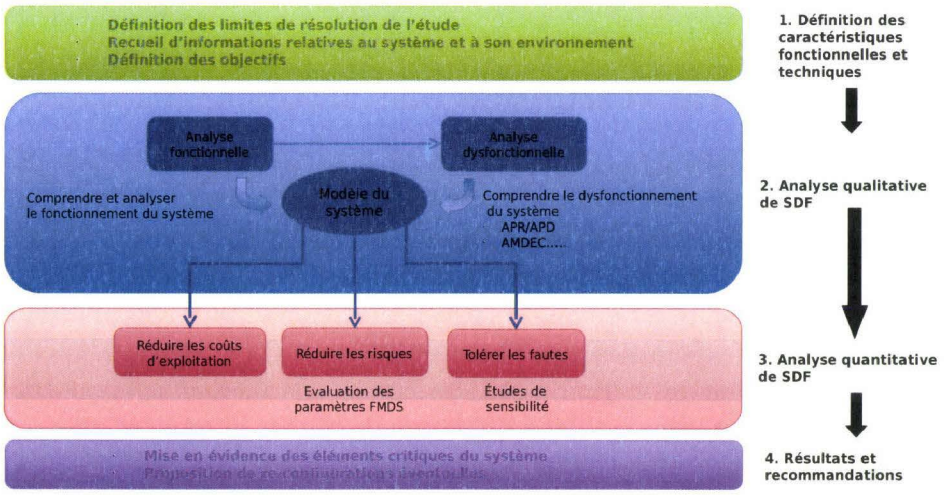


Figure 2.2 – Démarche de la sûreté de fonctionnement [Schneider Electric 2004]

1. une analyse structurelle et fonctionnelle du système. Elle recueille l'ensemble des éléments propres au système et à son environnement et définit les objectifs de celui-ci,

2. une analyse qualitative du système. Elle regroupe, d'une part, une analyse fonctionnelle du système dont l'objectif est de détailler le comportement du système tout au long de son cycle de vie et, d'autre part, une analyse dysfonctionnelle du système identifiant les défaillances pouvant affecter le système et les impacts de celles-ci sur ce dernier. L'analyse qualitative permet d'effectuer une modélisation du système avant sa réalisation. Elle débouche sur une représentation virtuelle du système tant en fonctionnement normal qu'en fonctionnement dégradé,
3. une analyse quantitative du système. Elle valide ou invalide une solution technique et permet d'optimiser les choix dans le but de :
   - réduire les risques,
   - réduire les coûts,
   - tolérer certaines fautes, sous conditions, tout en poursuivant la mission du système en fonctionnement dégradé,
4. la synthèse des analyses précédentes. Elle met en évidence les éléments critiques du système et fournit des propositions de re-configuration.

Toutefois, la complexité des systèmes actuels fait apparaître les limites de cette démarche. La bibliographie montre qu'il est difficile de prendre en compte l'ensemble des éléments du système, leurs interactions, leur hétérogénéité, leur nombre d'entrées/sorties respectives, l'environnement du système, la composante humaine... [Le Moigne 1999]. Dans ce contexte, de nouveaux courants, centrés sur la notion de résilience, émergent au travers de titres aussi évocateurs que *« De la sûreté de fonctionnement à la résilience des systèmes »* [Gajewski 2006]. La section suivante aborde cette notion de résilience.

2.3 Le concept de résilience

2.3.1 Étymologie

Selon l'étymologie du mot, la résilience traduit la notion de «re-sauter», de «rebondir» [Gajewski 2006]. Selon le dictionnaire, la résilience [Encyclopædia Britannica] correspond à la capacité de récupérer de ou de s'ajuster facilement face à la malchance ou au changement. Il n'y a pas de définition de référence. Elle se décline dans quelques domaines d'application présentés dans la section suivante. Une étude bibliographique montre que cette notion a été reprise et adaptée dans différents domaines d'application.

2.3.2 Principaux domaines d'application de la résilience

2.3.2.1 La résilience dans les sciences des matériaux

La résilience trouve son origine dans les sciences des matériaux. Dans ce domaine, elle désigne la capacité d'un matériau à retrouver son état initial suite à un choc ou à une contrainte particulière. Un matériau possède ainsi une grande résilience s'il résiste

aux chocs. La résilience (K en Joule/cm^2) se caractérise par une relation entre l'énergie absorbée (W en Joule) et la section de la cassure (S en cm^2), *équation 2.5* et *figure 2.3* [Poupon 2006].

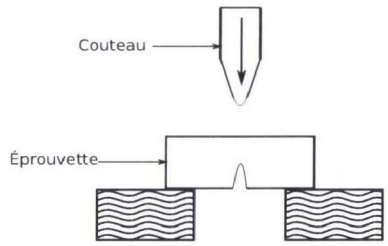


Figure 2.3 – Test de résilience d'un matériau

$$K = \frac{W}{S} \tag{2.5}$$

2.3.2.2 La résilience dans le domaine de l'écologie

La résilience en écologie distingue deux définitions. La première met l'accent sur le temps nécessaire au système écologique pour retourner dans le voisinage de son point d'équilibre suite à l'occurrence d'une perturbation majeure. A titre d'exemple, elle représente le temps nécessaire à une forêt pour se reconstituer suite à un incendie [Pimm 1984, Martin 2005]. La seconde définition se focalise sur les conditions qui permettent, par le biais d'instabilité, le passage à des points d'équilibre éloignés du point d'équilibre d'origine. La résilience est alors mesurée par l'amplitude du changement maximum que peut accepter le système écologique [Holling 1973, Martin 2005]. La population de thons rouges illustre bien ce cas. En effet, les quotas actuels visent à ne pas franchir le seuil démographique (limite de l'amplitude du changement) en-dessous duquel la population de thons rouges ne pourra pas se reconstituer.

2.3.2.3 La résilience en médecine

La résilience est appliquée à de nombreux domaines médicaux tels que la psychiatrie. Dans ce domaine, elle désigne la capacité de certains individus à :

- s'adapter à l'adversité ou
- continuer à fonctionner de façon compétente suite à un traumatisme [Goussé 2005, Fossion 2007].

Cette notion de résilience se retrouve dans le domaine de l'immunologie et des constantes physiologiques et plus spécifiquement dans le cadre de l'homéostasie. L'homéostasie concerne la faculté d'un organisme à se maintenir, à conserver son équilibre de fonctionnement en dépit des contraintes extérieures. L'exemple le plus parlant concerne la température corporelle. Quelles que soient les conditions externes, l'organisme maintient sa température de fonctionnement normal. De façon plus générale, la notion d'homéostasie s'applique à l'ensemble d'une population. Le terme démorésilience est alors employé.

La démorésilience caractérise un groupe d'individus dont la majorité est porteuse d'une protection corporelle et où une minorité est non immunisée. Plus une population possède d'individus résilients, c'est-à-dire possédant les protections corporelles, plus la démorésilience est élevée.

2.3.2.4 La résilience dans les sciences de l'ingénierie

Elle spécifie la capacité d'un système ou d'une architecture réseau à continuer de fonctionner en dépit des anomalies liées à l'intégrité du système [Chen 2007].

Elle représente la tolérance aux pannes et aux fautes. Elle est caractérisée par la capacité, pour un système, à récupérer d'erreurs qui peuvent être dues à des conditions internes au système ou à l'opérateur humain [Zieba 2007]. Un système autonome est résilient s'il parvient à s'adapter face à des évènements non planifiés.

2.3.2.5 La résilience dans les sciences de l'organisation

Dans les sciences de l'organisation, elle définit la capacité à anticiper et gérer un risque afin d'assurer un système organisationnel performant.

Selon Holnagell et Woods [Hollnagel 2006], la résilience organisationnelle représente « la capacité intrinsèque d'une organisation à conserver ou à retrouver un « état stable » qui lui permette de poursuivre son fonctionnement après une perturbation majeure ou en présence d'une pression continue ».

2.3.3 Synthèse des domaines d'application

De façon générale, la résilience définit la capacité d'un système à absorber une perturbation. La résilience est abordée dans de nombreux domaines. Toutefois il n'existe pas de formalisation de référence à la différence des paramètres de la sûreté de fonctionnement. La figure 2.4 propose une synthèse de la notion de résilience.

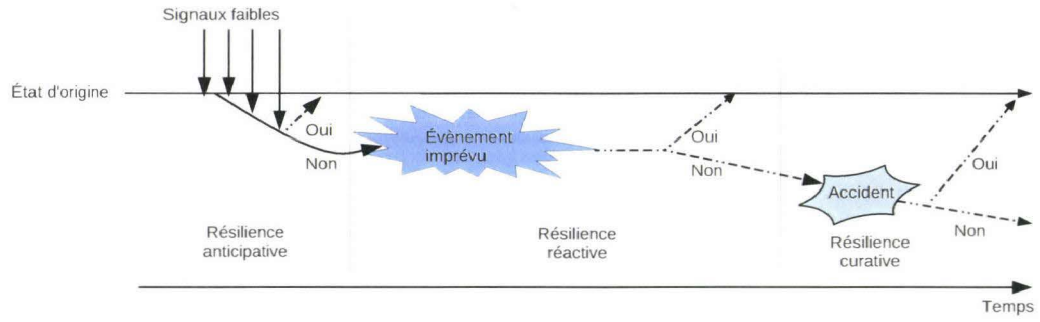


Figure 2.4 – Interprétation temporelle de la notion de résilience

Une perturbation est un évènement qui entraîne un dérèglement dans un fonctionnement, un organisme ou un système. Dans le cadre de l'étude des systèmes, cette perturbation peut avoir plusieurs origines :

- l'environnement,
- le système,
- l'Homme.

Ces perturbations peuvent engendrer des conséquences sur l'environnement, le système et/ou l'opérateur humain. La résilience gère l'occurrence de cet évènement imprévu, par le biais d'actions, de façon :

- anticipative. Elle traite les prémices d'une situation alarmante, via l'identification de signaux faibles annonciateurs, qui peut devenir accidentelle,
- réactive. L'évènement imprévu a eu lieu et le système ou l'Homme réagit afin de pallier cette occurrence,
- curative. L'incident ou l'accident ne parvient pas à être évité, mais le système ou l'Homme réussit à en limiter les conséquences.

Le système peut absorber la perturbation de deux manières différentes (*figure 2.5*) :

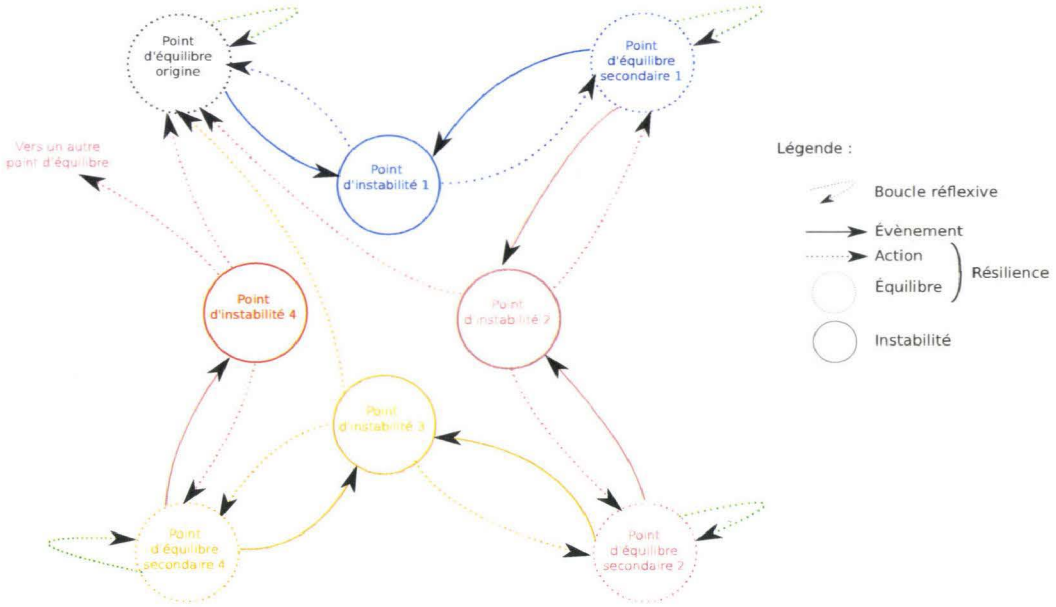


Figure 2.5 – Graphes d'états représentant l'absorption des perturbations

- le système est à son point d'équilibre original et, suite à l'occurrence de la perturbation il parvient à revenir à ce point. Il s'agit d'une boucle réflexive,
- le système est à son point d'équilibre original mais suite à l'occurrence d'une perturbation il se dirige vers un autre point d'équilibre en passant par une instabilité.

Sur la figure *2.5* chaque couleur représente le passage d'un point d'équilibre à un autre. Les éléments en pointillés représentent l'action (anticipative, réactive ou curative) et le retour à un point d'équilibre (cercles). Les éléments en continus représentent l'occurrence

d'un évènement indésirable (flèches) et les conséquences de cet évènement (cercles). Le nombre de points d'équilibre est limité. En effet, lorsque le système s'éloigne trop de son point d'équilibre d'origine, le système finit par ne plus parvenir à absorber les évènements indésirables et devient non-résilient. Hollnagel et Woods dans [Hollnagel 2006], émettent l'hypothèse selon laquelle le concept de résilience est lié à la capacité de conserver ou de retrouver un point d'équilibre ou état stable. Néanmoins, ils ne définissent pas de manière précise le concept de stabilité, ni la façon de revenir à cet état ainsi que l'état précédant le retour à « l'état stable ». La section suivante positionne chacun de ces deux concepts et présente la notion de stabilité.

2.4 Etat de l'art de la stabilité

2.4.1 Résilience et stabilité : deux concepts complémentaires ?

Ce paragraphe positionne les concepts de la résilience et de la stabilité. Lundberg et Johanson dans [Lundberg 2006] comparent la résilience et la stabilité en fonction de la nature et de la fréquence des évènements rencontrés. Ils distinguent [Lundberg 2007] trois types d'évènements :

- les évènements réguliers : il s'agit des évènements bien connus et pris en compte dans l'analyse dysfonctionnelle du système (cf. *figure 2.2*), par exemple une panne sur une machine,
- les évènements irréguliers : ce sont les évènements connus et évoqués lors l'analyse dysfonctionnelle mais qui n'ont pas été pris en compte dans la conception du système au regard de leur probabilité d'occurrence, par exemple un tremblement de terre, un tsunami (centrale nucléaire de Fukushima prévue pour résister à une vague de 7m mais pas une de 10m),
- les évènements sans précédent : ils sont très rares et ne sont pas pris en compte dans les analyses dysfonctionnelles et, par conséquent, dans la conception du système, par exemple, l'attentat contre les tours du World Trade Center. Cette non prise en compte est généralement liée à un problème de coût, de technologies, du contexte de conception. Dans les systèmes techniques, la décision de prendre en compte ou non ces évènements découle de la mise en pratique du **REX** ou du principe **GAME**, **ALARP**.

Le paragraphe 2.3.3 présente la résilience comme la capacité d'un système à absorber une perturbation. Le concept de stabilité, se définit par la qualité de ce qui est stable ou en équilibre. Son antonyme est l'instabilité. La stabilité peut être liée à l'espace avec une idée d'immobilité ou au temps avec une idée d'absence de variation. Cette définition générale a ensuite été déclinée et adaptée dans de nombreux champs d'application. Selon [Lundberg 2006], la stabilité est la capacité d'un système à répondre à une perturbation régulière alors que la résilience se focalise sur les évènements sans précédent. Pour les évènements d'un tout autre type, il existe une balance entre stabilité et résilience, comme

le montre la figure *2.6*.

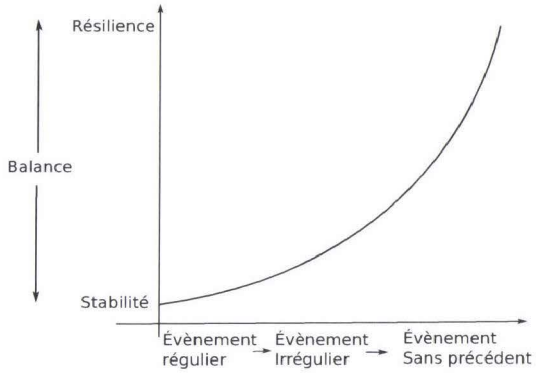


Figure 2.6 – *Relation entre résilience et stabilité en fonction du type d'évènements*

La résilience doit permettre la gestion du système après la perturbation (ré-organisation, gestion de crise...) afin de gérer et contrôler au mieux l'occurrence de la perturbation. Suite à cette ré-organisation, il est utile de revoir les paramètres et caractéristiques afin que l'évènement désormais connu soit pris en compte dans le **REX** et ne nuise plus, par la suite, au fonctionnement du système, afin de revenir vers le concept de stabilité (*figure 2.7*). Le processus de maintien de la sécurité met à la fois l'accent sur la stabilité et sur la résilience [Lundberg 2006].

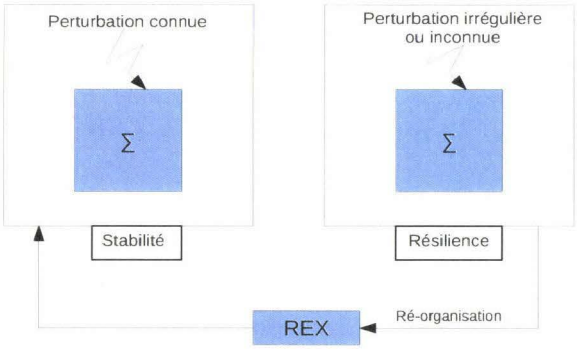


Figure 2.7 – *La relation entre résilience et stabilité*

La bibliographie telle que présentée par Li [Li 2010], montre la résilience comme une mesure courante de la stabilité dans le cadre d'occurrences de perturbations. Quant à Holling [Holling 1973], cité par [Amemiya 2005], il la présente comme une introduction permettant de décrire des propriétés alternatives d'états stables.

La résilience apparaît ainsi comme un concept proche de la stabilité qui se focalise sur l'occurrence de perturbations irrégulières ou sans précédents. La stabilité permet, quant à elle, pour les systèmes techniques, de s'assurer que le système reste dans un état maîtrisé. Selon le cas, le système peut prendre trois états différents :

- état stable,
- état instable,
- état en limite de stabilité.

La partie suivante présente la stabilité au travers de ces différents domaines d'application. Ces concepts s'adressent aux systèmes, sans prendre en compte la composante humaine.

2.4.2 Définition de la stabilité

2.4.2.1 Étymologie

Globalement, la stabilité est définie par la qualité de ce qui est stable ou en équilibre. Son antonyme est l'instabilité. La stabilité peut être liée à l'espace avec une idée d'immobilité ou au temps avec une idée d'absence de variation. Cette définition générale a ensuite été déclinée et adaptée dans de nombreux champs d'application.

2.4.2.2 La stabilité dans les différents domaines d'application

La stabilité est associée à la notion d'états. Un état décrit une disposition d'une chose ou d'un être. L'état d'un système est représenté par un ensemble de valeurs de ses variables d'entrées ou de sorties à un moment donné du temps. En effet, ces valeurs peuvent évoluer au cours du temps. Selon le domaine d'application cette recherche d'état d'équilibre peut se faire soit dans l'espace soit dans le temps et implique l'existence d'un point d'équilibre.

Le point d'équilibre représente « un endroit, une position, un aspect » où le « système » doit se trouver. Dans ce cas, la recherche d'un point d'équilibre est fondamentale.

2.4.2.2.1 La navigation

Dans la navigation, la stabilité recherche un point d'équilibre du navire afin d'éviter que celui-ci ne chavire et coule [Lavoille] et [Mohamad 2009]. Le navire est dit stable si, une fois éloigné d'une faible inclinaison de sa position d'équilibre, il y revient de lui-même grâce à un système de forces tendant à annuler cette inclinaison. La mise en équation de la stabilité simule la faculté à revenir à l'état d'équilibre. Il représente la mise en équation du moment de redressement du navire (*équations 2.6*) [Lavoille] illustré sur la figure *2.8*.

$$M = P * (r - a) * sin(\theta) \tag{2.6}$$

avec M correspond au moment de redressement, P au poids du navire, r au rayon métacentrique initial, a à la distance entre le centre de gravité (G) et le point de carène (C_0), θ à l'angle d'inclinaiso et $P * (r - a)$ est appelé au module de stabilité initiale transversale. La stabilité d'un navire est lié à 2 composantes :

- la forme de la carène

- et la répartition du poids du navire.

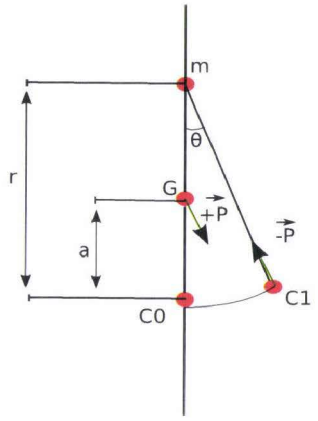


Figure 2.8 – Représentation de la stabilité d'un navire [Lavoille]

2.4.2.2.2 La stabilité physique

Elle représente la « capacité de l'être humain à ne pas tomber » [Albinet 2006]. L'individu doit maintenir son centre de gravité.

2.4.2.2.3 En architecture

Elle représente aussi un point d'équilibre qui évite à la structure construite de s'écrouler. L'étude de stabilité d'un édifice s'effectue selon deux approches : la stabilité tranversale et la stabilité longitudinale.

Ce concept a été décliné dans de nombreux domaines avec quelques variations. Certains domaines se basent sur la théorie de l'équilibre.

2.4.2.2.4 Le domaine de l'économie

Le concept de stabilité en économie présente un formalisme mathématique qui n'est en aucun cas prédictif. Elle reprend les chiffres de l'économie et permet de tracer les courbes d'évolution de celle-ci. Ce sont ces courbes qui sont importantes car elles permettront de formaliser mathématiquement cette théorie. Il s'agit de modèles explicatifs. Ils expliquent pourquoi l'économie a été stable l'année dernière par exemple.

Dans cet exemple (cf *figure 2.9*), le point d'équilibre se trouve en T_e et S_e. C'est d'ailleurs le point optimal de stabilité. Il existe d'autres points d'équilibre qui ne sont pas optimaux.

2.4.2.2.5 Le domaine de l'écologie

Une population est considérée comme stable si elle parvient, après une perturbation à revenir dans un état proche de celui de départ. Généralement, elle se focalise sur la population d'une espèce dans un écosystème. Trois critères sont utilisés afin d'identifier l'état de stabilité de la population étudiée (*figure 2.10*) [Pérez-Espana 1999] :

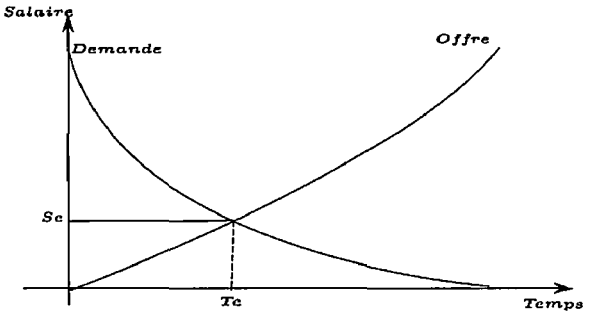


Figure 2.9 – Position d'équilibre en économie

- la persistance est la capacité d'un système à continuer sans changement après une perturbation. Elle est évaluée par le temps séparant le début de la simulation et le temps où la biomasse de l'espèce varie de plus de 10%.
- la résistance est la quantité de changement due à la perturbation. Elle est inversement proportionnelle à l'amplitude du changement c'est-à-dire la différence entre le maximum de biomasse (B_{max}) et le minimum de biomasse (B_{min}), *équation 2.7.*

$$Résistance = B_{max} - B_{min} \tag{2.7}$$

où B représente la quantité de biomasse, par exemple le nombre d'individus d'une population.
- la résilience est le temps nécessaire pour que le système retrouve son état initial ou acceptable après une perturbation. Elle est traduite par la tangente inverse de l'ampleur des changements au fil du temps, *équation 2.8.*

$$Résilience = tan^{-1}(\frac{A_{changement}}{T_{récupération}}) \tag{2.8}$$

avec $A_{changement}$ l'amplitude du changement et $T_{récupération}$ le temps de récupération.

La figure *2.10* reprend de manière graphique, l'ensemble de ces définitions.

2.4.2.2.6 Le domaine de la production électrique

Elle est définie comme la capacité du système à revenir à un point d'équilibre après avoir été sujet à une perturbation physique. Cette notion de stabilité se retrouve, notamment, au niveau des réacteurs nucléaires, dont la réaction de fusion doit rester stable. Elle est définie par une série d'équations qui permettent de s'assurer que la réaction ne s'emballe pas. La réaction de fusion doit rester proche d'une ligne de stabilité. Si elle s'en écarte, les noyaux des éléments composant le cœur du réacteur deviennent trop riches ou trop pauvres en neutrons (*figure 2.11*).

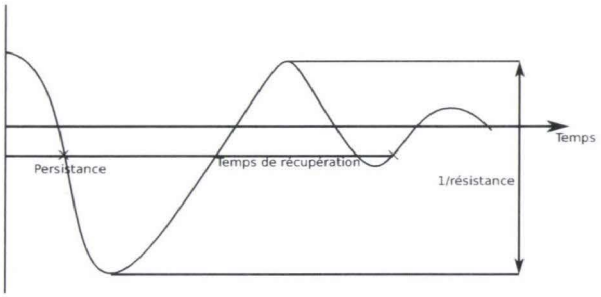


Figure 2.10 – Représentation des attributs de la stabilité écologique selon [Pérez-Espana 1999]

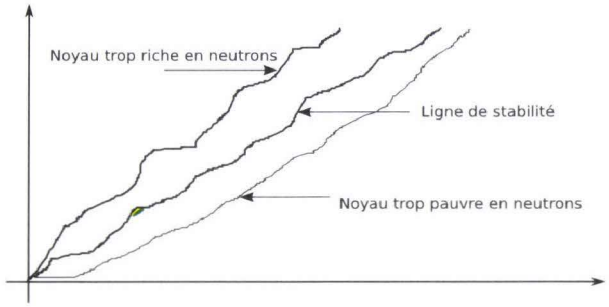


Figure 2.11 – Ligne de stabilité de la réaction nucléaire

2.4.2.2.7 La science des matériaux

La stabilité d'un matériau représente sa capacité à revenir à son état d'équilibre après avoir été perturbé, par exemple un choc.

Cette approche de la stabilité se focalise sur l'occurrence de perturbations. Elle n'étudie pas la stabilité tout au long du cycle de vie du système.

2.4.2.2.8 Le domaine de l'automatique

C'est un domaine où la stabilité est une caractéristique importante et fait l'objet de nombreuses études. Un système automatisé est stable si celui-ci parvient à se maintenir autour d'un point de fonctionnement normal. Ce point de fonctionnement représente un point d'équilibre autour duquel le système parvient à accomplir sa fonction. Ce point d'équilibre a été étendu à un « intervalle » d'équilibre. De nombreuses méthodes et formulations mathématiques ont vu le jour afin d'étudier cette stabilité. Elles sont divisées en deux « familles » : les méthodes graphiques et les méthodes algébriques.

Les méthodes graphiques en utilisant les critères de Bode, le critère de Nyquist [Granjon 2003]. Ces méthodes nécessitent de définir l'équation de transfert du système

La figure *2.12* propose les diagrammes de Bode et de Nyquist de l'équation de transfert *2.9*, à titre d'exemple.

$$F(p) = \frac{2p^2 + 5p + 1}{p^2 + 2p + 1} \tag{2.9}$$

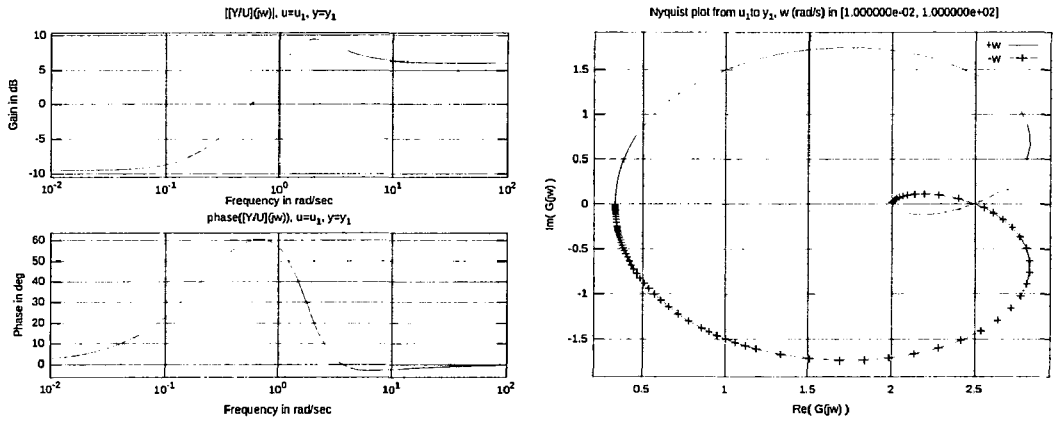


Figure 2.12 – Diagrammes de Bode et de Nyquist

Les méthodes algébriques parmi lesquelles le critère de Routh, BIBO (Bounded Input Bounded Output) qui implique qu'un système est stable si, lorsque les entrées sont bornées, les sorties sont elles aussi bornées.

Il existe aussi des systèmes dit non-linéaires. Dans ce contexte, d'autres formalismes sont utilisés pour étudier la stabilité du système, telles les méthodes de Lyapunov (méthode directe, méthode indirecte).

La méthode indirecte de Lyapunov utilise la linéarisation du système. Considérons les systèmes autonomes décrits par l'équation *2.10* :

$$\dot{x} = f(x), x \in \mathbb{R}^n \tag{2.10}$$

Une notion primordiale dans la stabilité est la notion d'équilibre. x_e est appelé état d'équilibre ou point d'équilibre. La méthode indirecte de Lypunov consiste alors à linéariser autour de x_e l'équation *2.10* en utilisant un développement en série :

$$\dot{x} = \frac{\partial f}{\partial x}|_{x=x_e}\ x + R(x) \tag{2.11}$$

$R(x)$ contient les termes en x d'ordre supérieur à 2.

Le théorème principal dit :

- si le système linéarisé est asymptotiquement stable alors le point d'équilibre du système (x_e) est asymptotiquement stable.
- si le système linéarisé est instable alors le point d'équilibre du système (x_e) est instable.
- si le système linéarisé est en limite de stabilité alors aucune conclusion sur la stabilité du système non-linéaire ne peut être effectuée.

La deuxième méthode de Lyapunov (méthode directe) permet de s'abstenir de la connaissance des trajectoires [Murray 1993]. Elle étudie les variations d'une fonction scalaire pour conclure sur la stabilité du système.

Les modèles flous **T-S** (Takagi-Sugeno) [Guelton 2003, Tirmant 2004, Akhenak 2009] permettent aussi d'étudier la stabilité des systèmes non-linéaires. Ces modèles consistent à représenter un modèle non-linéaire par un ensemble de sous modèles linéaires par une représentation d'état et/ou d'entrées/sorties. Dans le cadre continu, les modèles flous **T-S** sont représentés sous la forme :

i : Si $z_i(t)$ est F_1^i Et ... Et $Z_p(t)$ est F_p^i

$$Alors \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases}, i = 1, 2, ..., r \tag{2.12}$$

où : r est le nombre de règles du modèle **T-S**, $z_1(t), ..., z_p(t)$ sont les variables de prémisses, F_j^i le sous-ensemble flou des prémisses associées la j^{eme} variable de prémisse et $A_i \in \mathbb{R}^{n*m}$, $B_i \in \mathbb{R}^{n*m}$, $C_i \in \mathbb{R}^{n*m}$ les matrices à coefficients constants relatives à chaque sous modèles.

En utilisant ces modèles flous, il est alors possible d'étudier la stabilité en boucle fermée du système global non linéaire notamment par l'utilisation d'une fonction de Lyapunov quadratique de type :

$$V(x) = x^T P x, P > 0 \tag{2.13}$$

L'objectif est d'assurer que $\dot{V}(t) < 0$. Les théorèmes de Tanaka et Sano [Tanaka 1994] et de Liu et Zhang [Liu 2003] permettent de déterminer si le modèle flou est asymptotiquement stable.

2.4.3 Synthèse sur la stabilité

La notion de stabilité est donc soit un état autour d'un point d'équilibre, soit un retour à un point d'équilibre après l'occurrence d'une dérive liée à un évènement perturbateur. Cette notion de stabilité, implique, dans tous les cas, trois notions indispensables, la stabilité, l'instabilité et la limite de stabilité (*figure 2.13*).

La stabilité vise donc à maintenir un système technique, financier... ou un être dans un état désiré afin de limiter les risques de passage dans un état non désiré, l'état instable.

La stabilité d'un système technique est source de fonctionnement normal (*figure 2.14*). En l'absence de perturbation, le système ne doit pas quitter le point d'équilibre pour lequel il a été conçu. En cas d'occurrence d'évènements indésirables ou perturbations, des fonctions permettent de ramener le système autour de son point d'équilibre. Durant ce laps de temps nécessaire à ce retour, le système, en fonctionnement anormal puisque soumis à une perturbation, passe en état instable (par rapport à l'état stable, c'est-à-dire état de fonctionnement normal). Cet état instable ne présente pas de risque si le système parvient rapidement à absorber la perturbation et à revenir autour de son point d'équilibre.

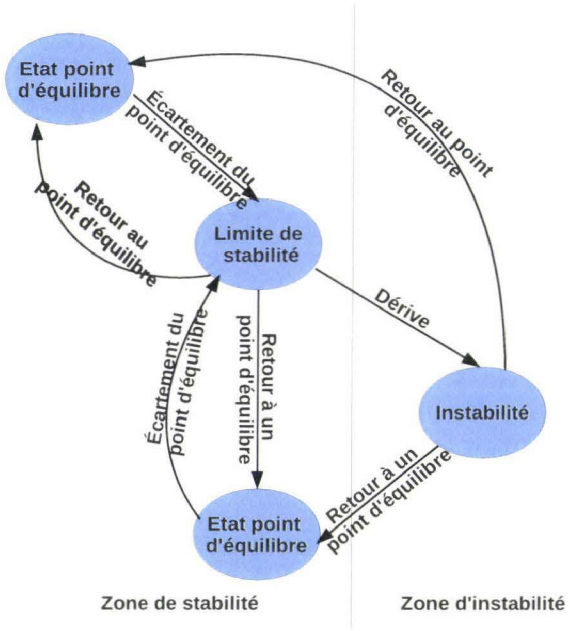


Figure 2.13 – Schéma général de la stabilité

Mode de fonctionnement normal	Mode de fonctionnement anormal
Système stable	Système stable Système instable

Figure 2.14 – Positionnement de la notion de stabilité d'un système

2.5 La stabilité au regard de la sécurité

Comme montré dans la section précédente, la stabilité vise à garder un système dans un état connu, souhaité, autour d'un point d'équilibre ou à le ramener à un point d'équilibre. L'objectif de cette partie est de monter l'impact de la stabilité, ou de son opposé l'instabilité, sur la sécurité du système. La démonstration s'effectuera en se basant sur des exemples.

La première perte de stabilité étudiée est celle de la posture chez l'Homme. Si un individu vient à perdre cette stabilité, il court à la chute, chute qui peut engendrer des blessures voire la mort. Ceci apparaît comme étant un évènement redouté pour l'individu. Dans le domaine naval, le risque qu'un navire perde son point d'équilibre est le naufrage avec les conséquences que cela engendre, pertes financières pour l'exploitant du navire et risque de noyade pour les passagers. Cette situation est jugée comme étant inacceptable. La stabilité des constructions, le risque de la perte de stabilité d'une construction est, soit le risque de rendre l'édifice inutilisable à cause du risque d'effondrement potentiel de

l'édifice, soit justement son effondrement. S'il s'agit d'un point emprunté par des véhicules par exemple ou d'un immeuble positionné en plein centre ville, le risque est important pour les usagers ou les passants.

Le risque peut être plus important, par exemple dans la production électrique nucléaire. Si, pour une raison ou une autre, la réaction du réacteur nucléaire ne parvient pas à rester stable, la fuite de produits radioactifs ou l'explosion même du réacteur engendre un évènement catastrophique (Tchernobyl en 1986). En automatique, si les chaînes de production perdent leur stabilité, par exemple, un moteur qui s'emballe. Ceci présente un risque pour le système.

Lister tous les exemples pour chaque domaine serait long et fastidieux. Néanmoins, ces différents exemples montrent bien que l' instabilité d'un système peut engendrer des risques en sécurité. La sécurité étant l'aptitude de l'entité ou du système à éviter l'occurrence d'évènements redoutés, critiques ou catastrophiques.

De façon plus générique, le concept de stabilité impacte les axes de la science des dangers.

Les cindyniques (ou science des dangers) dégagent progressivement les concepts qui justifient les pratiques gestionnaires de risques dans les organisations industrielles, commerciales et publiques.

Les cindyniques propose un modèle appelé l'hyperespace du danger comme produit de cinq espaces : épistémique , statistique, téléologique , déontologique et axiologique (*figure 2.15*) [Kervern 2006] :

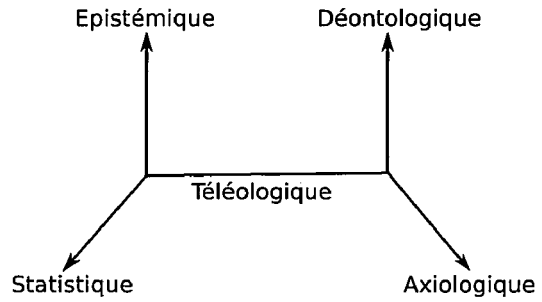


Figure 2.15 – *Représentation des espaces de la cyndinique*

- l'espace statistique (espace mnésique) correspond à la dimension des faits de mémoire et des statistiques. C'est la mémoire brute du réseau (ensemble des banques de données, retours d'expérience, statistiques, *etc.*).
- l'espace épistémique correspond à la dimension des modèles élaborés à partir de faits. C'est le point de départ pour le réseau pour l'établissement de modélisations à partir des banques de connaissances (connaissance, représentation, *etc.*).
- l'espace téléologique correspond à la dimension des objectifs. Ce sont les buts explicités de chacun des réseaux impliqués dans une situation considérée (finalités, objectifs).
- l'espace déontologique correspond à la dimension des normes, des lois, des règles, des codes et des standards. Ce sont les règles du jeu que les réseaux s'imposent ou

acceptent. (règles, lois, normes, *etc.*).
- l'espace axiologique correspond à la dimension des systèmes de valeur. Ce sont ces systèmes de valeur qui président et déterminent les composantes comportementales des individus face au risque (système de valeur).

Ces différents espaces sont représentés par des axes qui englobent un ensemble de variables. Si une ou plusieurs de ces variables deviennent instables, un ou plusieurs axes du modèle cyndinique vont alors glisser vers un nouvel état. Ces divergences correspondent au concept de dissonance des cindyniques. La cindynique définit ces dissonances dans les cinq dimensions par (*figure 2.16*) :

- la dissonance statistique, une différence d'information ou de mémorisation ,
- la dissonance épistémique, une différence de modélisation,
- la dissonance téléologique, un conflit d'objectifs
- la dissonance déontologique, une différence sur les normes et les règles applicables,
- la dissonance axiologique, un conflit de valeurs.

Ce nouvel état présente un risque d'apparition de dangers, d'occurrence d'évènements indésirables. C'est dans ce cadre que la notion de stabilité impacte la sécurité des systèmes.

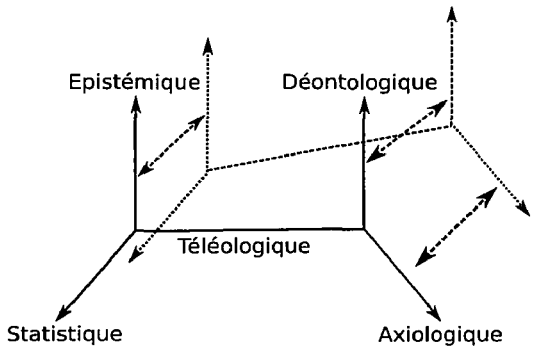


Figure 2.16 – *Représentation d'un glissement des espaces de la cyndinique*

Cette translation suivant les axes de la cindynique peut s'appliquer à la stabilité. En effet, les axes de la cindynique représentent les différentes valeurs des paramètres d'un système. Ces paramètres sont aussi utilisés pour caractériser la stabilité d'un système. Dans le cadre de cette stabilité, un écart des paramètres liés à la stabilité va engendrer un écart sur les axes cindyniques et faire apparaître un risque potentiel en sécurité. Cet écart peut entraîner une translation des états de stabilité, d'instabilité, par exemple sur la figure d'un état de stabilité autour d'un point d'équilibre 1 à un point d'équilibre 1' (cf. *figure 2.17*).

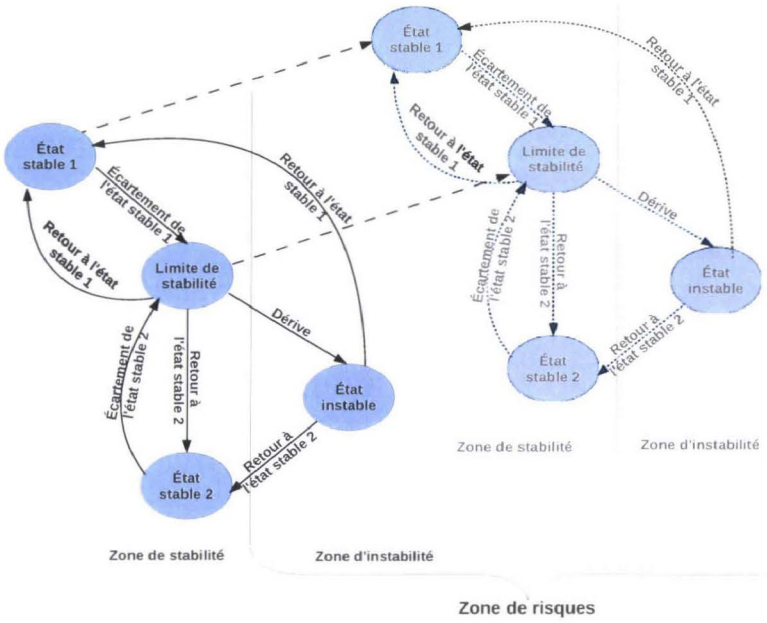


Figure 2.17 – Translation des états de stabilité

2.6 Conclusion

Les approches actuelles de la gestion de la sécurité dans les transports guidés commencent à atteindre leur limite. Sur la composante humaine, les études actuelles se basent sur les principes de la sûreté de fonctionnement, appliqués et adaptés à l'opérateur humain. Pourtant, la notion de stabilité, utilisée pour maintenir les systèmes techniques dans un état souhaité, permet d'éviter l'occurrence d'évènements indésirables. Appliquer cette notion de stabilité à l'opérateur humain semble nécessaire. Pour cela, il est important de définir la stabilité humaine et d'identifier les liens avec la sécurité. Ce chapitre à présenté les différents concepts de la stabilité et a démontré dans quel cadre celle-ci pourrait être appliquée à l'opérateur humain. Dans la suite du mémoire, cette stabilité sera appelée stabilité humaine.

Les enjeux de la stabilité humaine sont d'améliorer la sécurité du système dans son ensemble, l'objectif étant de contrôler la stabilité humaine et ainsi de pouvoir prévenir le conducteur par des systèmes techniques qu'il est dans un état à risques.

Le chapitre 3 propose de définir la « stabilité humaine » et de la formaliser, ainsi que de définir la méthode d'identification des risques liés à cette stabilité.

CHAPITRE 3

Formalisation et identification de la stabilité humaine

Table des matières

3.1 Introduction 47
3.2 Cadre des travaux 48
3.3 Caractérisation et formalisation de la stabilité humaine 48
3.3.1 Caractérisation de la stabilité humaine 48
3.3.2 Formalisation de la stabilité humaine 50
3.4 Identification de la stabilité humaine 51
3.4.1 Algorithmes d'identification de la stabilité humaine 51
3.4.1.1 Portée des algorithmes d'identification 51
3.4.1.2 Algorithme temporel (AT) 52
3.4.1.3 Algorithme fréquentiel (AF) 53
3.4.1.4 Algorithme séquentiel (AS) 54
3.4.2 Critères de la stabilité humaine 55
3.4.2.1 La facette « état » 57
3.4.2.2 La facette « comportement » 59
3.4.2.3 La facette « performance » 59
3.4.3 Exemple d'application de l'algorithme AT 60
3.5 Impact de la stabilité humaine sur la sécurité 61
3.6 Conclusion 65

3.1 Introduction

Dans le chapitre 2, l'étude s'est focalisée sur la stabilité et la résilience des systèmes techniques. Cette vision exclusivement technique est insuffisante dans la mesure où la composante humaine prend une place déterminante dans les systèmes homme-machine. L'objectif de ce chapitre est de formaliser et d'identifier la stabilité humaine. Après avoir rappelé le cadre de l'étude, la stabilité humaine est caractérisée en rapport avec les critères liés à l'opérateur humain. Cette caractérisation permet la formalisation des états et des changements d'état relatifs à la stabilité humaine. Sur la base des formalismes, des algorithmes sont proposés pour la surveillance des états et des transitions d'état de l'opérateur. Enfin, la dernière partie associe la stabilité humaine aux risques.

3.2 Cadre des travaux

Les chapitres 1 et 2 montrent que la sécurité des systèmes dépend de plusieurs concepts imbriqués : la stabilité concernant les évènements réguliers, la robustesse concernant les évènements connus irréguliers et, enfin, la résilience concernant les évènements imprévus ou inconnus. Dans ce cadre, la stabilité contribue à la robustesse, de même que, la robustesse contribue à la résilience *(cf. figure 3.1)*.

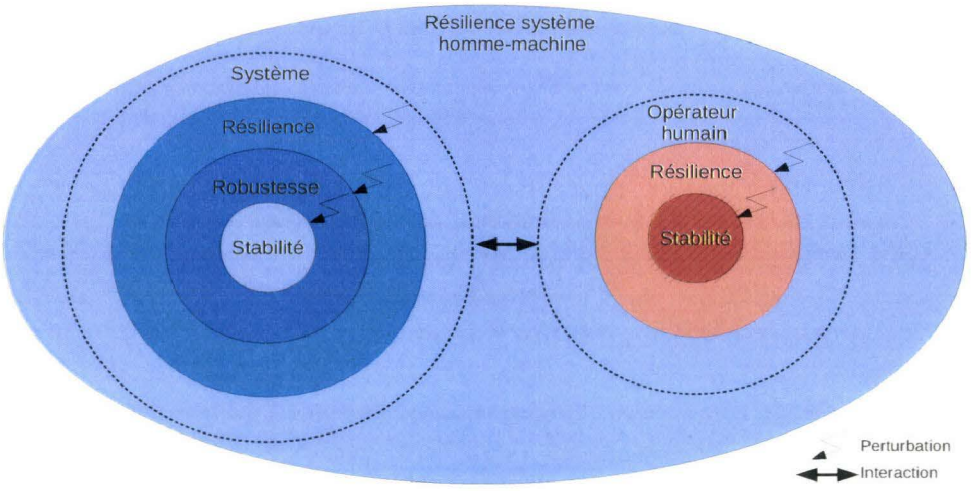


Figure 3.1 – *Niveaux de comportement d'un SHM en situation perturbée*

Cette approche se limite essentiellement à l'évaluation de la sécurité d'un point de vue système. D'un point de vue complémentaire, dans la suite de ce mémoire, nous nous focalisons sur la stabilité centrée sur l'Homme.

3.3 Caractérisation et formalisation de la stabilité humaine

Dans cette section, nous commençons par caractériser la stabilité humaine en relation avec les critères liés à l'opérateur humain. Sur la base de cette caractérisation, nous formalisons les états et les changements d'état de la stabilité humaine. Les formalismes seront ensuite repris par les algorithmes d'identification de la stabilité humaine.

3.3.1 Caractérisation de la stabilité humaine

À partir de l'ensemble des définitions donné au chapitre 2, la stabilité humaine est définie comme la capacité de l'opérateur humain à être et à se maintenir dans un état stable, dans des conditions (environnementales, organisationnelles, *etc.*) données. L'identification des états de stabilité s'effectue en rapport avec un (ou plusieurs) critère(s) qui est (sont) présenté(s) dans la suite du chapitre. La stabilité humaine représente l'état

ou le changement d'état de l'opérateur. Cet état ou ce changement d'état peut être de différentes natures [Richard 2008c] et [Richard 2008b] (*figure 3.2*) :

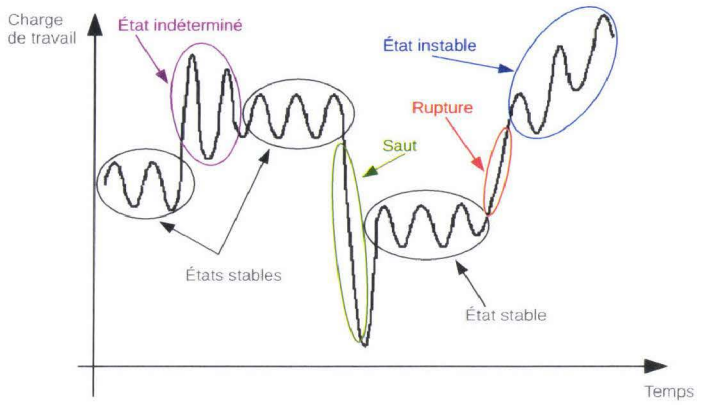


Figure 3.2 – Illustration des états de la stabilité humaine

- état stable. Cet état est basé sur une règle de la stabilité en automatique des systèmes appelée **BIBO** (Bounded Input Bounded Output). L'opérateur humain est dans un état stable, si et seulement si, la valeur de son indicateur (ou les valeurs de ses indicateurs) de stabilité est (sont) comprise(s) entre deux bornes. Un indicateur peut être mono- ou multi-critère. L'ensemble des critères relatif aux facettes « état, comportement, performance » de l'opérateur humain, au regard de sa stabilité, est développé dans la section 3.4.2. Les bornes sont variables en fonction des conditions dans lesquelles l'opérateur humain évolue,
- état instable. Dans cet état, un (ou plusieurs) indicateur(s) de la stabilité humaine diverge(nt),
- état indéterminé. L'indicateur ne permet pas de statuer sur la nature de l'état. Toutefois, à terme, cet état, souvent bref, converge généralement vers un des deux états cités précédemment,
- saut. Il représente une transition soudaine et rapide d'un état stable à un autre état stable,
- rupture. Elle représente une transition soudaine et rapide d'un état stable à un état instable et réciproquement.

Les commutations d'état sont donc de deux natures : saut ou rupture. Dans le cas d'une commutation vers un état indéterminé, seule la connaissance, à terme, de la nature (stable ou instable) de cet état permettra de qualifier la nature (saut ou rupture) de la commutation.
Cette caractérisation, en termes d'états et de changements d'état, de la stabilité humaine nous permet d'en proposer une formalisation.

3.3.2 Formalisation de la stabilité humaine

Pour permettre le développement d'algorithmes de surveillance de la stabilité humaine, ce paragraphe formalise les états stable et instable et les transitions de changement d'état (saut ou rupture).

La formalisation d'un état stable ES à un instant t, de l'indicateur I, estime que l'opérateur humain est stable lorsque les valeurs de l'indicateur restent autour de la première valeur mesurée, *équation 3.1.*

$$ES_{It} \quad si \quad x(t_i) - \alpha_1.x(t_i) < x(t) < x(t_i) + \alpha_2.x(t_i) \tag{3.1}$$

avec :
- $x(t)$: valeur de l'indicateur I à l'instant t,
- $x(t_i)$: valeur de l'indicateur I à l'instant t_i,
- t_i : instant de la première mesure suite à un changement d'état,
- α_1, α_2 : bornes inférieure et supérieure de l'état de stabilité ES. Dans une première approche et pour un indicateur donné, nous considérons $|\alpha_2 - \alpha_1|$ constante.

La formalisation d'un état instable EI à un instant t, de l'indicateur I, est caractérisée par une divergence de l'indicateur par rapport à la dernière valeur mesurée $x(t_b)$, *équation 3.2.*

$$EI_{It} \quad si \quad x(t) < x(t_b) - \gamma_1.x(t_b) \quad OU \quad EI_{It} \quad si \quad x(t) > x(t_b) + \gamma_2.x(t_b) \tag{3.2}$$

avec :
- $x(t_b)$: valeur de l'indicateur I à l'instant t_b,
- t_b : instant de la dernière valeur relevée,
- γ_1 et γ_2 : amplitude de la divergence.

La formalisation d'une transition d'état T (saut ou rupture) à un instant t, de l'indicateur I, est définie par une divergence brève et de grande amplitude de l'indicateur par rapport à la dernière valeur mesurée, *équation 3.3.*

$$T_{It} \quad si \quad x(t) < x(t_b) - \beta_1.x(t_b) \quad OU \quad T_{It} \quad si \quad x(t) > x(t_b) + \beta_2.x(t_b) \tag{3.3}$$

avec : β_1 et β_2 : amplitude de la commutation ($\beta_1 > \gamma_1$ et $\beta_2 > \gamma_2$).

L'identification de la nature de la transition (saut ou rupture) est établie une fois la nature de l'état de destination connue. L'ensemble des coefficients (α_1, α_2, γ_1, γ_2, β_1 et β_2) est déterminé de manière empirique.

Afin d'illustrer ce formalisme, le tableau *3.1* présente un ensemble de valeurs sur lequel les équations vont être appliquées.

Tableau 3.1 – *Exemple illustratif du formalisme de la stabilité humaine*

Numéro de valeur	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Valeurs	1	1.2	1.1	0.9	0.8	2.1	3.6	3.2	3.1	3.4	2	0.7	1	1.5

On fixe α_1 à 0.3, α_2 à 0.3, β_1 et β_2 à 0.4 et γ_1 et γ_2 à 0.7. L'équation *3.1* identifie un état de stabilité pour les numéros de valeurs allant de 1 à numéro 5. La valeur de référence est $x(t_1)$. Ensuite, l'équation *3.3* permet d'identifier un changement d'état de stabilité des numéros de valeur 6 à 7. Concernant la valeur numéro 6, la valeur de référence est $x(t_1)$ et pour la valeur numéro 7, la valeur de référence est $x(t_6)$. La valeur de référence est alors $x(t_7)$, l'équation *3.1* identifie un nouvel état de stabilité jusqu'au numéro de valeur 10. La valeur suivante est identifiée comme un changement d'état par l'équation *3.3*. La nouvelle valeur de référence est alors $x(t_{11})$. Ensuite, à partir du numéro de valeur 12, l'équation *3.2* identifie un état d'instabilité jusqu'au numéro de valeur 14.

L'exemple identifie deux états stables différents. On parle alors de niveaux de stabilité. Le premier niveau est autour de la valeur $x(t_1)$, le deuxième état stable est autour de $x(t_7)$. L'ensemble des états et changements d'état de la stabilité humaine forme une séquence. Dans le chapitre 5, les séquences pertinentes seront appelées signatures.

3.4 Identification de la stabilité humaine

La stabilité humaine désormais formalisée, notre objectif est maintenant de la surveiller en situation perturbée. L'identification et la détection des états et changements d'état sont déterminées par trois algorithmes (temporel, fréquentiel et séquentiel) complémentaires. Ces algorithmes peuvent s'appliquer à des indicateurs mono- ou multi-critère de la stabilité humaine, de manière indépendante ou combinée.

3.4.1 Algorithmes d'identification de la stabilité humaine

3.4.1.1 Portée des algorithmes d'identification

Les algorithmes décrits dans les sections suivantes s'attachent à la surveillance de l'opérateur humain. D'une manière générale, la surveillance peut être décomposée en différentes activités [Delépine 2007] :

- acquisition. Elle repose sur un ensemble de moyens pour collecter et archiver des informations valides,
- identification. Elle filtre et extrait les informations utiles dans l'ensemble des données acquises,
- détection. Elle recense les déviations et détermine le bon fonctionnement ou le mauvais fonctionnement du système.

Les algorithmes traitent de l'ensemble de ces activités de surveillance. En situation non perturbée, les éventuels états d'instabilité détectés seraient liés aux critères de la facette « état » intrinsèque à l'opérateur humain (cf. 3.4.2.). En situation perturbée, la surveillance doit être enrichie par des activités de diagnostic [Delépine 2007] :

- localisation. Elle vise à localiser et déterminer les sous-ensembles de composants susceptibles de contenir les défauts,
- identification. Elle détermine les causes exactes de la défaillance,
- explication. Elle justifie le(s) raisonnement(s) et les choix effectués pour obtenir les résultats de localisation et d'identification.

Ces activités permettent d'expliquer les causes des natures de la stabilité humaine détectées. Elles se composent de deux fonctions principales (*figure 3.3*) :
Cette surveillance peut être complétée par une phase de pronostic, aussi appelée diag-

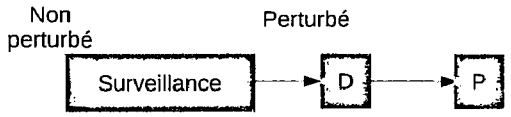


Figure 3.3 – *Tâche de l'opérateur en situation de conduite*

nostic prédictif. Celle-ci permet de prédire une défaillance future. Dans ce cas, on cherche à identifier une dégradation pouvant précéder une défaillance.

Dans le cadre de l'opérateur humain, l'étude de la stabilité humaine cherche a détecter les « défaillances » de l'opérateur, c'est-à-dire les erreurs humaines, par l'analyse de son état de stabilité à instant t. Dans la suite du mémoire, les travaux portent, à la fois, sur la surveillance et le diagnostic. Une réflexion sur le pronostic sera néanmoins proposée en perspective dans le chapitre 5.

La portée de nos algorithmes établie, nous en donnons maintenant la forme.

3.4.1.2 Algorithme temporel (AT)

Pour un état stable, à chaque pas d'échantillonnage, l'algorithme vérifie que la valeur de l'indicateur traité à l'instant t demeure autour de la première valeur mesurée. Pour un état instable, l'algorithme contrôle la divergence de l'indicateur par rapport à la mesure précédente. Pour une transition d'état, l'algorithme s'assure de la divergence brève et de forte amplitude de l'indicateur par rapport à la mesure précédente. Un exemple de traitement d'un indicateur par cet algorithme est donné *figure 3.4*.

L'algorithme AT est présenté dans *algorithme 1*.

Cet algorithme temporel est plus particulièrement indiqué pour l'analyse d'indicateurs continus et de fréquence faible. C'est notamment le cas des indicateurs dont le ou les critères sont issus des facettes « comportement » et « performance ».

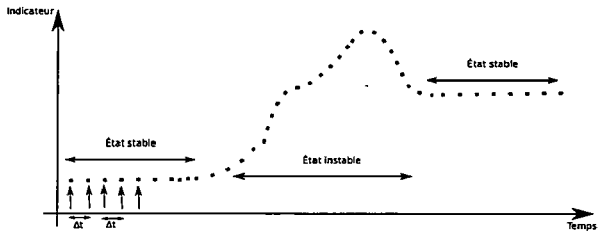


Figure 3.4 – Exemple de traitement d'un indicateur par l'AT

Algorithme 1 : *Algorithme temporel (AT)*

valeur ← première valeur
Tant que *Pas fin* **Faire**
  Si $valeur - \alpha_1 * valeur \leq valeur_courante \leq valeur + \alpha_2 * valeur$ **Alors**
    $nombre_itération \leftarrow nombre_itération + 1$
    Sinon si $nombre_itération > nombre_itération_défini$ **Alors**
      Stable sur nombre itération
      $valeur \leftarrow valeur_courante$
      $nombre_itération \leftarrow 0$
    Sinon si $valeur_courante \leq valeur - \beta_1 * valeur$ *OU* $valeur_courante \geq valeur + \beta_2 * valeur$ **Alors**
      Saut Rupture
      $nombre_itération \leftarrow 0$
      $valeur \leftarrow valeur_courante$
    Sinon si $valeur_courante \leq valeur - \gamma_1 * valeur$ *OU* $valeur_courante \geq valeur + \gamma_2 * valeur$ **Alors**
      Instable
      $nombre_itération \leftarrow 0$
      $valeur \leftarrow valeur_courante$
    Sinon
      Indéterminé
  Finsi
Fin Tant que

3.4.1.3 Algorithme fréquentiel (AF)

Cet algorithme traite les états et changements d'état de manière similaire à l'algorithme précédent à la différence qu'il traite de fréquences plutôt que d'instants. En effet, cet algorithme identifie des répétitions fréquentielles de l'indicateur. Pour cela, il recherche des répétitions de forme quelque soit l'amplitude. À chaque pas d'échantillonnage, les valeurs de l'indicateur sont mémorisées pour une période $[0, T[$. Une fois ces valeurs sauvegardées, l'opération est réitérée sur $[T, 2T[$. Puis les résultats sont comparés aux valeurs de la période précédente. Si les formes des deux signaux concordent, une stabilité fréquentielle est établie (*figure 3.5*). Sinon une instabilité ou une transition est

établie selon l'ampleur de l'écart.

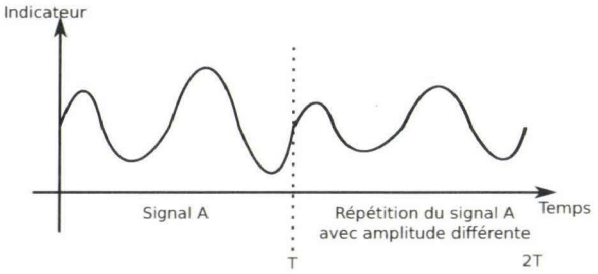


Figure 3.5 – Exemple de traitement d'un indicateur par approche fréquentielle

L'utilisation d'algorithmes de reconnaissance de forme est envisagé dans l'étude de la stabilité en fréquence. Néanmoins, l'étude actuelle ne permet pas d'accéder à des signaux à fréquence suffisamment élevés pour appliquer ce type d'algorithme.

L'algorithme fréquentiel est plus particulièrement indiqué pour l'analyse d'indicateur continu et de fréquence élevée. C'est notamment le cas, des indicateurs dont le ou les critères sont issus de la facette « état » de l'opérateur humain, tel que le rythme cardiaque. D'autres critères entrent dans ce type d'étude, par exemple la **VACMA** afin de contrôler la fréquence d'appui sur ce système.

3.4.1.4 Algorithme séquentiel (AS)

L'algorithme temporel et l'algorithme fréquentiel donnent, en fonction du temps, la nature des états et changements d'état de la stabilité de l'opérateur. Ces résultats sont traités par l'algorithme séquentiel afin d'identifier des séquences d'états et de changements d'état de stabilité de l'opérateur humain. L'objectif est de dégager des séquences typiques (signatures) à corréler avec les perturbations affectant le système ou son environnement.

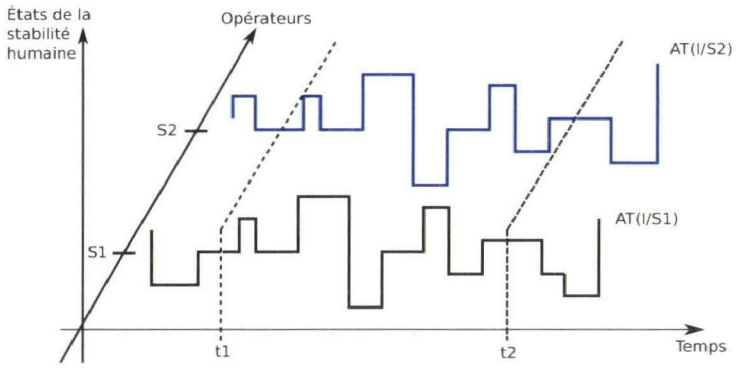


Figure 3.6 – Exemple de signature de la stabilité humaine

La figure *3.6* présente deux séquences typiques de stabilité pour deux opérateurs humains $S1$ et $S2$ pour un indicateur commun I, face à une perturbation P apparaissant à l'instant $t1$ et se finissant à l'instant $t2$. Elles sont issues du traitement par l'algorithme séquentiel des résultats donnés par l'application successive de l'algorithme AT aux indicateurs $I/S1$ et $I/S2$ notée $AT(I/S1)$ et $AT(I/S2)$. L'identité des deux séquences sont identiques et permet de déduire une signature de la stabilité humaine pour la perturbation P.

L'algorithme AS est présenté dans *algorithme 2.*

Algorithme 2 : *Algorithme séquentiel*

Si *Perturbation = true* **Alors**
  Tant que *Perturbation en cours* **Faire**
    Sauvegarde des états et changements d'état de stabilité temporels et fréquentiels
  Fin Tant que
Finsi
Séquence liée à la perturbation sauvegardée
Analyse de la séquence

La complémentarité entre les algorithmes est schématisée dans la figure *3.7.*

Ces algorithmes d'identification de stabilité humaine seront évalués sur différents indicateurs issus du comportement d'un opérateur de conduite ferroviaire ERTMS/ETCS. La présentation de cette expérimentation fait l'objet du chapitre 4. Les indicateurs traités, par ces algorithmes, doivent décrire un (ou plusieurs) critère(s) relatif(s) à la stabilité humaine. Les critères représentatifs de la stabilité humaine sont décrits dans la section suivante.

3.4.2 Critères de la stabilité humaine

Dans un système sociotechnique complexe, la composante humaine se décline à plusieurs niveaux :

- individuel. À ce niveau, l'individu est caractérisé par ses aptitudes, ses attitudes, sa perception, sa motivation, ses émotions, *etc.*,
- collectif. À ce niveau, le groupe se distingue par la communication, les pouvoirs, les conflits, l'influence, les compétences, *etc.*,
- organisationnel. L'organisation est décrite par son cadre prescriptif, son nombre de tâches simultanées, le temps disponible, *etc.*,
- environnemental. Le contexte est caractérisé de manière temporelle, spatiale (espace de travail, interfaces *etc.*).

Nos travaux s'appliquent au poste de conduite/supervision des systèmes homme-machine. Ils se concentrent donc essentiellement sur les critères individuels en lien avec

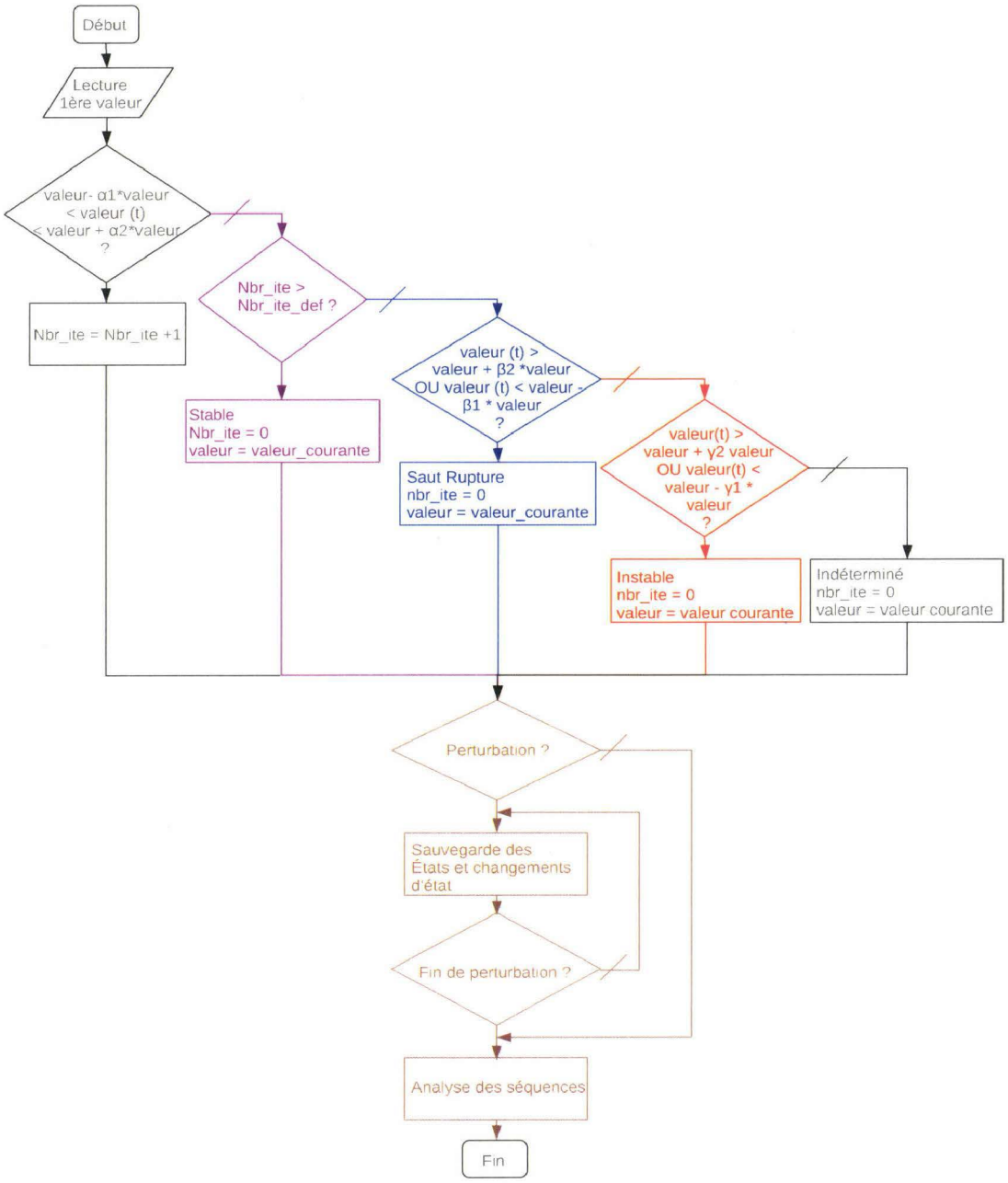


Figure 3.7 – Organigramme des algorithmes d'identification de la stabilité humaine

la stabilité humaine.

En situation normale, les tâches de conduite et de supervision sont principalement monotones et répétitives. Dans le champ d'application des transports guidés, il est intéressant de connaître autant le comportement et la performance de l'opérateur que son état intrinsèque (difficilement mesurable) pour lesquels ces tâches peuvent entraîner des effets négatifs (fatigue, baisse de vigilance, inattention, *etc.*). Endkins [Edkins 2007] évoque que la majorité des incidents survenant dans les transports ferroviaires sont liés à des critères d'attention.

De façon à appliquer nos algorithmes à des indicateurs caractéristiques des critères de la stabilité humaine, nous détaillons maintenant ces critères. Ils sont classifiés selon trois facettes « état », « comportement » et « performance » présentées par la figure *3.8* [Richard 2010a] et [Richard 2010b].

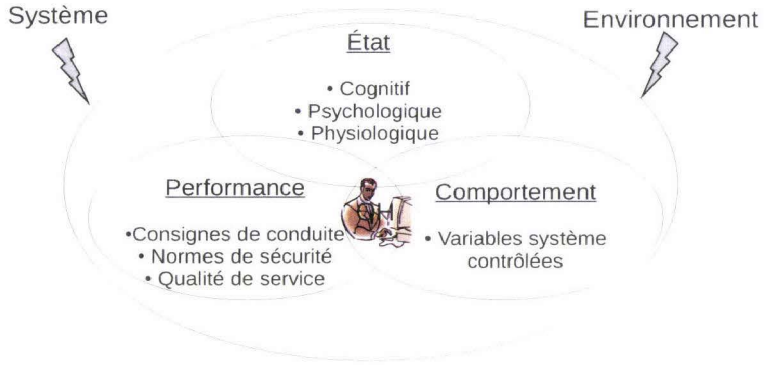


Figure 3.8 – *Critères liés à l'opérateur humain*

Enfin, si cette classification des critères de la stabilité humaine est générique, la définition d'indicateurs relatifs à ces critères dépend de la tâche de l'opérateur humain. Par exemple, les indicateurs vitesse, accélération et interdistance pour une tâche de conduite ferroviaire ou la cadence et la qualité de produits finis pour une tâche de production industrielle.

3.4.2.1 La facette « état »

La facette « état » de l'opérateur humain regroupe l'ensemble des critères intrinsèques à l'Homme. Ces critères sont d'ordre cognitif, physiologique et psychologique [Sperandio 1980].

Les critères cognitifs reflètent le degré de la connaissance monopolisé par l'opérateur humain dans son activité. Il est le reflet du niveau de qualification, des règles et d'une profonde connaissance,

Les critères psychologiques sont liés à des sentiments de stress, d'insatisfaction, de frustration, d'inhibition ou même de culpabilité ressentis par l'opérateur humain,

Les critères physiologiques procurent des informations indirectes sur l'activité mentale de l'opérateur humain. Ils comprennent, par exemple, l'activité oculaire (mouvements oculaires, direction du regard et clignements des paupières), la fréquence cardiaque et la parole.

Cet état interne de l'opérateur est difficilement observable. Il nécessite souvent la mise en œuvre de systèmes de mesure lourds et intrusifs. Pour ces raisons et dans un premier temps, l'évaluation expérimentale de nos travaux s'est focalisée sur les facettes « comportement » et « performance » de l'opérateur humain, plus facilement observables et/ou mesurables. Toutefois, soulignons que des études théoriques, dans le domaine de la psychologie cognitive, ont été menées sur les concepts de stabilité cognitive et de dissonance cognitive.

3.4.2.1.1 La stabilité cognitive

La stabilité cognitive est définie par le fait qu'un opérateur humain commette des erreurs et qu'il est capable de récupérer ces dernières. Ce concept relatif à la stabilité cognitive se divise en deux types [Boy 2005, Boy 2007] :

- la stabilité passive, le système et l'environnement permettent à l'opérateur de retrouver sa stabilité avec un coût de cognition faible,
- la stabilité active, où l'opérateur est dans l'obligation de produire un travail cognitif important afin de retrouver sa stabilité.

La stabilité passive ne nécessite pas de contrôle actif. L'exemple le plus parlant est la posture de l'homme. Un être humain, de même qu'un animal, garde son équilibre de façon inconsciente lorsqu'il se déplace. Ce phénomène est possible grâce à une compensation des oscillations et un retour à l'équilibre par toute une série de contractions de muscles. Un autre exemple permet d'illustrer ce phénomène, la tâche de faire rebondir une balle sur un raquette [Wei 2007, Wei 2008]. Lorsqu'il s'agit d'un novice, la stabilité passive est remplacée dans un premier temps par le contrôle actif (environ 30 minutes). Lorsque l'utilisateur est expérimenté, le contrôle actif n'entre plus en jeu et le contrôle de la balle se fait par stabilité passive exclusivement.

Cette stabilité cognitive, essentiellement dans sa partie « active », peut être remise en cause par la théorie de la dissonance cognitive.

3.4.2.1.2 La dissonance cognitive

L'individu est à la recherche d'un équilibre cognitif, la stabilité cognitive. Cet équilibre peut être remis en question et générer un état de tension [Brunel 2011]. Festinger définit la dissonance cognitive comme « un état de tension désagréable dû à la présence simultanée de deux cognitions (idées, opinions, comportements) psychologiquement inconsistantes » [Festinger 1956].

La théorie de la dissonance se décline en quatre grandes étapes, *figure 3.9* :

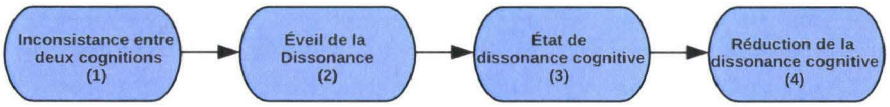


Figure 3.9 – Théorie de la dissonance cognitive [Brunel 2011]

1. inconsistance entre deux cognitions (dans la campagne expérimentale, nous nous sommes attachés à prendre en compte ce critère de dissonance cognitive dans un des scénarios expérimentaux),
2. éveil de la dissonance correspond à la perception de l'inconsistance qui engendre l'état de dissonance,
3. état de dissonance cognitive. Il représente l'état d'inconfort psychologique dans lequel se trouve l'individu,
4. réduction de la dissonance cognitive. L'individu cherche à amoindrir l'inconfort psychologique dans lequel il se trouve.

Cette dissonance peut avoir de nombreuses origines, par exemple un décalage entre [Reitzman 2005] :

- ce qui est attendu et ce qui advient,
- ce qui est souhaité et ce qui se réalise,
- ce qui avait été prédit et ce qui advient,
- l'importance de l'effort et l'insignifiance du résultat.

Les exemples associés aux critères cognitifs montrent que 1) la notion de stabilité humaine diffère de la notion de stabilité technique présentée dans le chapitre 2 et que 2) elle se décline en stabilité d'ordre cognitif, comportemental et performance.

3.4.2.2 La facette « comportement »

La facette « comportement » de l'opérateur humain regroupe un sous-ensemble des critères extrinsèques à l'Homme. Ce sous-ensemble porte sur des variables d'entrée du système contrôlable par l'opérateur comme la vitesse, l'interdistance et l'ouverture/fermeture des portes pour un système de transport guidé. Ces critères sont plus facilement observables et mesurables.

3.4.2.3 La facette « performance »

La facette « performance » de l'opérateur humain regroupe un autre sous-ensemble des critères extrinsèques à l'Homme. Ce sous-ensemble, également observable et mesurable, concerne des variables plus subjectives qui reflètent des critères de performances de l'opérateur en terme de confort, de qualité de service, de respect des consignes de conduite et de sécurité pour un système de transport guidé.

En guise de synthèse et dans une première approche, la section suivante présente les résultats obtenus par le traitement d'un indicateur, reflet d'un critère issu de la facette « performance », par l'algorithme AT dans le domaine du contrôle de trafic aérien.

3.4.3 Exemple d'application de l'algorithme AT

Pour des raisons de disponibilité de données expérimentales, nous avons, dans un premier temps, éprouvé nos travaux dans le domaine du contrôle de trafic aérien. Les données sont issues de la campagne SPECTRA qui concerne l'étude de faisabilité d'une allocation dynamique de tâches dans le contrôle de trafic aérien [Vanderhaegen 1997] et [Crevits 2002] et [Vanderhaegen 2003]

Dans l'exemple présent, la tâche du contrôleur de trafic aérien consiste essentiellement à gérer :

- les paramètres de vol pour chaque avion (cap, altitude),
- les conflits potentiels entre les différents avions.

Le critère étudié ici, pour l'exemple, est l'exigence de la tâche. Celle-ci combine le nombre d'avions présents dans le secteur aérien à contrôler et le nombre de conflits, à gérer, entre les différents appareils.

L'algorithme AT est éprouvé sur ce critère d'exigence de tâches. Les états et changements d'état relatifs à la stabilité humaine sont identifiés dans la figure *3.10* [Richard 2010a] et [Richard 2011]. La représentation de la nature des états de stabilité s'inspire de la représentation par graphes d'états. Par convention, il est admis que les états instables sont identifiés par des paliers de valeur -1, les différents états stables par des paliers de valeurs positives sur l'intervalle [0,1]. La nature des changements d'état est identifiée par le commutation d'un état à un autre. La mise en œuvre de l'algorithme AT sur les données d'exigence de tâches permet de détecter la nature des différents états et changements d'état relatif à la stabilité humaine.

Globalement, l'algorithme AT répond aux objectifs de détection de la stabilité humaine. Néanmoins, il est évident que, pour cet exemple, le contrôleur aérien n'est pas limité à cette seule exigence de tâches. L'étude de la stabilité humaine fondée sur ce seul critère apparaît insuffisante. Dans le domaine du transport guidé, d'autres critères tels que le confort des passagers, la qualité de service, le respect des consignes de conduite, *etc.* doivent être pris en compte. La campagne expérimentale menée et présentée dans le chapitre 4 est orientée en ce sens.

L'identification et la détection de la nature des états et changements d'état relatifs à la stabilité humaine est une première étape de nos travaux. Il reste à associer, quand cela est possible, le (ou les) risque(s) à chaque nature d'états ou changement d'état. La section suivante est une réflexion de l'impact de la stabilité humaine sur la sécurité du système.

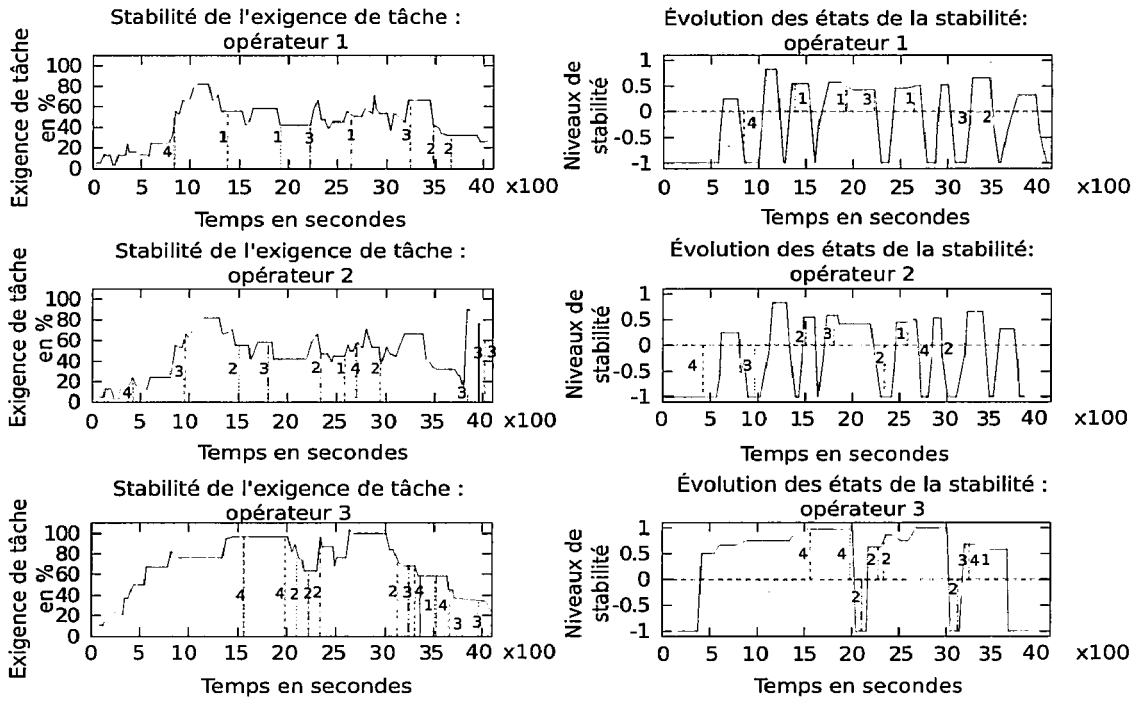


Figure 3.10 – *Courbes et graphes d'états de la stabilité humaine appliquée à SPECTRA avec association des évènements*

3.5 Impact de la stabilité humaine sur la sécurité

Le chapitre 2 a évoqué une interaction entre stabilité et sécurité du système. Intuitivement, d'un point de vue humain, cette interaction existe également entre stabilité humaine et sécurité. L'objectif de la présente section est d'établir objectivement le lien entre la nature des états et changements d'état relatifs à la stabilité humaine et les risques. Dans la bibliographie, certains auteurs associent la performance de l'opérateur humain à sa charge de travail [Yerkes 1908]. Sur la courbe *3.11*, la variation de la performance par rapport à la charge de travail suit une courbe dite de « baignoire inversée ».

Lorsque l'opérateur est en sous charge de travail, sa performance devient faible et des phénomènes comme l'inattention ou la somnolence peuvent générer des risques d'erreurs humaines. De même, lors d'une surcharge de travail, la performance décroît et des phénomènes comme le stress ou l'énervement peuvent également provoquer des risques d'erreurs humaines. La courbe fait apparaître une zone sensiblement constante pour laquelle la performance est optimale et le risque d'erreur faible.

Cette description se limite à trois zones. Deux zones où la performance est considérée comme inacceptable (en cas de sous-charge ou sur-charge de travail) et une zone où la performance est considérée comme acceptable. Globalement, le modèle de courbe présenté pour l'évolution de la performance en fonction de la charge de

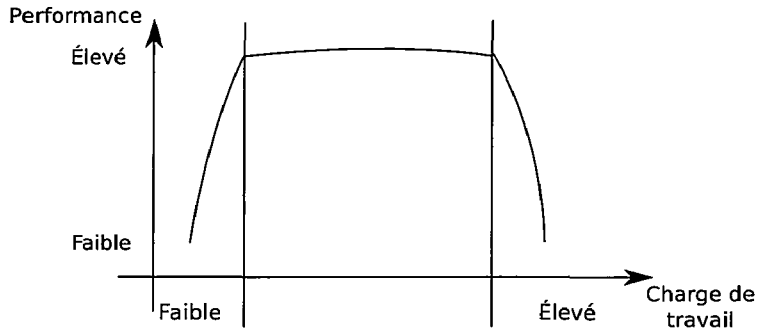


Figure 3.11 – *Lien entre charge de travail et performance de l'opérateur humain d'après [Mitchell 2010]*

travail reste approximatif et chaque zone présente des variations continues beaucoup plus marquées (cf. *figure 3.12*). Les algorithmes de la stabilité humaine pourraient identifier plus finement les instants auxquels on peut potentiellement associer des risques.

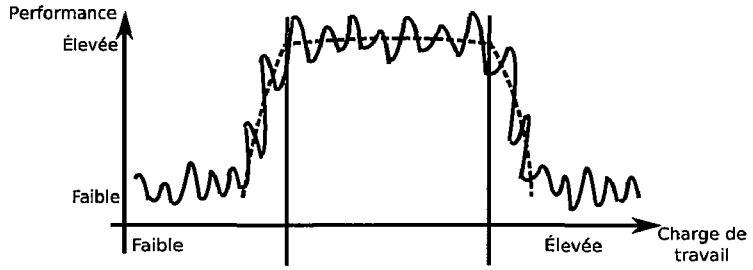


Figure 3.12 – *Lien entre charge de travail et performance de l'opérateur humain*

Comme nous ne possédons pas de données concrètes pour l'étude de la variation charge de travail/performance, nous nous sommes attachés à identifier les risques associés à la nature des états et changements d'état pour les données issus des données SPECTRA.

Lors de cette campagne expérimentale, les erreurs humaines ont été relevées ainsi que l'heure d'occurrence. Cela permet de les mettre en relation avec l'exigence de la tâche. Ces différents évènements sont recensés dans le tableau *3.2* :

Tableau 3.2 – *Évènements observés durant la simulation*

Temps	Évènement pour l'opérateur 1	Évènement pour l'opérateur 2	Évènement pour l'opérateur 3	Nature de stabilité humaine	Classe d'évènement
0h07 (420s)		Oubli de répondre		Instable	4
0h14 (840s)	Difficultés à utiliser les outils			Instable	4

Continue sur la page suivante

Tableau 3.2 Évènements observés durant la simulation – Suite

Temps	Évènement pour l'opérateur 1	Évènement pour l'opérateur 2	Évènement pour l'opérateur 3	Nature de stabilité humaine	Classe d'évènement
0h16 (960s)		Problème de cap avec avion		Instable	3
0h23 (1380s)	Alarme non perçues			Stable	1
0h25 (1500s)		Conflit non vu		Stable	2
0h32 (1920s)	2 alarmes, manque de temps pour les gérer, « C'était un peu serré »			Saut	1
0h35 (2100s)			Conflit vu trop tard	Instable	2
0h38 (2220s)	Vol non validé		Vol jamais mis à 250, modification incorrecte	Stable / Stable	3 / 3
0h39 (2340s)		Conflit non vu	Conflit mal résolu	Instable / Saut	2 / 2
0h44 (2640s)	Alarme non perçue			Stable	1
0h45 (2700s)		Alarme non vue		Rupture	1
0h49 (2940s)		Conflit résolu mais vu trop tard		Rupture	2
0h52 (3120s)			Conflit non vu	Instable	2
0h54 (3240)	Changement du cap du vol un peu tardif			Rupture	3
0h55 (3300s)			Alarme, l'avion dévie mais trop tard « Boum ! »	Stable	1
0h59 (3480s)	Conflit non vu		La situation redevient presque normal	Rupture / Stable	2 / 4
1h01 (3660s)	Conflit vu mais trop tard		Oubli d'appeler vol SAS 9604	Rupture / Instable	2 / 4
1h04 (3840s)		A presque oublié un vol		Instable	4
1h06 (3960s)		Mauvais cap sur un vol, « c'est très grave »	Remet le vol SAS 9604	Instable / Instable	3 / 3
1h07 (4020s)		Dévie l'avion mais trop tard		Instable	3

La colonne « classe d'évènement » du tableau *3.2* permet de placer les évènements sur les graphes d'état de la stabilité humaine de la figure *3.10* présentée dans la section 3.4.3.

Il a été observé que 7 évènements, qui représentent 28% des évènements, figurant dans le tableau *3.2*, se produisent durant un état stable, 11 (44%) dans un état instable ou indéterminé et 7 (28%) pendant un saut ou une rupture (cf. *figure 3.13*). L'analyse générale montre l'apparition de risques d'événements indésirables ou d'erreurs humaines pendant les ruptures, les sauts ainsi que durant les états instables.

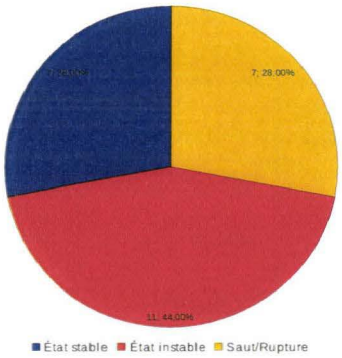


Figure 3.13 – *Association des évènements redoutés et des états de stabilité*

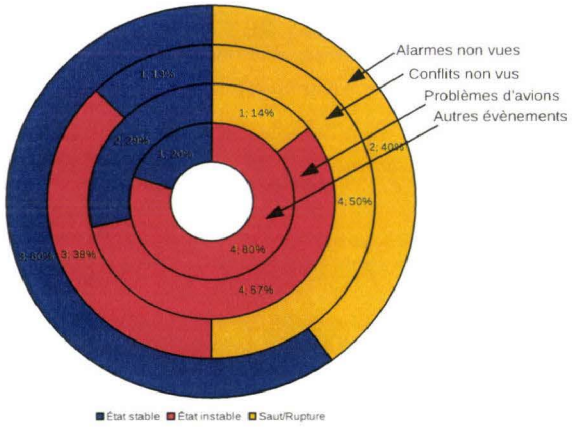


Figure 3.14 – *Distribution des évènements en fonction de la nature des états et changements d'état*

Une analyse plus détaillée permet de relier les évènements indésirables en fonction de la nature de l'état ou du changement d'état relatif à la stabilité humaine (cf. *figure 3.14*). Pour l'évènement « alarmes non perçues » , il apparaît que 40% des cas se produisent lors d'un saut ou d'une rupture (2 cas sur 5) et que dans 60% des cas se produisent durant un état stable (3 sur 5). Pour l'évènement « conflits non vus », dans 50% des cas, ils surviennent durant un changement d'état (4 sur 8), dans 38% des cas (3 sur 8) durant un état instable et dans 13% des cas (1 sur 8) durant un état stable.Pour l'évènement « problème de vol " dans 14% des cas, ils surviennent durant un changement d'état (1 sur 7), dans 57% des cas (4 sur 8) durant un état instable et dans 29% des cas (2 sur 8) durant un état stable. Pour les « autres évènements », dans 80% des cas (4 sur 5) ils apparaissent durant un état instable et dans 20% des cas (1 sur 5) durant un état stable. L'occurrence des évènements durant les états stables est biaisée par l'indicateur étudié. En effet, dans environ 80% des occurences durant un état stable, elles surviennent alors que l'exigence de la tâche est très élevée ($>$ 80%). Il est donc envisageable que les évènements soient dus à cette haute exigence et on ne peut donc pas les lier avec certitude à l'état stable. Néanmoins, de façon générale, les risques surviennent durant un état instable (44% des évènements indésirables relevés) ou un changement d'état (28% des évènements

indésirables).

3.6 Conclusion

L'opérateur humain est au cœur des systèmes. Ce chapitre met en évidence que l'opérateur humain revêt une importance dans l'évaluation des systèmes homme-machine. Nous avons présenté dans ce chapitre une nouvelle approche de la prise en compte de l'opérateur humain dans les systèmes. Le concept de stabilité humaine est la contribution essentielle de notre travail de recherche. La stabilité humaine a été définie, caractérisée et des algorithmes de détection de la nature des états et changements d'état relatifs à ce concept ont été proposés. Le cadre de ces travaux s'inscrit dans la thématique surveillance des systèmes centrée sur le rôle de l'opérateur humain. À travers l'exemple issu de SPECTRA, l'algorithme AT a montré sa capacité à identifier et détecter les différents états de stabilité et les risques associés à ces états. Dans SPECTRA, l'étude s'est attachée au critère exigence de tâche.

Le chapitre suivant propose de mettre en œuvre notre contribution et de la valider au travers d'une campagne expérimentale dont le champ d'application est le transport ferroviaire et plus précisément le système **ERTMS/ETCS**. L'objectif est d'éprouver les algorithmes de détection de la stabilité humaine sur un système plus réaliste avec plusieurs critères d'études tels que la qualité de service, le respect de la vitesse, *etc.* et de mettre en relation les états détectés avec les risques potentiels d'erreur humaine.

L'objectif est de valider la détection des états de stabilité et de débuter le travail de mise en relation de ces états avec les risques potentiels d'erreur humaine.

CHAPITRE 4

Mise en œuvre de la stabilité humaine dans le domaine des transports guidés

Table des matières

4.1 Introduction 67
4.2 Le système ERTMS/ETCS 68
4.2.1 Spécifications techniques ERTMS/ETCS 69
4.2.2 Présentation de la plate-forme **ERTMS** 71
4.3 Présentation de la campagne expérimentale 73
4.3.1 Objectifs de la campagne expérimentale 73
4.3.2 Les scénarios de l'expérimentation 74
4.3.2.1 Caractéristiques du scénario non perturbé 74
4.3.2.2 Caractéristiques du scénario perturbé 75
4.3.2.3 Zone de danger de la stabilité humaine 78
4.3.3 La population 79
4.3.4 Le déroulement des passations 79
4.3.4.1 Briefing 80
4.3.4.2 Passation 80
4.3.4.3 De-briefing 81
4.4 Pré-traitement des données expérimentales 81
4.4.1 Présentation des données obtenues 81
4.4.1.1 Formatage du fichier de données 81
4.4.1.2 Récupération des données étudiées 83
4.5 Conclusion 84

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, la stabilité humaine a été formalisée et caractérisée et des outils de surveillance ont été définis afin de détecter les états et les changements d'état de la stabilité humaine.

Le chapitre est composé de trois parties. La première partie présente le contexte du déploiement du système ERTMS en Europe pour lequel le facteur humain est peu pris en compte et le retour d'expérience est quasiment inexistant. La deuxième décrit le protocole

et la campagne expérimentale menés sur ce système afin de caractériser la stabilité de l'opérateur humain en phase de conduite. Enfin, la dernière partie expose le traitement des données expérimentales par les algorithmes fournis dans le chapitre 3.

4.2 Le système ERTMS/ETCS

En 1990, la convention Schengen autorise la libre circulation des personnes et des biens entre les pays signataires. Dans ce cadre, plusieurs directives européennes imposent l'interopérabilité et la sécurité des systèmes transeuropéens à grande vitesse et conventionnels [Directive 96/48/CE 1996, Directive 2001/16/CE 2001, Directive 2004/50/CE 2004]. Ces directives visent, notamment, à simplifier le passage des frontières entre états membres. En effet, vingt-trois systèmes de contrôle/commande et de signalisation ferroviaires cohabitent (*figure 4.1*). Elles entraînent d'importantes contraintes techniques et économiques.

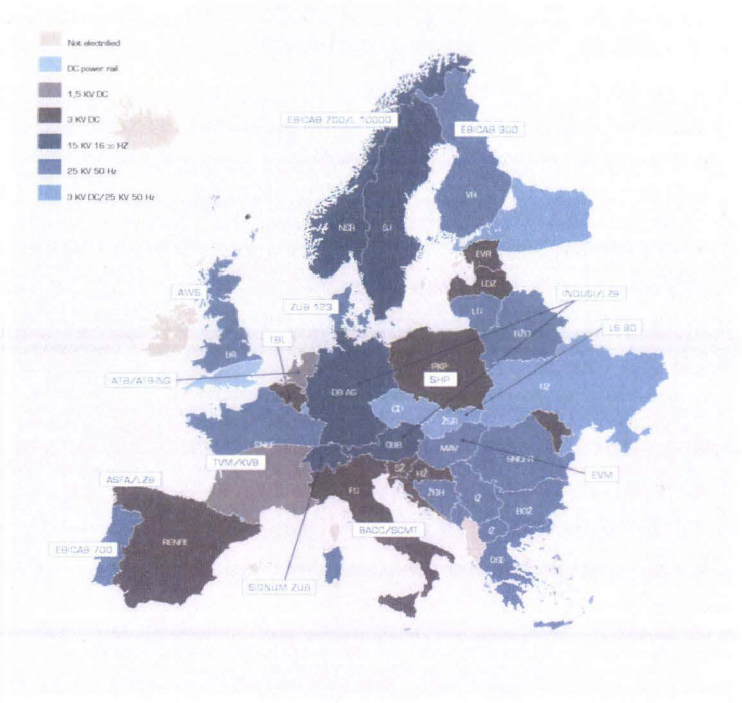


Figure 4.1 – *Carte des systèmes de contrôle commande ferroviaire européen [Corridor A]*

Le matériel roulant transfrontalier doit être équipé de plusieurs systèmes de contrôle commande (**KVB**, **TVM** (Transmission Voie-Machine),**LZB** (Linienzugbeeinflussung) ...) compatibles avec les différents environnements rencontrés. Une autre solution consiste à changer le matériel roulant à la frontière. Ceci impose des arrêts supplémentaires, une baisse de la qualité de service mais aussi des problèmes d'adaptation des conducteurs aux différents systèmes. L'accident franco-luxembourgeois, décrit dans la section 4 du

chapitre 1, illustre parfaitement cette problématique. Pour s'affranchir de ces problèmes, l'**UNISIG** (Union Industry of Signalling), créée en 1998 pour travailler sur les spécifications techniques de ce système, a posé les bases. Elle regroupe des entreprises renommées dans le domaine de la signalisation ferroviaire et des systèmes de contrôle-commande des trains telles que Thales, Alstom, Ansaldo, Bombardier... L'**ERA** (European Railway Agency), agence communautaire créée en 2004, est actuellement en charge de la promotion et de la régulation de ce système. Ses objectifs sont d'harmoniser les règles techniques et de sécurité nationales des différents états membres de l'**UE**. Elle est chargée d'établir, progressivement, des règles de sécurité communes à tous les réseaux ferrés européens.

La section suivante détaille les principes de fonctionnement du système **ERTMS/ETCS**.

4.2.1 Spécifications techniques ERTMS/ETCS

Le système **ERTMS** désigne le management du transport européen. Il est indissociable du système technique appelé **ETCS**.

Ce système **ERTMS** regroupe deux sous-systèmes [European Railway Agency 2008], illustrés figure *4.2* :

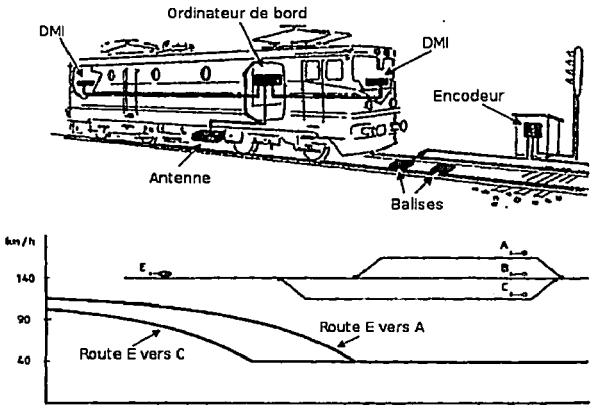


Figure 4.2 – *Vue du système bord et du système sol*

1. le sous-système sol. Il regroupe un ensemble de balises chargées de transmettre les informations à la cabine. Les données sont envoyées aux balises par un encodeur et réceptionnées par le train via une antenne positionnée sous celui-ci,
2. le sous-système embarqué. Il restitue sur le **DMI** (Driver Machine Interface) l'ensemble des informations nécessaires à la conduite. Ces différentes données sont récupérées, traitées et analysées par les équipements présentés figure *4.4*. Les communications entre le calculateur de bord **EVC** (European Vital Computer) et le **DMI** ne sont pas standardisées [Winter 2009]. Le **DMI** existe en deux versions : clavier ou écran tactile. Une autre antenne est présente à bord des convois équipés **ERTMS/ETCS**. Elle réceptionne les données émises par le **GSM-R** et concerne davantage le niveau 2.

Figure 4.3 – Vue d'un DMI à bord d'un convoi

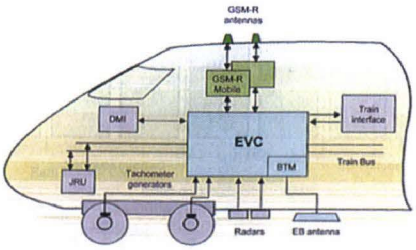


Figure 4.4 – Représentation de l'équipement ETCS de bord

En fonction de la configuration des voies, **ERTMS** définit plusieurs niveaux d'utilisation :

- le niveau **STM** (Specific Transmission Module). Il s'agit d'un niveau particulier. Il est utilisé lorsque le matériel roulant est équipé du système **ERTMS/ETCS** et que le sol est doté du système national. Les transmissions des données sont effectuées par le système national. Elles sont ensuite interprétées et transformées par le sous-système embarqué **ETCS**.
- le niveau 0. Dans ce niveau, le système **ERTMS/ETCS** n'est pas opérationnel, seul le contrôle de la vitesse est actif. Il est utilisé sur des lignes sans équipement **ETCS** ou nationales. Le niveau 0 a été défini pour s'assurer que les transitions entre lignes équipées et lignes non équipées sont correctes.
- le niveau 1. Il est conçu pour la migration des systèmes existants vers **ETCS**. A ce niveau, le système **ERTMS/ETCS** se superpose au système sol existant. La détection de la présence du train est assurée par le **CDV** (Circuits De Voie) (*figure 4.5*).

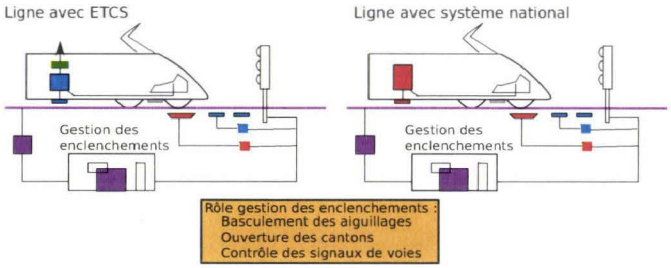


Figure 4.5 – ERTMS niveau 1 [Winter 2009]

- le niveau 2. Il est utilisé pour la création des nouvelles lignes. Les **CDV** sont toujours présents. A ce niveau, les données ne sont plus transmises par les balises mais par une communication sans fil basée sur le standard **GSM** (Global System for Mobile communication) (*figure 4.6*).
- le niveau 3. Il est toujours à l'état d'étude. Dans ce niveau, la position des trains sera déterminée par le train lui-même ce qui permettra d'abolir les cantons fixes

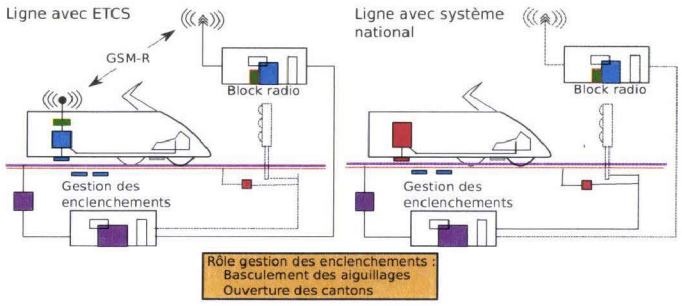


Figure 4.6 – ERTMS niveau 2 [Winter 2009]

au profit des cantons mobiles.

Le passage d'un niveau à un autre est soumis à des conditions définies dans le subset 26 [European Railway Agency 2008].

À ces différents niveaux se superposent des modes d'exploitation. Un mode représente un degré d'automatisation dans la conduite. Les cinq modes utilisés par l'expérimentation sont décrits ci-après [Legrand 2010] :

- **FS** (Full Supervision). Ce mode est actif lorsque toutes les informations de bord et de sol sont disponibles en phase de fonctionnement normal. Le **DMI** retranscrit alors au conducteur l'ensemble des informations,
- **OS** (On Sight). Ce mode est utilisé lorsque le train entre dans un canton alors qu'un autre train est potentiellement présent. L'opérateur de conduite réalise une marche à vue. Il est responsable de l'intégrité du train sous certaines conditions définies dans les procédures spécifiques,
- **TR** (TRip). Ce mode apparaît lorsqu'un freinage d'urgence survient, par exemple en cas de dépassement de vitesse autorisée. Il mène à l'arrêt du train. Le conducteur doit appliquer une procédure afin de pourvoir redémarrer,
- **NP** (No Power). Ce mode signifie que l'équipement de bord n'est pas alimenté,
- **SB** (Stand By). Il est actif lorsque l'équipement de bord démarre et effectue ses tests.

L'ensemble des conditions nécessaires aux changements de modes est décrit dans l'annexe 4. Le passage du mode **FS** au mode **OS** est soumis à certaines conditions. Celles-ci sont présentées dans la figure 4.7.

Les principales informations concernant le système ERTMS ont été présentées. La partie suivante décrit la plate-forme ERTMS.

4.2.2 Présentation de la plate-forme ERTMS

L'unité de recherche **ESTAS** de l'**IFSTTAR** s'est dotée une plate-forme **ERTMS** financée par l'**IFSTTAR**, le fonds FEDER et la région Nord-Pas-de-Calais. Elle est

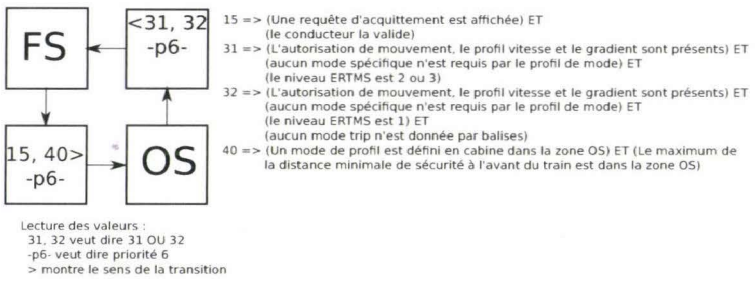


Figure 4.7 – Modalité de changement de mode [European Railway Agency 2008]

constituée d'un module de gestion de trafic, d'un module de conduite et d'un module 3D dont l'architecture fonctionnelle est présentée figure *4.8*.

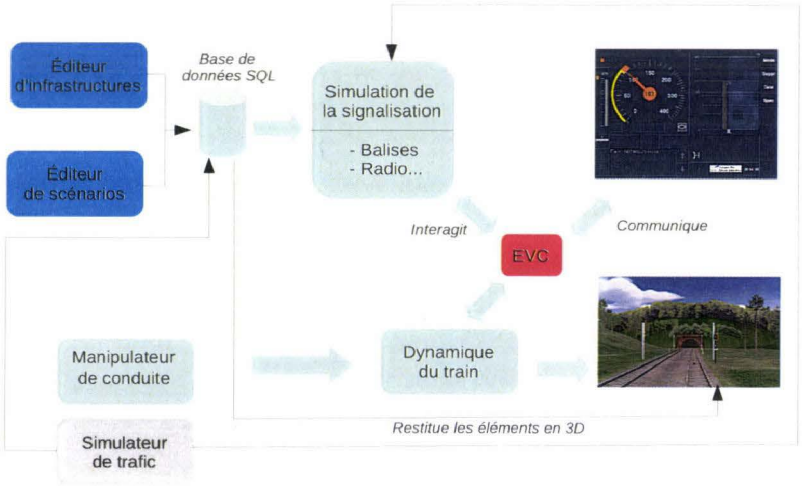


Figure 4.8 – Architecture de la plate-forme ERTMS de l'IFSTTAR

Les principaux objectifs de la plate-forme sont :
- d'optimiser la gestion de trafic,
- à terme, de certifier des matériels et logiciels réels dans un environnement virtuel,
- d'expérimenter des situations de conduite dans le cadre **ERTMS** pour différentes configurations de matériels roulants,
- de former le personnel et de maintenir leurs connaissances.

Les expérimentations se sont déroulées sur cette plate-forme. La figure *4.9* présente une vue de l'implantation de ces équipements **ETCS**.

Ces derniers se composent de :
- un **DMI** sur écran tactile. Il permet de conduire un train en mode manuel,
- une restitution 3D de l'environnement,
- une station de surveillance de la voie,

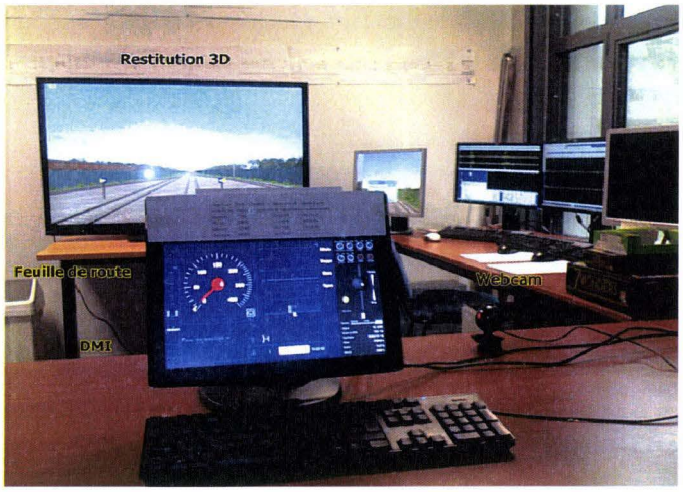


Figure 4.9 – Vue de la plate-forme ERTMS de l'IFSTTAR

- un poste de gestion de l'infrastructure (basculement d'aiguillages, ouverture de voies, *etc.*).

Après cette présentation du contexte de la campagne expérimentale, nous en décrivons maintenant les modalités pratiques en termes d'objectifs, de scénarios, de sujets et de passations.

4.3 Présentation de la campagne expérimentale

Le chapitre 3 a essentiellement présenté des algorithmes de détection de la stabilité humaine, la campagne expérimentale vise à éprouver ces algorithmes dans le cadre des transports guidés. Celle-ci se focalise sur la conduite qui est une problématique actuelle notamment pour les constructeurs et exploitants (**RFF**, Bombardier par exemple). Le choix d'**ERTMS/ETCS** est lié à une problématique actuelle des concepteurs et exploitants de système ferroviaire. En effet, l'opérateur humain est peu pris en compte dans les spécifications du système **ERTMS**. Les études, qui ont contribué à la naissance de ce système, se sont focalisées sur la partie technique du système en oblitérant un chaînon important : l'opérateur humain. Aujourd'hui, des projets liés à l'étude du comportement humain dans le contexte **ERTMS/ETCS** et plus particulièrement à la problématique de la superposition de deux systèmes de contrôle commande différents (**ERTMS/ETCS** et système national) voient le jour notamment chez RFF et EuroTunnel.

Après avoir exposé les objectifs de la campagne, ce paragraphe présente les scénarios, la population et les modalités de passation de l'expérimentation.

4.3.1 Objectifs de la campagne expérimentale

Le chapitre 3 a présenté l'essentiel de nos apports théoriques. :

- la surveillance des états de la stabilité et des changements d'état, concernant la stabilité de l'opérateur humain,
- l'identification de certaines situations critiques relatives à l'opérateur humain et leurs impacts sur le système.

L'objectif de ce scénario est d'identifier les états de stabilité en conditions normales. Ensuite, un travail de mise en corrélation des évènements dangereux, liés à des erreurs humaines, est mis en œuvre. L'objectif est d'associer des risques potentiels à des états de stabilité ou des transitions entre états.

L'ensemble de ces évènements est centré sur l'étude des critères souhaités. Ils sont au nombre de trois :

- le respect de la consigne vitesse,
- le confort des passagers (force de l'accélération/décélération),
- la qualité de service (respect des horaires).

La section suivante présente les scénarios tels qu'ils ont été conçus.

4.3.2 Les scénarios de l'expérimentation

La campagne expérimentale a porté sur deux scénarios complémentaires. Le premier est un scénario non perturbé. Il permet, essentiellement, de familiariser le sujet au contexte de conduite **ERTMS/ETCS**, à la plate-forme. Le second scénario confronte le sujet à des évènements perturbateurs de type régulier. Ces deux scénarios sont en accord avec les objectifs visés.

La vue 3D étant figée, les scénarios se basent sur une voie pré-existante. Néanmoins, il a été nécessaire de configurer cette voie par :

- le placement des balises,
- le contenu des balises pour permettre aux conducteurs d'avoir l'ensemble des informations nécessaires à la conduite tels que la vitesse autorisée, les changements de niveaux et de modes...
- le placement des trains afin d'interagir avec le trafic sur la voie
- le placement de la signalisation extérieure pour les modes **ERTMS/ETCS** nécessitant cette signalisation.

4.3.2.1 Caractéristiques du scénario non perturbé

Ce scénario décrit un cycle de conduite en fonctionnement normal. En complément des objectifs cités dans la section 4.3.1., il permet :

- d'immerger progressivement le sujet dans l'environnement de la plate-forme et de le familiariser avec les équipements,
- de mettre l'accent sur un ou plusieurs critères ou objectifs de conduite de façon non concurrente comme la qualité de service ou le confort des passagers.

Les principales caractéristiques du scénario non perturbé sont fournies par le tableau *4.1* :

Tableau 4.1 – *Caractéristiques du scénario sans perturbation*

Longueur	58 km
Nombre de trains	2
Nombre d'arrêts en gare	4
Niveau **ETCS**	niveau 2
Mode d'exploitation	**FS**
Zones spéciales	Néant
Conditions climatiques	Ciel dégagé

4.3.2.2 Caractéristiques du scénario perturbé

Ce scénario possède les mêmes objectifs que le premier à la différence que des perturbations sont présentes. Il vise à identifier les états de stabilité permettant de détecter les perturbations régulières et d'en associer les risques.

Plusieurs perturbations ont été définies. Le tableau *4.2* présente ces différentes perturbations en liaison avec le comportement attendu au regard de la stabilité humaine. Les figures *4.10*, *4.11* et *4.12* positionnent les perturbations sur la ligne fournie en annexe 5 :

Tableau 4.2 – *Liste des perturbations*

Perturbation	Code	Procédure à appliquer	Impact attendu sur la stabilité humaine
Dissonance cognitive avec signal fermé et niveau 2 **ERTMS/ETCS** (*figure 4.10*)	DF	Pas d'arrêt au signal attendu puisque niveau 2	En cas de dissonance cognitive rupture de stabilité attendue, sinon conservation de l'état de stabilité
Zone de travaux	ZT	Vitesse de passage limitée à 40km/h	Changement d'état de stabilité
Continue sur la page suivante			

Tableau 4.2 Liste des perturbations – Suite

Perturbation	Code	Procédure à appliquer	Impact attendu sur la stabilité humaine
Changement de niveau 2 vers 0 (*figure 4.11*)	CN2-0	Le conducteur est prévenu avant le changement de niveau. Il doit alors adapter sa vitesse afin d'arriver en dessous de 90km/h lors du changement effectif de niveau. Un message lui est transmis pour le prévenir du changement imminent de niveau	Changement d'état de stabilité
Changement de niveau 0 vers 2 (*figure 4.11*)	CN0-2	La procédure est similaire à celle code CN2-0. À la différence du changement de niveau précédent, le conducteur doit acquitter ce message dans un temps imparti. Si le message n'est pas acquitté, un freinage d'urgence est enclenché. Une fois le message acquitté, le changement de niveau est effectif	Changement d'état de stabilité
Changement de niveau 2 vers 1 (*figure 4.12*)	CN2-1	La procédure est similaire à celle code CN0-2. La vitesse maximale est de 50km/h. Le conducteur doit donc adapter sa vitesse et respecter la signalisation extérieure.	Changement d'état de stabilité
Changement de mode **FS** vers **OS** (*figure 4.12*)	CM	Respecter la signalisation extérieure. En cas de signal fermé, s'arrêter et demander au **PCC** (Poste de Contrôle Commande) l'autorisation de franchir le signal. Doit maintenir l'intégrité de son train et contrôler sa vitesse	Changement d'états de stabilité

L'ensemble de la voie est fournie en annexe 5.

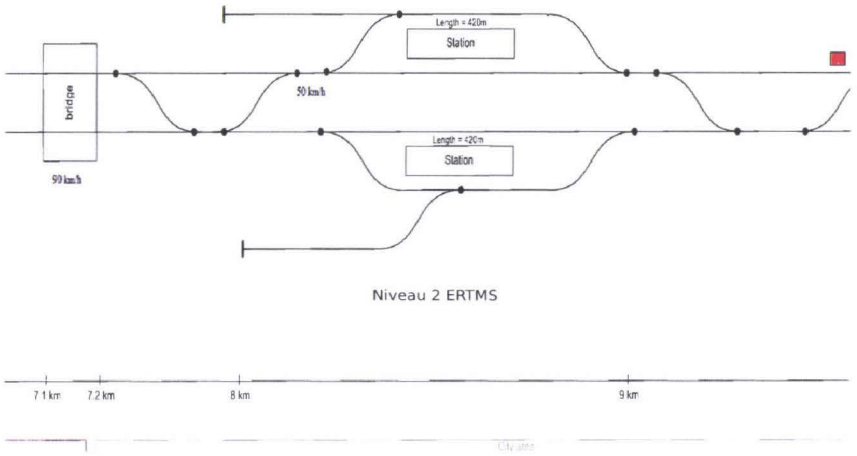


Figure 4.10 – Zone de dissonance cognitive par signal fermé

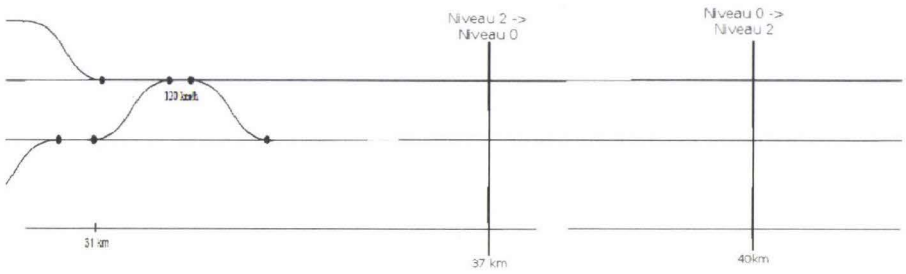


Figure 4.11 – Zone de changement de niveau

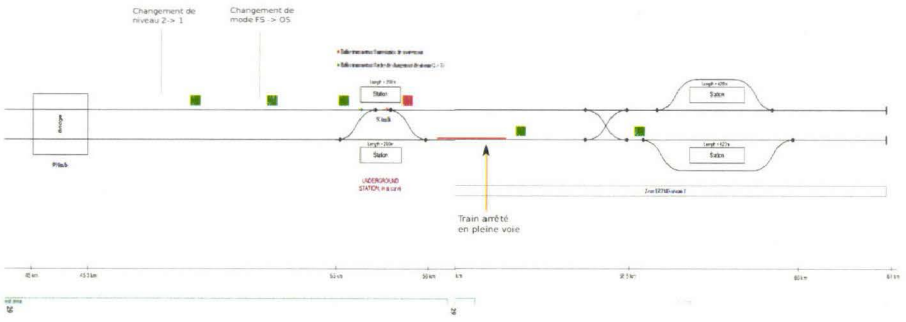


Figure 4.12 – Zone de conduite à vue

La présence de ces perturbations permet d'étudier la stabilité face à des perturbations régulières. En effet, toutes ces perturbations ont été prises en compte dans les spécification du système **ERTMS/ETCS**. Les procédures nécessaires face à ces évènements ont été stipulées aux sujets lors de la présentation du système **ERTMS** et du poste de conduite.

Afin de perturber plus fortement les sujets, les conditions météorologiques (neige) diminuent

la visibilité. De plus, le train circule de nuit.
Les principales caractéristiques du scénario perturbé sont reprises dans le tableau *4.3*.

Tableau 4.3 – *Caractéristiques du scénario avec perturbation*

Longueur	58 km
Nombre de trains	4
Nombre d'arrêts en gare	4
Niveaux **ETCS**	0, 1 et 2
Modes	**FS** et **OS**
Zones spéciales	Zone de travaux
Météorologie	Neige

4.3.2.3 Zone de danger de la stabilité humaine

Le tableau *4.4* reprend les différents états et changements d'état auxquels nous associons un risque potentiel. Les états et changements d'état considérés comme dangereux sont affichés en rouge et ceux considérés comme non risqués en vert.

Tableau 4.4 – *Nature des états et changements d'état et leurs risques envisagés*

Système et/ou environnement	Nature des états et changements d'état relatif à la stabilité humaine
Non perturbé	ES
	T saut
	T rupture
	EI
Perturbé	ES
	T saut
	T rupture
	EI

A priori, lors de la conduite du système ferroviaire en mode normal, les états stables sont considérés comme normaux, ne présentant pas de risques. Les transitions de type sauts sont également perçues comme ne présentant pas de risques. En effet, elles permettent le passage d'état stable à un autre état stable ce qui est parfaitement normal en cas de changement de vitesse consigne par exemple. Par contre, les états instables et les changements d'état de type rupture paraissent dangereux. Ce type de nature relatif à la stabilité humaine implique que l'état perturbé de la conduite est dû à l'opérateur humain (par exemple, la fatigue, l'inattention ou le stress) et est donc dangereux pour la sécurité du système. Dans le cadre d'un environnement

ou système perturbé, les états stables sont considérés comme risqués puisqu'ils impliquent qu'à l'occurrence de la perturbation, l'opérateur humain reste dans le même qu'avant cette occurrence. L'état instable est lui aussi considéré comme dangereux car il implique que l'opérateur humain n'arrive pas à stabiliser la situation perturbée et cela peut entraîner un risque d'incident ou d'accident. Par contre, dans ce contexte de conduite, les sauts et les ruptures sont considérés comme peu dangereux. Elles indiquent que l'opérateur humain a réagi.

4.3.3 La population

La population est représentée par 10 sujets. Les sujets ont été classés par tranche d'âge (cf. *tableau 4.5*), par la proportion homme/femme et par leur niveau de connaissance des systèmes ferroviaires (cf. *tableau 4.6*) :

- aucune connaissance de système de contrôle-commande ferroviaire
- connaissance de système de contrôle-commande ferroviaire autre que **ERTMS/ETCS**
- connaissance du système **ERTMS/ETCS**

Nous n'avons malheureusement pas pu profiter de l'expérience de conducteurs professionnels afin d'enrichir le panel, pour des raisons de disponibilité. Sur les 10 sujets, la proportion d'hommes est de 70%, celle de femmes est donc 30%. Les sujets sont catégorisés par tranche d'âge.

Tableau 4.5 – *Répartition des sujets par tranches d'âge*

Tranche d'âge	nombre de sujets
18 - 20 ans	0
20 - 30 ans	6
30 - 40 ans	4
40 - 50 ans	0

Tableau 4.6 – *Répartition des sujets par niveau de connaissance*

Niveau de connaissance de systèmes contrôle/commande	nombre de sujets
Aucune	6
Autre qu'**ERTMS/ETCS**	1
ERTMS/ETCS	3

4.3.4 Le déroulement des passations

La passation d'un sujet est divisée en plusieurs étapes. La première consiste en une formation au système **ERTMS/ETCS** et à l'interface de conduite. La seconde consiste en la passation elle-même. Elle est divisée en deux temps. Après chaque passation un de-briefing est effectué afin de connaître l'interprétation par les sujets des différents évènements relevés.

4.3.4.1 Briefing

Le briefing dure environ 15 minutes. Il consiste en une formation théorique d'**ERTMS/ETCS** et de la plate-forme. Les différents éléments composant l'interface de conduite sont présentés ainsi que leur fonctionnement. L'ensemble des procédures nécessaires aux différents évènements pouvant être rencontrés est fourni. Le sujet est ensuite invité à commencer l'expérimentation.

- respecter les consignes de vitesse fournies par le système **ERTMS/ETCS**. Ces informations sont fournies sur le **DMI** (*figure 4.13*),

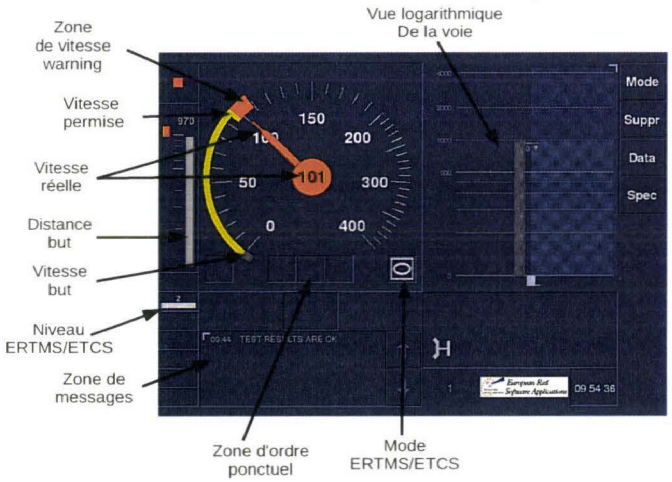


Figure 4.13 – *Vue du DMI de la plateforme*

- assurer la qualité de service par un respect des horaires d'arrivée et de départ en gare
- rester à quai suffisamment longtemps pour que les « voyageurs » puissent descendre et monter.
- assurer le confort des voyageurs en n'effectuant pas d'accélérations/décélérations brutales.

4.3.4.2 Passation

Elle est divisée en deux étapes. Avant d'entrer dans la première étape, le sujet doit remplir un questionnaire. Son rôle est de permettre de catégoriser les sujets en fonction de leur sexe, de leur âge mais aussi de leur niveau de connaissance du domaine ferroviaire et **ERTMS/ETCS**. Il permet aussi de savoir si le sujet a déjà été amené à participer à des expérimentations sur une plate-forme.

Ensuite la première étape (scénario sans perturbation) débute. Elle dure environ 45 minutes et a deux objectifs. Le premier est de familiariser l'opérateur avec le système, le deuxième d'étudier la stabilité humaine en mode normal sans perturbation. À la fin de ce scénario, le sujet est soumis à un de-briefing et est invité à remplir le questionnaire post-expérimentation.Cela permet de se renseigner sur l'état de fatigue du sujet, son sentiment sur le déroulement de la simulation...

La passation se poursuit, peu de temps après (deux jours maximum) par le scénario avec perturbations. Sa durée est de 55 minutes environ. Le but est d'étudier la stabilité humaine face, non plus exclusivement à des évènements normaux mais aussi face à l'occurrence de perturbations connues, présentées dans la partie 4.2.1. De même que pour le premier scénario, un de-briefing est effectué à la fin de la simulation et le sujet est invité, de nouveau, à remplir le questionnaire post-expérimentation.

4.3.4.3 De-briefing

Le de-briefing a lieu à chaque fin de passation. Durant la simulation, des notes, « time-codées », sont prises. Elles permettent de retracer l'ensemble des évènements survenus durant la simulation mais surtout d'analyser le comportement de l'opérateur humain. L'objectif du de-briefing est de savoir pourquoi le sujet a eu tel comportement face à tel évènement. L'objectif est de pouvoir ensuite associer les erreurs humaines recensées en rapport avec les niveaux de stabilité détectés.

4.4 Pré-traitement des données expérimentales

L'ensemble des données récoltées nécessite un traitement afin d'être exploitable. La première manipulation consiste à reformater les fichiers obtenus sur la plate-forme.

4.4.1 Présentation des données obtenues

4.4.1.1 Formatage du fichier de données

Les données obtenues sont enregistrées par la plate-forme. Elle se présentent sous la forme d'un fichier « .dat » dont la figure *4.14* propose un extrait.

```
(48.59 s, -0.02 m) - SPEED - front end location = 0 m, train speed = 0 km/h (P = 3 km/h, W = 4 km/h, SBI = 5 km/h, EBI = 8 km/h)
(48.59 s, -0.02 m) - TARGET - 28 m, 0 km/h, IP = -32 m
(48.59 s, -0.02 m) - EOA - 28m, 0km/h
(49.51 s, -0.02 m) - SPEED - front end location = 0 m, train speed = 0 km/h (P = 3 km/h, W = 4 km/h, SBI = 5 km/h, EBI = 8 km/h)
(49.51 s, -0.02 m) - TARGET - 28 m, 0 km/h, IP = -32 m
(49.51 s, -0.02 m) - EOA - 28m, 0km/h
(50.53 s, -0.02 m) - SPEED - front end location = 0 m, train speed = 0 km/h (P = 3 km/h, W = 4 km/h, SBI = 5 km/h, EBI = 8 km/h)
(50.53 s, -0.02 m) - TARGET - 28 m, 0 km/h, IP = -32 m
(50.53 s, -0.02 m) - EOA - 28m, 0km/h
(51.55 s, -0.02 m) - SPEED - front end location = 0 m, train speed = 0 km/h (P = 3 km/h, W = 4 km/h, SBI = 5 km/h, EBI = 8 km/h)
(51.55 s, -0.02 m) - TARGET - 28 m, 0 km/h, IP = -32 m
(51.55 s, -0.02 m) - EOA - 28m, 0km/h
```

Figure 4.14 – *Extrait des données du fichier .dat de la plate-forme ERTMS*

Certaines données ne sont pas utiles et, pour faciliter leur traitement, un formatage de ce fichier est effectué. Il vise à ne conserver que les données utiles et à les positionner en colonne.

Les données conservées sont :

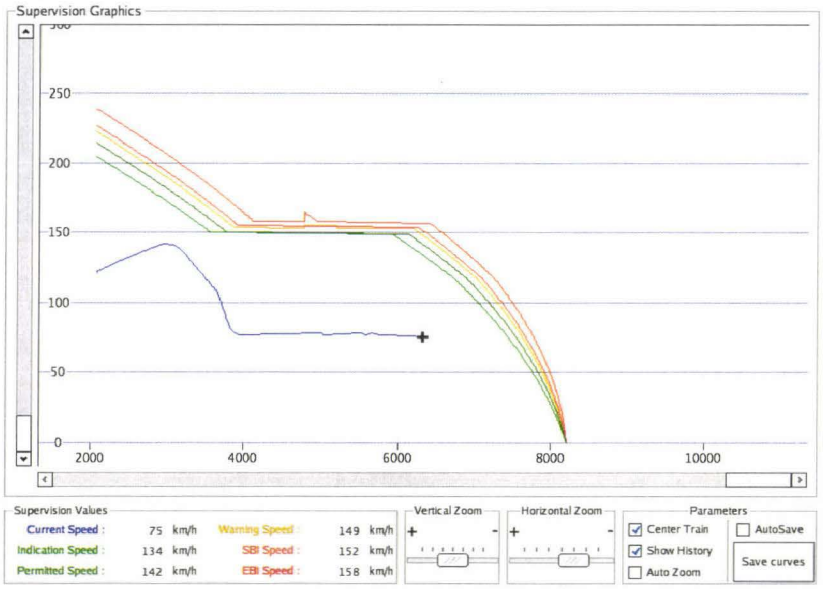


Figure 4.15 – *Courbes de vitesse consigne du système ERTMS/ETCS*

- les différentes vitesses. Ces vitesses sont définies par des courbes de vitesses qui ne doivent pas être franchies, comme l'illustre la figure *4.15* :
  - vitesse réelle. Elle caractérise la vitesse de circulation du train,
  - vitesse **P** (Permitted). Elle représente la vitesse maximale autorisée,
  - vitesse **W** (Warning). Il s'agit de la vitesse Warning. Lorsque cette limite est dépassée, une alarme visuelle et sonore est déclenchée afin de permettre à l'opérateur humain de revenir sous la vitesse P,
  - vitesse **SBI** (Service Break Intervention). Au delà de cette vitesse, un freinage de service est automatiquement enclenché,
  - vitesse **EBI** (Emergency Break Intervention). En cas de dépassement, un freinage d'urgence est enclenché.

- l'accélération et la décélération du train. Elles permettent de quantifier le confort des passagers. En effet, des accélérations ou des décélérations trop brutales sont à proscrire. Ceci entraîne une perte de confort. Cette donnée n'est pas disponible et nécessite un calcul suivant l'équation *4.1* :

$$a = (V_1 - V_0)/t \tag{4.1}$$

  où V_1 représente la vitesse actuelle, V_0 la vitesse précédente et t le temps nécessaire pour passer de V_0 à V_1. Une conversion d'unité est aussi nécessaire afin d'avoir V_1 et V_0 en $m.s^{-1}$ et t le temps en s.
- la qualité de service qui est définie en fonction du respect des horaires. Un calcul est aussi nécessaire pour avoir en continu le respect de l'horaire. En effet, le système **ERTMS/ETCS** calcule des courbes de vitesse qui permettent l'arrivée en gare. Si le conducteur maintient son horaire, il doit être proche de cette courbe.

4.4.1.2 Récupération des données étudiées

La première étape nécessaire à l'identification des états de stabilité est la récupération des différentes informations des critères que l'on souhaite étudier. Dans le cas de la vitesse, par exemple, il est nécessaire de récupérer les courbes des différentes vitesses de contrôle **P**, **W**, **SBI** et **EBI**. Ces données sont disponibles dans le fichier source « .dat » et sont prises en compte dans le fichier reformaté. On obtient alors les courbes présentés sur les figures *4.16* et *4.17*. Les courbes de vitesses de contrôles sont identiques pour tous les sujets puisque calculées par le système **ERTMS/ETCS**. Grâce à ces courbes, il est maintenant possible d'obtenir l'écart entre

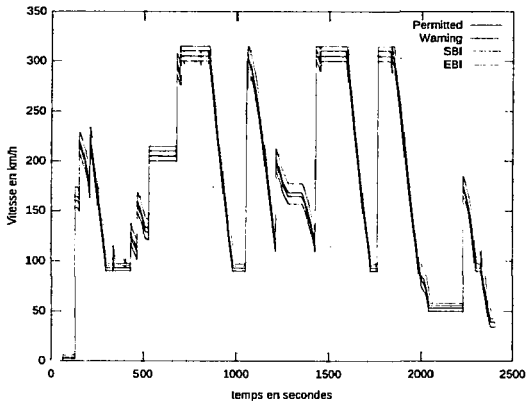


Figure 4.16 – *Ensemble des courbes de contrôle du scénario sans perturbation*

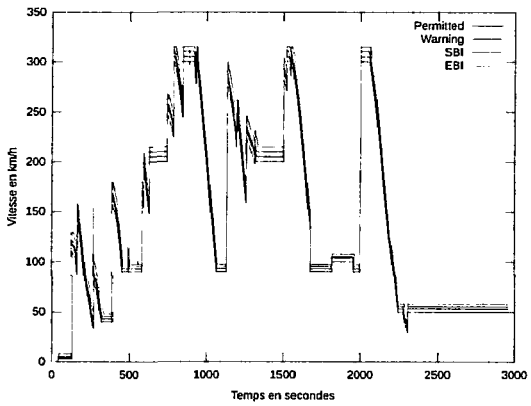


Figure 4.17 – *Ensemble des courbes de contrôle du scénario avec perturbations*

la vitesse permise (**P**) et la vitesse réelle (*figures 4.18, 4.19*).

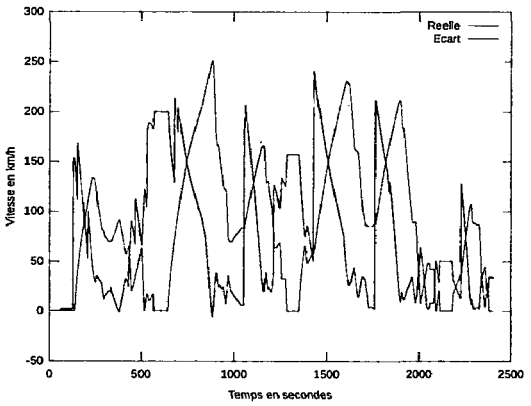


Figure 4.18 – *Écart entre la vitesse permise et la vitesse réelle, scénario sans perturbation*

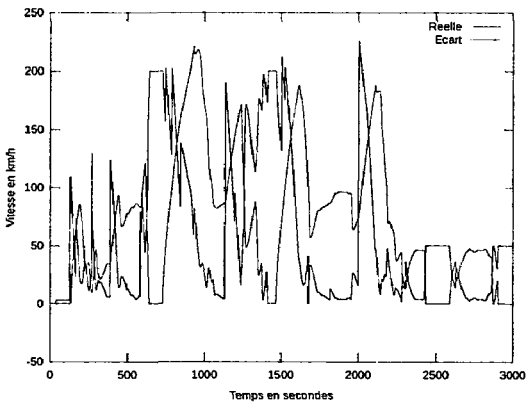


Figure 4.19 – *Écart entre la vitesse permise et la vitesse réelle, scénario avec perturbations*

Le deuxième critère est lui aussi obtenu après le calcul d'accélération ou décélération. On obtient alors, par exemple, les courbes d'accélération (cf. *4.20 et 4.21*).

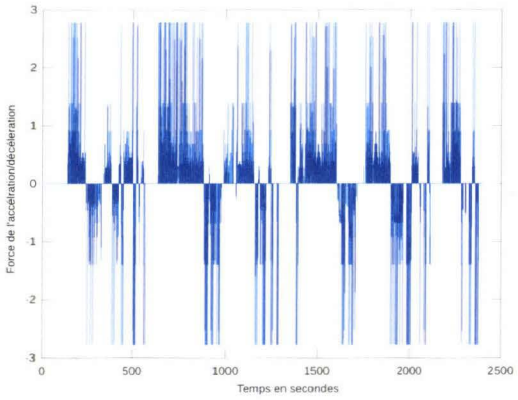


Figure 4.20 – *Exemple de courbe d'accélération/décélération sur le scénario sans perturbation*

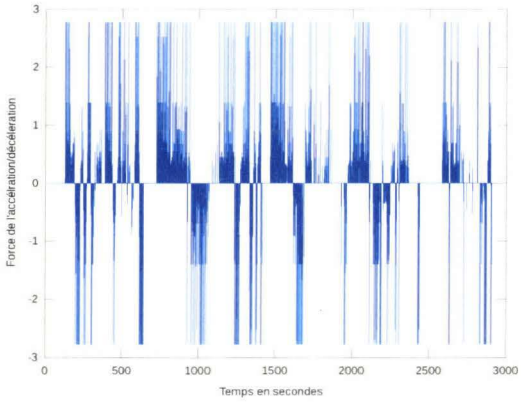


Figure 4.21 – *Exemple de courbe d'accélération/décélération sur le scénario avec perturbations*

L'ensemble de ces données sont extrinsèques à l'opérateur. Le choix a été fait de se concentrer sur ce type de données car elles sont plus facilement observables et permettent d'obtenir de façon indirecte, l'état de l'opérateur humain. En effet, les données intrinsèques nécessitent un équipement lourd, difficilement implémentable tels que des cardiogrammes, électroencéphalogrammes, *etc.*.

4.5 Conclusion

Ce chapitre a décrit la campagne expérimentale de validation de la détection de la stabilité humaine. Le système **ERTMS/ETCS** au cœur de l'expérimentation a été présenté afin de positionner le contexte de la validation. Les différents protocoles sur lesquels la stabilité humaine va être évaluée ont été exposés. Ils couvrent à la fois les conditions normales et les conditions de conduite face à des évènements perturbateurs réguliers. La population qui a participé à cette expérimentation a été classifiée en fonction de l'âge, du sexe et des compétences dans le domaine ferroviaire. Des résultats généraux ont été donnés afin de présenter les différentes étapes nécessaires pour y parvenir. Le chapitre suivant donne les résultats de la campagne expérimentale en terme de détection des états de stabilité et des transitions entre ces états mais aussi des risques associés à ces états et transitions.

CHAPITRE 5

Résultats expérimentaux et perspectives de recherche

Table des matières

5.1 Introduction 85
5.2 Analyse et synthèse des résultats 86
5.2.1 Analyse du scénario sans perturbation 87
5.2.1.1 Analyse temporelle du critère « vitesse » 87
5.2.1.2 Analyse temporelle du critère « confort des passagers » . 88
5.2.1.3 Analyse temporelle du critère « qualité de service » . . . 90
5.2.2 Analyse du scénario avec perturbations 90
5.2.2.1 Étude de la stabilité humaine par l'algorithme AT 91
5.2.2.2 Étude de la stabilité humaine par l'algorithme AS 93
5.2.3 Synthèse des résultats de la campagne expérimentale 113
5.2.3.1 Observations durant l'expérimentation 113
5.2.3.2 Synthèse de la nature des états et changements d'état de la stabilité humaine face aux perturbations 113
5.3 Perspectives de valorisation de la stabilité humaine 120
5.3.1 Prise en compte des signatures de la stabilité humaine 120
5.3.2 Le contrôle de la stabilité en ligne 121
5.3.3 Extension de la stabilité aux systèmes homme-machine 121
5.3.4 De nouveaux critères d'évaluation de la stabilité humaine 122
5.3.5 L'étude multi-critère 124
5.3.5.1 Approche par pondération de critères 124
5.3.5.2 Approche multi-objectif 124
5.4 Conclusion 125

5.1 Introduction

Le chapitre précédent a présenté un protocole expérimental d'évaluation de nos travaux appliqué aux transports guidés. Selon ce protocole, une campagne expérimentale a porté sur un échantillon de 10 sujets. De cette expérimentation résultent plusieurs fichiers de données importants, indexés chronologiquement. Le formatage de ces fichiers, détaillé dans le chapitre

4, nous a permis d'exploiter les algorithmes AT et AS sur les données issues des deux scénarios (sans et avec perturbations) du protocole. Le présent chapitre analyse et tire les enseignements des résultats obtenus. Il présente aussi les perspectives de recherche soulevées par ces résultats.

L'analyse des résultats débute sur le scénario sans perturbation. Elle montre la capacité de l'algorithme AT à détecter la nature des états et changements d'état de la stabilité humaine selon trois critères. Elle se poursuit par le scénario avec perturbations. Nous illustrons l'application de l'algorithme AT sur différents critères et différentes perturbations. Nous nous appuyons sur la codification des perturbations évoquée dans le tableau 4.2. L'analyse s'achève par l'exploitation de l'algorithme AS selon une démarche similaire. Enfin, la partie se termine par la synthèse des enseignements encourageants tirés de ces analyses.
À la lumière de ces enseignements, la seconde partie recense les principales perspectives de recherche : application en ligne des algorithmes de stabilité humaine, extension aux systèmes homme-machine, modèle de prise en compte des signatures de stabilité humaine. L'ensemble de ces perspectives s'inscrit dans une volonté d'intégrer l'opérateur humain aux études de sécurité globale.

5.2 Analyse et synthèse des résultats

Étant donné la relative basse fréquence des signaux étudiés, c'est l'algorithme AT qui a été appliqué aux données plutôt que l'algorithme AF adapté aux signaux haute fréquence. La première section se focalise sur le scénario sans perturbation, la seconde partie sur le scénario avec perturbations. L'étude est dans un premier temps effectuée en utilisant l'algorithme AT. Pour le scénario avec perturbations, elle est complétée par l'utilisation de l'algorithme AS afin d'identifier des séquences de stabilité pour les perturbations rencontrées au cours de ce scénario. L'analyse des résultats suit différentes étapes présentées dans la figure *5.1*.

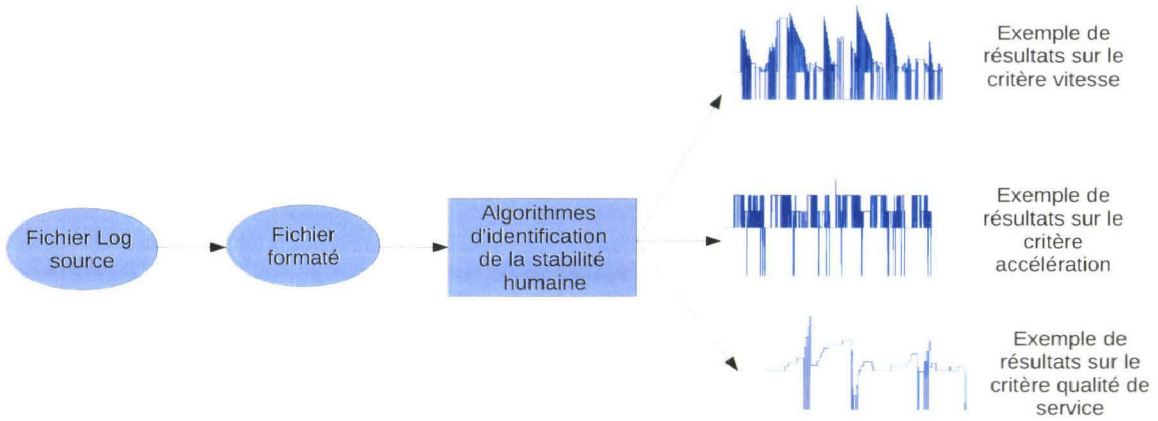


Figure 5.1 – Étapes de l'analyse des données par les algorithmes de la stabilité humaine

Le fichier de données sources est reformaté afin d'extraire les données utiles à l'étude des différents critères (vitesse, confort des passagers et qualité de service) comme présenté dans la section 4.4. Ensuite, les données de ce fichier sont traitées par les algorithmes d'identification de la

stabilité humaine. Cette procédure est répétée pour chaque critère étudié de manière individuel. Suite à ce traitement par les algorithmes, les états et changements d'état de la stabilité humaine sont identifiés. Dans le cadre du scénario avec perturbations, cette étude est effectuée autour de chaque perturbation.

5.2.1 Analyse du scénario sans perturbation

Avant d'analyser les résultats liés à l'exploitation de l'algorithme AT, il a été nécessaire de calibrer les différents cœfficients α_1, α_2, β_1, β_2, γ_1 et γ_2. Cette calibration s'est faite de manière empirique sur le scénario sans perturbation. En effet, pour certaines situations, il est possible au préablable de connaître les états et changements d'état nécessaires au succès de la tâche. Par exemple, lors d'un changement de vitesse consigne, nous devions observés le passage d'un état stable à un autre état stable. Par essais successifs, les cœfficients ont donc été calibrés de manière à obtenir ces différents états et changements d'état attendus. Une fois cette calibration effectuée, les cœfficients sont utilisés pour l'ensemble de la campagne expérimentale.

5.2.1.1 Analyse temporelle du critère « vitesse »

L'application de l'algorithme AT sur le critère « vitesse » permet d'identifier la nature des états et changements d'état de la stabilité humaine. Les figures *5.2 et 5.3* présentent les natures de la stabilité humaine sous forme de graphes d'état pour les sujet 1 et 2. L'ensemble des courbes est fournie en annexe 6.Les états de stabilité sont positionnés au-dessus de 0. Chaque plateau horizontal représente un état stable. Si le plateau est positionné à 100, ceci signifie que la stabilité sur le critère « vitesse » est autour de 100. S'il est positionné à 200, ceci signifie que la stabilité sur ce critère est autour de 200. On parle de niveaux de stabilité (cf. *sections 3.3.2 et 3.4.3*). Les états instables sont représentés, par convention, par des paliers situé à -100. Entre ces différents plateaux, on identifie les changements d'état. Cette représentation est utilisé dans toute l'analyse des résultats pour le critère « vitesse ».

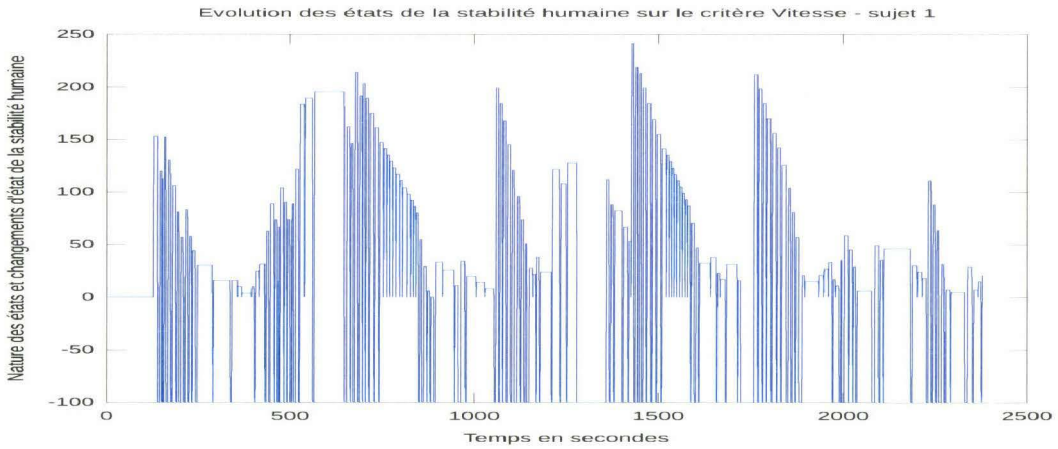


Figure 5.2 – États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » - sujet 1

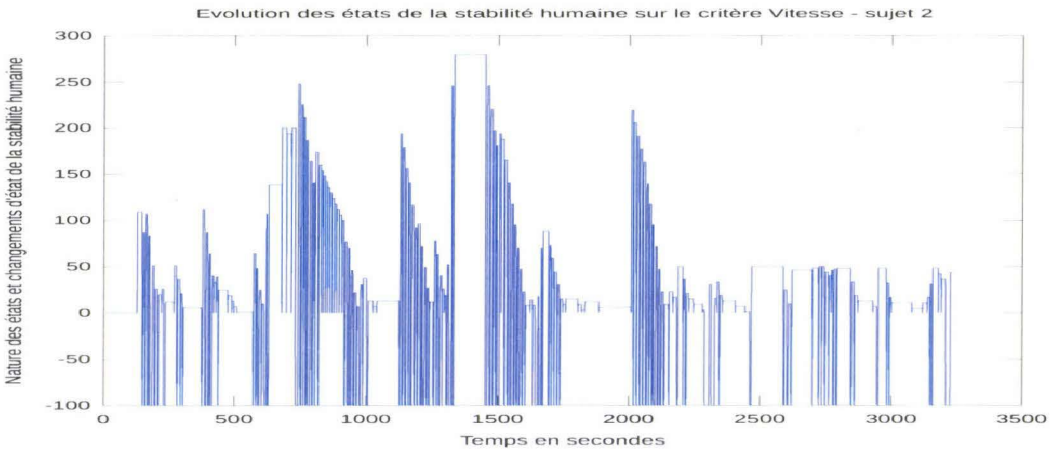


Figure 5.3 – États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » - sujet 2

En regardant ces courbes, on constate des comportements similaires sur la gestion de la vitesse dans certaines zones. Par exemple, si on se place entre 600 et 1000 secondes, les formes des états de stabilité sont proches pour les deux sujets. Ceci signifie qu'ils ont gérés leur vitesse de manière similaire dans cette zone. À partir de 1500 secondes, la gestion de la vitesse commence à différer. Ceci explique l'écart de temps d'arrivée en gare terminus du sujet 1 (environ 2400 secondes après le début de la simulation) et le sujet 2 (environ 3250 secondes).

On remarque que les échelles de temps sont différents pour les deux sujets représentés par ces courbes. Cette différence est liée à la façon dont le conducteur a parcouru la voie. En effet, en fonction de son respect des consignes de vitesse, le temps nécessaire pour parcourir l'ensemble de la voie n'est pas identique pour chaque sujet.

L'application de l'algorithme AT sur le critère « vitesse » permet la détection et l'identification de la nature des états et changements d'état de la stabilité humaine. Les états de stabilité sont représentés par des « plateaux » dont les valeurs sont bornées sur l'intervalle [0,300], les états d'instabilité sont placés à la valeur -100 et les changements d'état sont identifiés par le passage d'un état à un autre. Lorsque l'on passe d'un état stable à un autre état stable, la transition « saut » est identifiée. En cas de passage d'un état instable à un état stable ou *vice versa*, la transition « rupture » est identifiée. Dans les deux cas, cette identification ne peut être effectuée qu'*a posteriori*, c'est-à-dire lorsque la nature de l'état suivant le changement d'état est connue.

5.2.1.2 Analyse temporelle du critère « confort des passagers »

En se basant sur les données présentées dans l'annexe 2 de [Robert 2006], les différents niveaux de confort des passagers ont été fixés de la façon suivante :

- accélération/décélération inférieure à 0,6m.s^{-1}, confort optimal,
- accélération/décélération comprise entre 0,6m.s^{-1} et 1m.s^{-1}, confort assuré,
- accélération/décélération supérieure à 1m.s^{-1}, inconfort.

Les figures *5.4 et 5.5* présentent les résultats du traitement par l'algorithme AT. Dans ces figures, comme dans la suite de l'analyse des résultats pour le critère « confort des passagers », les états de stabilité sont représentés par des « plateaux » situés entre -30 et 30. La valeur correspondante aux plateaux définit le niveau de l'état de stabilité. Les changements d'état sont représentés par les passages entre ces plateaux.

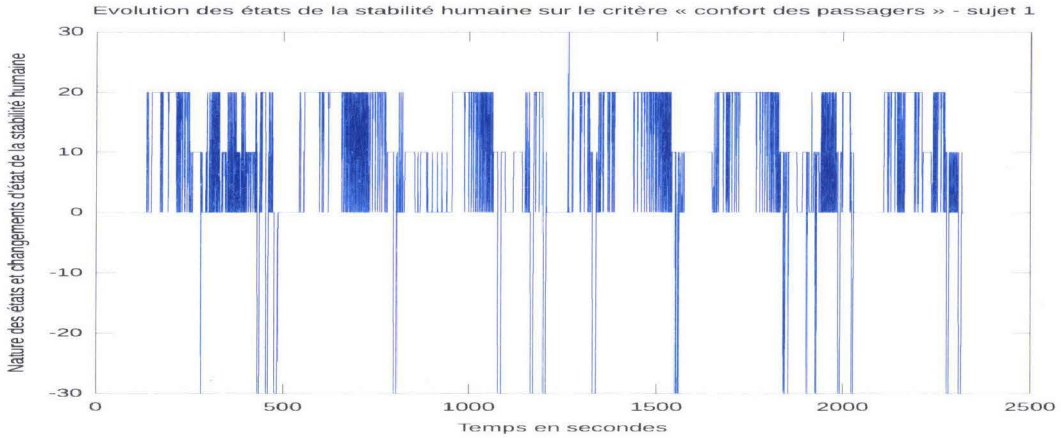


Figure 5.4 – *États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » - sujet 1*

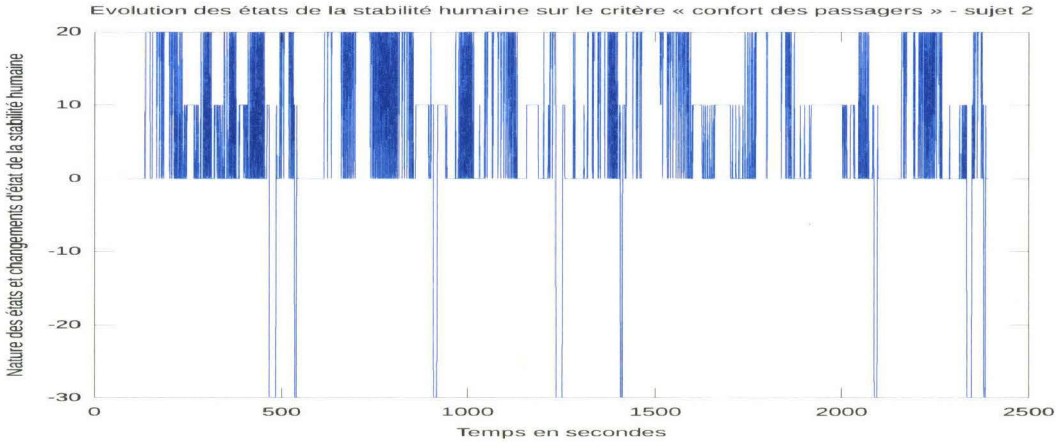


Figure 5.5 – *États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » - sujet 2*

La détection des états et changements d'état de la stabilité est correcte sur le critère « confort des passagers ». En effet, sur les figures *5.4 et 5.5*, on observe bien les états stables, les états instables ainsi que les transitions entre états.

5.2.1.3 Analyse temporelle du critère « qualité de service »

La qualité de service est étudiée par le respect des horaires d'arrivée en gare. Ce respect des horaires est calculé en continu en se basant sur un essai test qui sert de référence pour connaître, pour chaque point kilométrique relevé, le temps nécessaire pour y parvenir. Un calcul est effectué pour s'assurer qu'à chaque point kilométrique relevé, le sujet parvient à maintenir, ou non, son horaire.

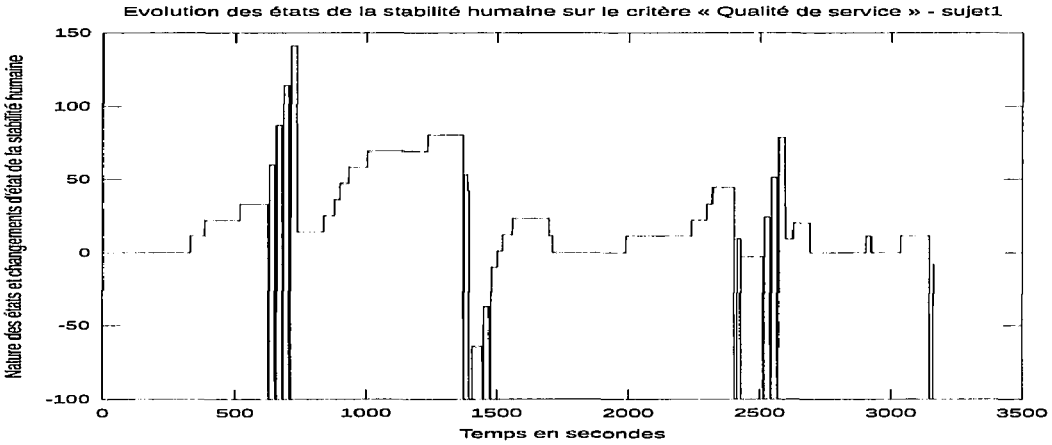


Figure 5.6 – *États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « Qualité de service » - sujet 1*

Dans ces figures, comme dans toute la suite de l'analyse des résultats pour le critère « qualité de service », les états de stabilité sous représentés par des « plateaux » situé entre -99 et 200 et la valeur correspondante aux plateaux définie le niveau de l'état de stabilité. Les états d'instabilité sont positionnés à -100 et les changements d'état sont représentés par les passages entre ces plateaux.

L'algorithme AT parvient à détecter les états stables, instables et les changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » (*cf. figure 5.6*).

Le scenario sans perturbation nous a donc permit de calibrer et de s'assurer que nous étions capable de détecter convenablement les états et changements d'état des opérateurs de conduite. Néanmoins, l'objectif est de pouvoir associé à ces états des risques et ainsi améliorer la prise en compte de la sécurité dans les transports. C'est dans ce cadre que l'étude se focalise maintenant sur le scénario avec perturbation. L'objectif est de pouvoir associé à des risques en sécurité en cas de mauvaise gestion d'une (ou de) perturbation(s) par les opérteurs.

5.2.2 Analyse du scénario avec perturbations

Le tableau *5.1* définit le temps nécessaire à chaque sujet pour atteindre l'instant initial de la perturbation. Les perturbations sont divisées en plusieurs étapes.

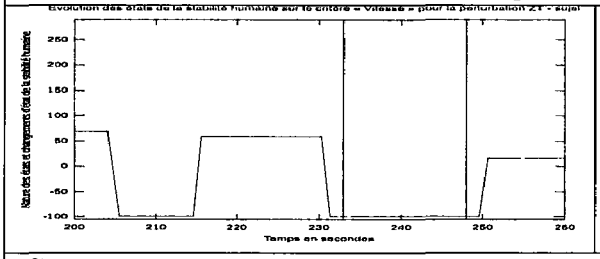
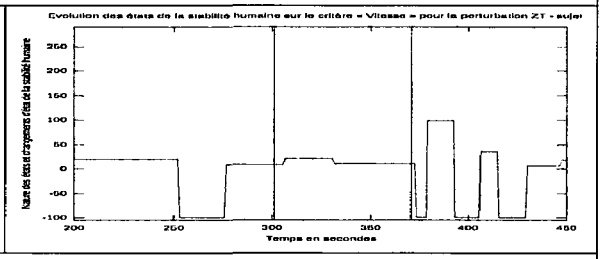
Tableau 5.1 – *Temps de passage des sujets des différentes étapes des perturbations*

Perturbation	Étapes \ Sujets	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ZT	Début ZT	301s	308s	294s	308s	300s	302s	306s	304s	312s	300s
	Fin ZT	371s	370s	357s	376s	354s	365s	366s	363s	382s	364s
DF	DF	791s	774s	780s	841s	787s	782s	783s	779s	773s	780s
CN2-0	Message CN2-0	1667s	1629s	1627s	1670s	1644s	1634s	1633s	1626s	1656s	1628s
	Acquittement CN2-0	1675s	1636s	1634s	1677s	1652s	1642s	1641s	1634s	1664s	1635s
	Changement CN2-0	1682s	1642s	1640s	1683s	1660s	1648s	1647s	1640s	1671s	1641s
	Fin CN2-0	1818s	1828s	1799s	1844s	1785s	1830s	1837s	1872s	1813s	1817s
CN0-2	Message CN0-2	1797s	1807s	1778s	1824s	1765s	1810s	1816s	1851s	1792s	1795s
	Changement CN0-2	1818s	1828s	1799s	1844s	1785s	1830s	1837s	1872s	1813s	1817s
	Fin CN0-2	2171s	2184s	2144s	2199s	2130s	2187s	2191s	2229s	2179s	2167s
CN2-1	Message CN2-1	2165s	2177s	2138s	2193s	2125s	2181s	2184s	2223s	2172s	2161s
	Changement CN2-1	2171s	2184s	2144s	2199s	2130s	2187s	2191s	2229s	2179s	2167s
CM	Message CM	2289s	2327s	2252s	2317s	2223s	2291s	2299s	2350s	2296s	2275s
	Acquittement CM	2295s	2332s	2255s	2323s	2227s	2294s	2310s	2353s	2301s	2279s
	Feu 1 CM	2643s	5604s	2598s	2557s	2600s	2601s	2667s	2687s	2617s	2624s
	Train CM	2869s	2899s	2876s	2654s	2864s	2869s	2861s	2749s	2681s	2686s
	Feu 2 CM	2995s	2983s	2991s	2989s	2989s	2984s	2994s	1984s	2726s	2995s

5.2.2.1 Étude de la stabilité humaine par l'algorithme AT

On se propose d'étudier la stabilité humaine face à l'occurrence de perturbations. Pour chaque sujet étudié, une comparaison entre scénario sans perturbation et scénario avec perturbations est réalisée afin d'identifier les similitudes et différences de la nature des états et changements d'état de la stabilité humaine (cf. *tableau 5.2*). Sur les figures présentes dans ce tableau, la ligne verticale indique le moment où la perturbation ou les étapes de la perturbation, sont franchies. Pour les figures liées au scénario sans perturbation, elle représente le moment où le même point kilométrique est franchi.

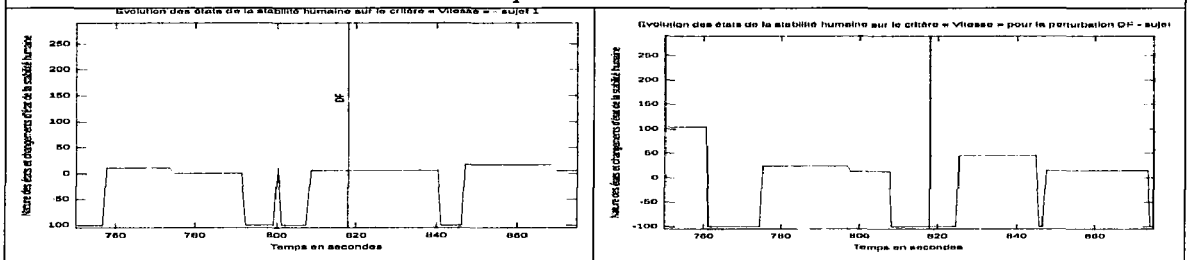
Tableau 5.2 – *Comparaison des états de stabilité et changements d'état entre le scénario sans perturbation et celui avec perturbations*

Scénario sans perturbation	Scénario avec perturbations
La perturbation ZT	
	
Continue page suivante ...	

Scénario sans perturbation	Scénario avec perturbations

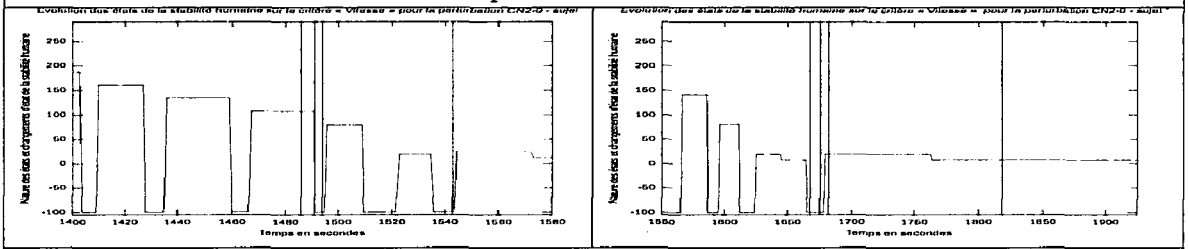
Dans la zone de perturbation, on observe qu'à l'étape début ZT, l'opérateur est stable sur le critère « vitesse » et à l'étape fin de ZT aussi. Au passage de la même zone dans le scénario sans perturbation, les états diffèrent (Instable et Instable).

La perturbation DF



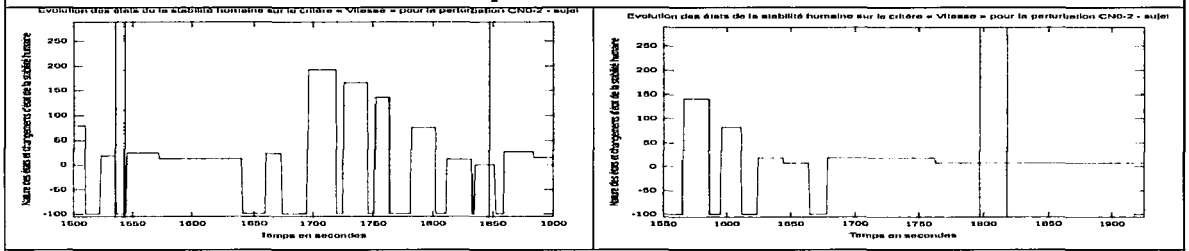
À l'occurrence de la dissonance cognitive, l'opérateur est instable sur le critère « vitesse ». Au passage de la même zone dans le scénario sans perturbation, l'état est différent (Stable)

La perturbation CN2-0



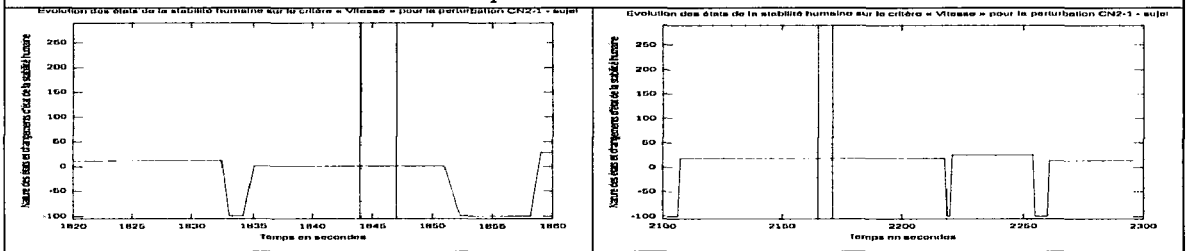
Lors de l'étape message CN2-0, l'opérateur est instable, lors de l'acquittement l'opérateur est de nouveau instable, ensuite, pour les étapes changements de niveau et fin, l'opérateur est dans un état stable. Lors du passage de la même zone dans le scénario sans perturbation, les états et changements d'état sont respectivement Stable, Rupture, Rupture, Instable.

La perturbation CN0-2

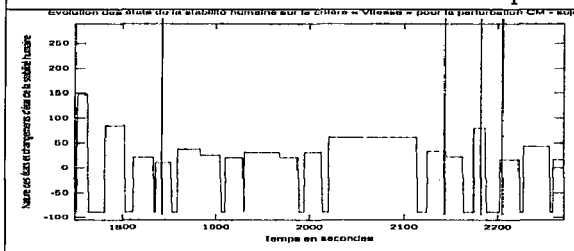
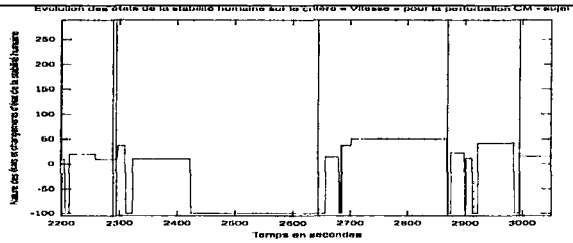


Pour toutes les étapes de la perturbation CN0-2, l'opérateur est dans un état stable. Sur la même zone, dans le scénario sans perturbation, les états et changements d'état sont différents.

La perturbation CN2-1



Continue page suivante ...

Scénario sans perturbation	Scénario avec perturbations
Pour la perturbation CN2-1, l'opérateur franchit les deux étapes de la perturbation dans un état stable. Il en est de même lors du passage de la même zone dans le scénario sans perturbation.	
La perturbation CM	
	
Le première étape de la perturbation CM (Message), l'opérateur a subi cette dernière dans un état stable, la seconde (Acquittement) par un saut, la troisième (Feu 1) dans un état instable, la quatrième par une rupture et la dernière dans un état stable. Pour la même zone, dans le scénario sans perturbation, les états et changements d'état diffèrent.	

L'ensemble des courbes, résultant du traitement par les algorithmes, du scénario sans perturbation sont fournies en annexe 6 et en annexe 7 pour le scénario avec perturbations.

En analysant ces résultats, on peut conclure que la stabilité humaine diffère en fonction du mode de fonctionnement du système (mode normal ou dégradé). On constate ces mêmes résultats pour l'ensemble des critères étudiés. La stabilité humaine est capable de détecter le mode dégradé et d'analyser le comportement de l'opérateur humain durant l'occurrence de perturbations.

Dans la section suivante, grâce à l'algorithme AS, pour chaque perturbation, on cherche à identifier une signature de nature d'états et changements d'état de la stabilité humaine qui définit un comportement de l'opérateur humain vis-à-vis de la perturbation.

5.2.2.2 Étude de la stabilité humaine par l'algorithme AS

Suite à l'étude de la stabilité par l'algorithme AT nous cherchons à identifier, dans cette section, par le biais de l'algorithme AS, des séquences de stabilité humaine que l'on appellera signatures qui définissent une référence, bonne ou mauvaise, de comportement de l'opérateur face à l'occurrence de perturbations régulières. Cette signature permettrait de s'assurer que l'opérateur humain accomplit les tâches requises pour gérer la perturbation. L'application de l'algorithme AS est effectuée pour chaque perturbation sur chaque critère étudié. Les cellules des tableaux *5.3* synthétisent la nature des états ou changements d'états : avant l'occurrence de la perturbation / à l'occurrence de la perturbation / après l'occurrence de la perturbation.

La première perturbation étudiée est le passage d'une zone de travaux.

5.2.2.2.1 La perturbation ZT, étude sur le critère « vitesse »

L'algorithme AS permet d'identifier une séquence d'états et changements d'état pour le critère « vitesse ». Le tableau *5.3* présente les séquences de stabilité détectées de chaque sujet concernant ce même critère.

Tableau 5.3 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « vitesse » pour la perturbation ZT*

Séquence des natures	Début de la perturbation ZT	Fin de la perturbation ZT
Sujet 1	Stable / Stable / Saut	Stable / Stable / Rupture
Sujet 2	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Rupture
Sujet 3	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Rupture
Sujet 4	Stable / Stable / Stable	Stable / Rupture / Instable
Sujet 5	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Rupture
Sujet 6	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Rupture
Sujet 7	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Rupture
Sujet 8	Stable / Stable / Stable	Stable / Rupture / Instable
Sujet 9	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Rupture
Sujet 10	Stable / Stable / Stable	Stable / Rupture / Instable

Les notes prises pendant la campagne expérimentale mettent en évidence que les sujets se sont parfaitement adaptés au passage de la zone de travaux. Le tableau 5.4 expose la signature recommandée des états et changements d'état de stabilité humaine (que nous estimons être de référence *a priori*). L'identification de la signature recommandée correspond à la séquence la plus fréquente ayant permis la bonne gestion de la perturbation. Dans le cas présent, cette signature a été observée chez chez 90% des sujets pour la première étape de la perturbation et chez 70% d'entre eux pour la deuxième étape.

Tableau 5.4 – *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation ZT*

	Début de la perturbation ZT	Fin de la perturbation ZT
Signature recommandée	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Rupture

La figure *5.7* schématise cette signature recommandée.

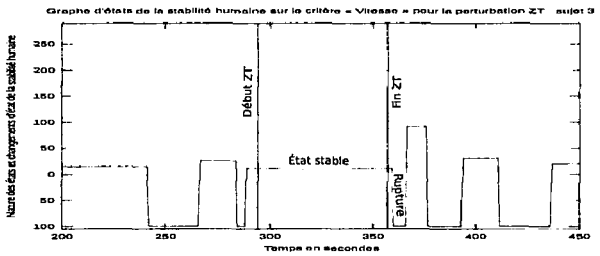


Figure 5.7 – *Signature recommandée de stabilité humaine pour la perturbation ZT sur le critère « vitesse »*

Bien que la perturbation ait été bien gérée, il apparaît, pour certains sujets :
- sujet 1 : Saut lié à une adaptation de vitesse en début de zone de travaux,
- sujets 4, 9 et 10 : Rupture liée à une anticipation de la fin de zone de travaux, une légère variation dans cette signature. Le **DMI** définit des signaux (sur quatre kilomètres en amont de la position actuelle) qui permettent de prévoir les changements de vitesse **P**.

5.2.2.2.2 La perturbation ZT, étude sur le critère « confort des passagers »

Le tableau *5.5* présente les séquences de stabilité pour chaque sujet concernant le critère « confort des passagers ».

Tableau 5.5 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation ZT*

Séquence des natures	Début de la perturbation ZT	Fin de la perturbation ZT
Sujet 1	Stable / Stable / Stable	Instable / Rupture / Stable
Sujet 2	Stable / Stable / Stable	Rupture / Stable / Stable
Sujet 3	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 4	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 5	Stable / Stable / Stable	Rupture / Stable / Stable
Sujet 6	Stable / Stable / Stable	Rupture / Stable / Stable
Sujet 7	Stable / Rupture / Rupture	Stable / Stable / Rupture
Sujet 8	Rupture / Rupture / Rupture	Stable / Stable / Rupture
Sujet 9	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 10	Stable / Rupture / Stable	Stable / Stable / Rupture

En analysant ces séquences, on constate que la séquence la plus courante pour le début de la perturbation est Stable / Stable / Stable. Elle représente 70% des séquences détectées. Inversement, en fin de perturbation, plusieurs séquences sont détectées et ne permettent pas de définir une séquence complète recommandée de la stabilité humaine en fin de zone de travaux. Cette difficulté est liée à la façon dont les sujets gèrent l'accélération/décélération sur cette zone. Néanmoins, on peut tout de même observer partiellement une signature recommandée d'états et de changements d'état présenté dans le tableau *5.6* et la figure *5.8* sous forme graphique.

Tableau 5.6 – *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation ZT*

	Début de la perturbation ZT	Fin de la perturbation ZT
Signature recommandée	Stable / Stable / Stable	n.d. / Stable / Stable

Néanmoins, d'après les résultats, il est difficile de conclure sur la nature de l'état ou changement d'état requis juste avant la fin de la zone de travaux, les sujets ayant tous réussi à absorber la perturbation avec des comportements différents.

5.2.2.2.3 La perturbation ZT, étude sur le critère « qualité de service »

Le tableau *5.7* présente les séquences de stabilité pour chaque sujet concernant le critère « qualité de service ».

Tableau 5.7 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « qualité de service » pour la perturbation ZT*

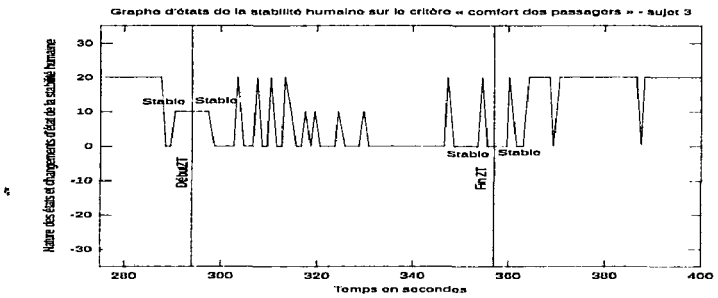


Figure 5.8 – *Signature recommandée de stabilité humaine pour la perturbation ZT sur le critère « confort des passagers »*

Séquence des natures	Début de la perturbation ZT	Fin de la perturbation ZT
Sujet 1	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 2	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 3	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 4	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 5	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 6	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 7	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 8	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 9	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 10	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable

L'ensemble des sujets a parfaitement géré cette perturbation qui n'a donc pas entraîné de retard sur les horaires prévus. Des séquences de stabilité concernant le critère « qualité de service » identiques pour tous les sujets sont observées. La séquence recommandée, pour ce critère, est présentée dans le tableau *5.8.*

Tableau 5.8 – *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation ZT*

	Début de la perturbation ZT	Fin de la perturbation ZT
Signature recommandée	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable

La figure *5.9* schématise cette signature recommandée.

Le paragraphe suivant se penche sur l'étude de la dissonance cognitive liée à une contradiction entre l'affichage du **DMI** et la présence d'un signal carré (feu rouge).

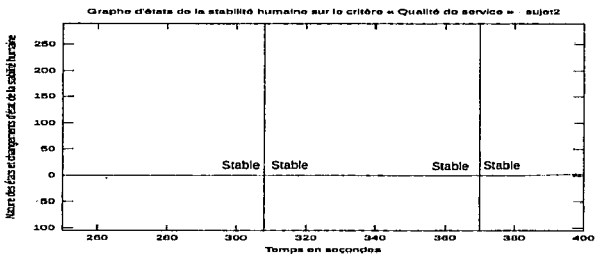


Figure 5.9 – *Signature recommandée de stabilité humaine pour la perturbation ZT sur le critère « qualité de service »*

5.2.2.2.4 La perturbation DF, étude sur le critère « vitesse »

Le tableau *5.9* présente la séquence d'états et changements d'état de stabilité pour chaque sujet sur le critère « vitesse ».

Tableau 5.9 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « vitesse » pour la perturbation DF*

Sujets	Perturbation DF
Sujet 1	Stable / Stable / Stable
Sujet 2	Saut / Stable / Stable
Sujet 3	Stable / Stable / Stable
Sujet 4	Instable / Rupture / Stable
Sujet 5	Stable / Rupture / Instable
Sujet 6	Stable / Stable / Stable
Sujet 7	Stable / Stable / Stable
Sujet 8	Stable / Stable / Stable
Sujet 9	Stable / Stable / Stable
Sujet 10	Stable / Stable / Rupture

Pour 60% des sujets qui ont parfaitement appliqué la procédure en cas de signal fermé (en mode *FS*). Une signature recommandée est présentée dans le tableau *5.10*. 40% des sujets ont cependant ralenti à la vue de ce signal carré avant de se remémorer la procédure. Cette décélération peut être associée à un saut ou une rupture de stabilité qui, néanmoins, n'impacte pas la sécurité du système.

Tableau 5.10 – *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation DF*

	Perturbation DF
Signature recommandée	Stable / Stable / Stable

Le paragraphe suivant propose la même étude sur le critère « confort des passagers ».

5.2.2.2.5 La perturbation DF, étude sur le critère « confort des passagers »

Le tableau *5.11* présente la séquence d'états et changements d'état de la stabilité humaine pour chaque sujet sur le critère « confort des passagers ».

Tableau 5.11 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation DF*

Sujets	Perturbation DF
Sujet 1	Stable / Stable / Stable
Sujet 2	Stable / Saut / Stable
Sujet 3	Stable / Stable / Stable
Sujet 4	Stable / Stable / Stable
Sujet 5	Saut / Stable / Stable
Sujet 6	Stable / Stable / Stable
Sujet 7	Saut / Stable / Stable
Sujet 8	Stable / Stable / Stable
Sujet 9	Stable / Stable / Stable
Sujet 10	Stable / Stable / Stable

Pour 60%, qui ont parfaitement appliqué la procédure lors d'un signal fermé en mode *FS*. Pour ce contexte précis, une signature recommandée est observée. Cette dernière est définie dans le tableau *5.12*. Néanmoins, 40% des sujets ont ralenti devant ce signal. Ce freinage correspond à un saut de stabilité qui peut dégrader le confort des passagers.

Le tableau *5.12* présente la signature recommandée des natures d'états et changements d'état de la stabilité humaine pour ce critère.

Tableau 5.12 – *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation DF*

	Perturbation DF
Signature recommandée	Stable / Stable / Stable

Le paragraphe suivant propose la même étude sur le critère « qualité de service ».

5.2.2.2.6 La perturbation DF, étude sur le critère « qualité de service »

Le tableau *5.13* présente la séquence d'états et changements d'état de stabilité pour chaque sujet sur le critère « vitesse ».

Tableau 5.13 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « qualité de service » pour la perturbation DF*

Sujets	Perturbation DF
Sujet 1	Stable / Stable / Stable
Sujet 2	Stable / Saut / Stable
Sujet 3	Stable / Stable / Stable
Sujet 4	Stable / Stable / Rupture
Sujet 5	Saut / Stable / Stable
Sujet 6	Stable / Stable / Stable
Sujet 7	Saut / Stable / Stable
Sujet 8	Stable / Stable / Stable
Sujet 9	Stable / Stable / Stable
Sujet 10	Stable / Stable / Stable

Une séquence de stabilité humaine, sur le critère « qualité de service » apparaît chez 60% des sujets. Cette séquence peut être considérée comme la séquence recommandée et est présentée dans le tableau *5.14*. La présence de saut et de rupture chez les autres sujets est liée à une gestion propre de la vitesse (un freinage à l'approche du signal carré) par l'opérateur. Pour la même raison évoquée dans les paragraphes précédents, ces sauts et ruptures n'impactent pas la sécurité du système mais peuvent, néanmoins, dégrader la « qualité de service » et le « confort des passagers ».

Tableau 5.14 – *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation DF*

	Perturbation DF
Signature recommandée	Stable / Stable / Stable

Les paragraphes suivants traitent la perturbation liée au passage du niveau 2 **ERTMS /ETCS** au niveau 0 (CN2-0).

5.2.2.2.7 La perturbation CN2-0, étude sur le critère « vitesse »

Le tableau 5.15 représente l'ensemble des séquences de stabilité humaine pour chaque opérateur sur le critère « vitesse ».

Tableau 5.15 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN2-0*

Sujets	Message	Acquittement	Changement effectif	Fin de changement
Sujet 1	Rupture / Instable / Instable	Instable / Saut / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 2	Stable /	Saut /	Stable /	Stable /
Continue page suivante ...				

Sujets	Message	Acquittement	Changement effectif	Fin de changement
	Rupture / Instable	Stable / Stable	Rupture / Instable	Stable Stable
Sujet 3	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Rupture / Instable	Stable / Stable / Stable
Sujet 4	Saut / Stable / Stable	Rupture / Instable / Instable	Instable / Instable / Instable	Stable / Stable / Stable
Sujet 5	Instable / Instable / Instable	Instable / Instable / Saut	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 6	Stable / Stable / Stable	Stable / Rupture / Instable	Instable / Instable / Instable	Stable / Stable / Stable
Sujet 7	Stable / Stable / Rupture	Instable / Instable / Instable	Instable / Instable / Instable	Stable / Stable / Stable
Sujet 8	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Rupture / Instable	Stable / Stable / Stable
Sujet 9	Stable / Rupture / Instable	Instable / Instable / Instable	Instable / Instable / Instable	Stable / Stable / Stable
Sujet 10	Stable / Rupture / Instable	Instable / Instable / Instable	Instable / Instable / Instable	Stable / Stable / Stable

Le de-briefing permet de constater que seulement 30% des sujets (sujets 1, 5, 9) est parvenu à effectuer correctement les tâches de gestion du changement de niveau. En analysant les différentes séquences de stabilité humaine pour chaque sujet, il est difficile de proposer une signature recommandée pour cette perturbation sur ce critère « vitesse ». Cependant, on parvient à identifier des séquences de stabilité présentant un risque pour le système. Lors de l'apparition du message prévenant l'opérateur du changement prochain de niveau, on constate que la séquence Stable / Stable / Stable entraîne un risque en sécurité. Cette séquence implique que l'opérateur humain n'a pas :

- soit perçu le message,
- soit appliqué la bonne procédure.

À chaque occurrence de cette signature, elle entraîne systématiquement un échec de gestion de cette perturbation.

De même, la séquence Stable / Rupture / Instable lors du changement effectif de niveau indique l'échec de l'application de la procédure par le sujet. Cet échec résulte de deux causes principales :

- le conducteur n'a pas perçu le signal d'acquittement de changement de niveau et ne l'a pas validé,
- il a acquitté avant d'être parvenu à la vitesse maximale autorisée.

Pour chacune de ces causes, cette séquence entraîne un risque au regard de la sécurité ; elle signifie que le conducteur entre dans la zone de niveau 0 en sur-vitesse.

En fin de changement de niveau, la séquence de stabilité humaine de référence correspondrait à Stable / Stable / Stable et permettrait d'assurer la maîtrise du risque associé à la perturbation. Pour chaque sujet où cette signature recommandée a été identifiée, la fin du changement de niveau a été parfaitement maîtrisée.

Bien que les observations de l'expérimentation ne permettent pas d'identifier une signature recommandée pour l'ensemble de la perturbation, elles suggèrent cependant certains types de signatures recommandées ou risquées pour certaines étapes de la perturbation. Le tableau *5.16* présente ces signatures.

Tableau 5.16 – *Signature recommandée et risquée des natures de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN 2-0*

	Message	Acquittement	Changement effectif	Fin de changement
Signature recommandée	n.d. / n.d. / n.d.	n.d. / n.d. / n.d.	n.d. / n.d. / n.d.	Stable / Stable / Stable
Signature risquée	Stable / Stable / Stable	n.d. / n.d. / n.d.	Stable / Rupture / Instable	n.d. / n.d. / n.d.

Le paragraphe suivant propose la même étude sur le critère « confort de passagers ».

5.2.2.2.8 La perturbation CN2-0, étude sur le critère « confort des passagers »

Le tableau 5.17 représente l'ensemble des séquences de stabilité humaine pour chaque opérateur sur le critère « confort des passagers ».

Tableau 5.17 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-0*

Sujets	Message	Acquittement	Changement effectif	Fin de changement
Sujet 1	Stable / Stable / Stable	Stable / Saut / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Saut / Stable
Sujet 2	Stable / Saut / Stable	Stable / Stable / Stable	Saut / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 3	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Saut / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 4	Stable /	Stable /	Stable /	Stable /

Continue page suivante ...

Sujets	Message	Acquittement	Changement effectif	Fin de changement
	Saut / Stable	Stable / Stable	Stable / Saut	Stable / Stable
Sujet 5	Stable / Stable / Stable	Saut / Stable / Stable	Stable / Saut / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 6	Stable / Stable / Stable	Stable / Saut / Stable	Stable / Stable / Saut	Saut / Stable / Stable
Sujet 7	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Saut / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 8	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Saut	Saut / Stable / Stable
Sujet 9	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Saut / Stable	Saut / Stable / Stable
Sujet 10	Stable / Stable / Stable	Stable / Saut / Stable	Stable / Saut / Stable	Stable / Stable / Stable

En utilisant la même démarche que dans le paragraphe précédent, nous constatons que 30% des sujets parviennent à maîtriser la situation lors de l'occurrence de la perturbation. À l'apparition du message de changement de niveau, l'analyse des résultats montre que la séquence Stable / Stable / Stable représente 80% des séquences observées. Étant donné le faible échantillon de population qui a réussi à gérer la perturbation, il est difficile de proposer une signature recommandée qui permette de bien gérer la situation. De même, lors de la phase d'acquittement du message, il apparaît que la séquence Stable / Stable / Stable mène vers une situation dangereuse ; seul un sujet sur les trois ayant appliqué cette séquence est parvenu à maîtriser la situation et pour cinq autres sujets elle a abouti à un échec. En conséquence, il est délicat de proposer une signature prédisant avec certains degrés de certitude, le succès ou l'échec de la situation. En fin de perturbation, l'analyse montre que la séquence la plus fréquemment retrouvée chez les sujets est Stable / Stable / Stable (cela représente 60% des cas) ; tous les sujets sont parvenus à maîtriser la fin du changement de niveau. Ces constatations permettent de définir une signature recommandée partielle et une signature risquée partielle concernant le critère « confort des passagers » *(cf. tableau 5.18)*.

Tableau 5.18 – *Signature recommandée et risquée des natures de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-0*

	Message	Acquittement	Changement effectif	Fin
Signature	n.d. /	n.d. /	n.d. /	Stable /
Continue page suivante ...				

	Message	Acquittement	Changement effectif	Fin
recommandée	n.d. / n.d.	n.d. / n.d.	n.d. / n.d.	Stable / Stable
Signature risquée	n.d. / n.d. / n.d.	Stable / Stable / Stable	n.d. / n.d. / n.d.	n.d. / n.d. / n.d.

Le paragraphe suivant propose la même étude sur le critère « qualité de service ».

5.2.2.2.9 La perturbation CN2-0, étude sur le critère « qualité de service »

Le tableau 5.19 représente l'ensemble des séquences de stabilité humaine pour chaque opérateur sur le critère « qualité de service ».

Tableau 5.19 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN2-0*

Sujets	Message	Acquittement	Changement effectif	Fin de changement
Sujet 1	Stable / Stable/ Stable	Stable/ Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 2	Stable / Stable/ Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable Stable
Sujet 3	Stable / Stable / Stable	Rupture / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 4	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 5	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Instable / Instable / Instable
Sujet 6	Instable / Instable / Rupture	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 7	Instable / Instable / Rupture	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 8	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 9	Stable /	Stable /	Stable /	Stable /

Continue page suivante ...

Sujets	Message	Acquittement	Changement effectif	Fin de changement
	Stable / Stable	Stable / Stable	Stable / Stable	Stable / Stable
Sujet 10	Instable / Instable / Instable	Instable / Rupture / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable

À chaque étape de la perturbation, la séquence de stabilité humaine la plus fréquemment observée est Stable / Stable / Stable. Pourtant seul 30% des sujets est parvenu à maîtriser le changement de niveau. Il n'est donc pas possible de conclure sur une signature recommandée pour ce critère.

Les paragraphes suivants traitent la perturbation liée au passage du niveau 0 **ERTMS /ETCS** au niveau 2.

5.2.2.2.10 La perturbation CN0-2, étude sur le critère « vitesse »

Le tableau *5.20* présente l'ensemble des séquences de stabilité relevées pour cette perturbation maîtrisée par l'ensemble des sujets.

Tableau 5.20 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN0-2*

Sujets	Message	Changement effectif	Fin
Sujet 1	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 2	Stable / Saut / Stable	Stable / Stable / Stable	Rupture / Instable / Instable
Sujet 3	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 4	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 5	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Saut	Stable / Stable / Stable
Sujet 6	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Rupture / Instable
Sujet 7	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 8	Stable / Stable / Saut	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 9	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Rupture / Instable / Rupture
Sujet 10	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable

En analysant cet ensemble de séquences, on peut en déduire une signature recommandée de la stabilité humaine (cf. *tableau 5.21*).

Tableau 5.21 – *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN0-2*

	Message	Changement effectif	Fin
Signature recommandée	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable

La figure *5.10* schématise graphiquement cette signature.

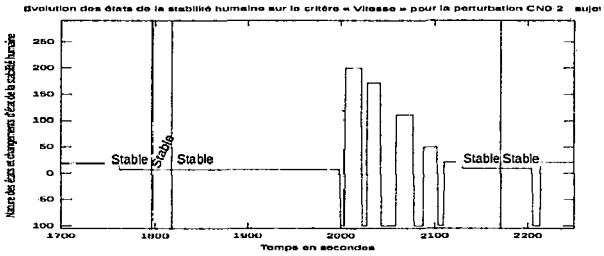


Figure 5.10 – *Exemple de signature recommandée de stabilité humaine pour la perturbation CN0-2*

Cette signature de la nature des états et changements d'état de la stabilité se retrouve chez la plupart des sujets. Le paragraphe suivant propose la même étude sur le critère « confort des passagers ».

5.2.2.2.11 La perturbation CN0-2, étude sur le critère « confort des passagers »

Le tableau *5.22* présente l'ensemble des séquences de stabilité relevées pour cette perturbation.

Tableau 5.22 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN0-2*

Sujets	Message	Changement effectif	Fin
Sujet 1	Stable / Stable / Stable	Saut / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 2	Saut / Stable / Saut	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Saut
Sujet 3	Stable / Stable / Saut	Stable / Stable / Saut	Stable / Stable / Stable
Sujet 4	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Saut / Stable / Saut
Sujet 5	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 6	Saut / Stable / Stable	Saut / Stable / Stable	Saut / Stable / Saut
Sujet 7	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 8	Saut / Stable / Saut	Saut / Stable / Saut	Saut / Stable / Stable
Sujet 9	Stable / Stable / Stable	Saut/ Stable / Stable	Stable / Saut / Stable
Sujet 10	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable

La perturbation a été gérée par l'ensemble des sujets ce qui permet de définir un signature recommandée sur ce critère (cf. *tableau 5.23*).

L'analyse met en évidence d'autres alternatives à cette signature recommandée pour la gestion de cette perturbation. Les autres séquences évoquées dans le tableau *5.22* n'ont pas d'influence négative sur le confort des passagers selon les critères de [Robert 2006].

Le paragraphe suivant propose la même étude sur le critère « qualité de service ».

5.2.2.2.12 La perturbation CN0-2, étude sur le critère « qualité de service »

Tableau 5.23 – *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN0-2*

	Message	Changement effectif	Fin
Signature recommandée	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable

Le tableau *5.24* présente l'ensemble des séquences de stabilité relevées pour cette perturbation.

Tableau 5.24 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN0-2*

Sujets	Message	Changement effectif	Fin
Sujet 1	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 2	Stable / Saut / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 3	Rupture / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 4	Stable / Stable / Stable	Rupture / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 5	Stable / Stable / stable	Instable / Instable / Instable	Stable / Stable / Stable
Sujet 6	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 7	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 8	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 9	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 10	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable

Dans 80% des cas, une séquence type est détectée. Cette séquence peut être associée à la signature recommandée (cf. *tableau 5.25*).

Tableau 5.25 – *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN0-2*

	Message	Changement effectif	Fin
Signature recommandée	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable

Les paragraphes suivants traitent la perturbation liée au passage du niveau 2 **ERTMS /ETCS** au niveau 1.

5.2.2.2.13 La perturbation CN2-1, étude sur le critère « vitesse »

Le tableau *5.26* présente l'ensemble des séquences de stabilité relevées pour cette perturbation.

Tableau 5.26 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN2-1*

Sujets	Message	Changement effectif
Sujet 1	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 2	Instable / Instable / Instable	Stable / Stable / Stable
Sujet 3	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 4	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 5	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 6	Stable / Rupture / Instable	Instable / Instable / Saut
Sujet 7	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 8	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 9	Stable / Stable / Stable	Instable / Instable / Instable
Sujet 10	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable

La perturbation a été gérée par l'ensemble des sujets ce qui permet de privilégier une signature recommandée basée sur les séquences observées les plus courantes. Cette signature est proposée dans le tableau *5.27*.

Tableau 5.27 – *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation DF*

	Message	Changement effectif
Signature recommandée	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable

Le paragraphe suivant propose la même étude sur le critère « confort des passagers ».

5.2.2.2.14 La perturbation CN2-1, étude sur le critère « confort des passagers »

Le tableau *5.28* présente l'ensemble des séquences de stabilité détectées par l'algorithme AS pour cette perturbation.

Tableau 5.28 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-1*

Sujets	Message	Changement effectif
Sujet 1	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 2	Stable / Saut / Stable	Stable / Saut / Stable
Continue page suivante ...		

Sujets	Message	Changement effectif
Sujet 3	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 4	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 5	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 6	Stable / Stable / Stable	Saut / Stable / Stable
Sujet 7	Stable / Saut / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 8	Stable / Saut / Stable	Saut / Stable / Stable
Sujet 9	Stable / Stable / Stable	Stable / Saut / Stable
Sujet 10	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable

L'ensemble des sujets est parvenus à contrôler cette perturbation. Pour les mêmes raisons que dans le paragraphe précédent, une signature recommandée peut être établie (cf. *tableau 5.29*).

Tableau 5.29 – *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-1*

	Message	Changement effectif
Signature recommandée	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable

Le paragraphe suivant propose la même étude sur le critère « qualité de service ».

5.2.2.2.15 La perturbation CN2-1, étude sur le critère « qualité de service »

Le tableau *5.30* présente l'ensemble des séquences de stabilité relevées pour cette perturbation.

Sujets	Message	Changement effectif
Sujet 1	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 2	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 3	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 4	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 5	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 6	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 7	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 8	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 9	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 10	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable

Tableau 5.30 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN2-1*

L'analyse est semblable aux études menées dans les paragraphes précédents et permet de générer une signature recommandée de stabilité humaine pour le critère « qualité de service » et présentée dans le tableau *5.31*.

Tableau 5.31 – *Signature recommandée des natures de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN2-1*

	Message	Changement effectif
Signature recommandée	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable

Les paragraphes suivants traitent la perturbation liée au changement de mode **ERTMS /ETCS**, du mode **FS** au mode **OS**.

5.2.2.2.16 La perturbation CM, étude sur le critère « vitesse »

Le tableau *5.32* présente l'ensemble des séquences de stabilité relevées pour cette perturbation.

Tableau 5.32 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « vitesse » pour la perturbation CM*

Sujets	Message	Acquittement	Feu rouge 1	Train en pleine voie	Feu 2
Sujet 1	Stable / Stable / Stable	Stable / Saut / Stable	Instable / Instable / Instable	Stable / Saut / Stable	Instable / Instable / Instable
Sujet 2	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Rupture / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Rupture / Instable
Sujet 3	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Rupture	Stable / Stable / Stable	Instable / Saut / Saut	Instable / Instable / Saut
Sujet 4	Saut / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Instable / Instable / Instable	Stable / Saut / Stable	Instable / Instable / Saut
Sujet 5	Stable / Stable / Stable	Stable / Rupture / Instable	Instable / Rupture / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 6	Instable / Rupture / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Rupture / Instable	Instable / Instable / Instable	Instable / Instable / Instable
Sujet 7	Stable /	Stable /	Instable /	Stable /	Stable /

Continue page suivante ...

Sujets	Message	Acquittement	Feu rouge 1	Train en pleine voie	Feu 2
	Stable / Stable	Stable / Rupture	Instable / Rupture	Stable / Rupture	Stable / Stable
Sujet 8	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Rupture	Stable / Stable / Saut	Stable / Stable / Stable	Instable / Instable / Instable
Sujet 9	Stable / Stable / Stable	Stable / Rupture / Instable	Stable / Stable / Rupture	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 10	Stable / Stable / Stable	Stable / Saut / Stable	Instable / Instable / Instable	Rupture / Instable / Instable	Stable / Stable / Stable

Cette perturbation se divise en cinq étapes : apparition d'un message de changement de mode, acquittement de ce message, gestion d'un signal feu rouge, gestion d'évitement de collision avec un train arrêté en pleine voie et gestion d'un second signal feu rouge. L'analyse de cette perturbation s'effectue étape par étape. Lors de la première étape, la totalité des sujets a géré l'apparition du message. Dans 80% des cas, la séquence de stabilité humaine la plus observée est Stable / Stable / Stable. Elle est privilégiée comme séquence recommandée pour cette étape.

De même, pour l'étape « acquittement », l'ensemble des sujets a appliqué la bonne procédure. La séquence Stable / Stable / Stable indique un acquittement rapide. En effet,la vitesse **P** diminue jusqu'à l'arrêt tant que l'opérateur n'a pas acquitté le changement de mode. Ceci se traduit par des sauts ou des ruptures sur le critère étudié. Pour l'étape « feu 1 », le sujet 6 a franchi le feu rouge. Ceci se traduit par la séquence Stable / Rupture / Instable. Le passage de l'état stable à l'état instable indique un freinage tardif. Cette séquence est donc supposée risquée. Néanmoins, ce cas n'étant apparu qu'une fois, il est difficile de l'assurer avec certitude. Pour l'étape « train en pleine voie », le sujet 10 est entré en collision avec ce dernier. Sa séquence de stabilité humaine est Rupture / Instable / Instable. La Rupture en début de séquence indique un freinage tardif. Mais pour la même raison que dans l'étape précédente, il est difficile d'affirmer qu'il s'agit bien d'une séquence risquée. Pour l'étape « feu 2 » l'ensemble des sujets est parvenu à accomplir la bonne procédure. Néanmoins, les sujets n'ont pas traité cette étape de la même manière. Certains ont conservé une vitesse inférieure à la vitesse **P** dans l'attente que le feu signalé, dans leur environnement, passe au vert, tandis que d'autres ont accéléré puis freiné brutalement, ce qui explique la diversité des séquences pour cette étape. En fonction de ces observations, une partie de la signature recommandée et une partie de la signature risquée sont proposées dans le tableau *5.33*.

Tableau 5.33 – *Signature recommandée et risquée de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CM*

	Message	Acquittement	Feu rouge 1	Train en pleine voie	Feu 2
Signature recommandée	Stable / Stable /	n.d. / n.d. /	n.d. / n.d. /	n.d. / n.d. /	n.d. / n.d. /
Continue page suivante ...					

	Message	Acquittement	Feu rouge 1	Train en pleine voie	Feu 2
	Stable	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Signature risquée	n.d. / n.d. / n.d.	n.d. / n.d. / n.d.	Stable / Rupture / Instable	Rupture / Instable / Instable	n.d. / n.d. / n.d.

Le paragraphe suivant propose la même étude sur le critère « confort des passagers ».

5.2.2.2.17 La perturbation CM, étude sur le critère « confort des passagers »

Le tableau *5.34* présente l'ensemble des séquences de stabilité relevées pour cette perturbation.

Tableau 5.34 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CM*

Sujets	Message	Acquittement	Feu rouge 1	Train en pleine voie	Feu 2
Sujet 1	Stable / Stable / Stable	Stable / Saut / Stable	Saut / Stable / Stable	Saut / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 2	Stable / Saut / Stable	Stable / Saut / Stable	Stable / Stable / Saut	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 3	Stable / Stable / Saut	Stable / Saut / Stable	Stable / Saut / Stable	Stable / Saut / Stable	Stable / Saut / Stable
Sujet 4	Stable / Saut / Stable	Stable / Saut / Stable	Stable / Saut / Stable	Stable / Stable / Saut	Stable / Stable / Stable
Sujet 5	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Saut	Stable / Stable / Saut	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 6	Instable / Instable / Instable	Instable / Instable / Instable	Stable / Saut / Stable	Stable / Saut / Stable	Stable / Stable / Saut
Sujet 7	Stable / Saut / Stable	Stable / Stable / Saut	Stable / Saut / Stable	Stable / Saut / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 8	Stable / Saut / Stable	Stable / Saut / Stable	Stable / Stable / Stable	Saut / Stable / Stable	Saut / Stable / Stable

Continue page suivante ...

Sujets	Message	Acquittement	Feu rouge 1	Train en pleine voie	Feu 2
Sujet 9	Stable / Saut / Stable	Stable / Saut / Stable	Stable / Saut / Stable	Stable / Saut / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 10	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Saut	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Saut	Saut / Stable / Stable

Sur ce critère, il est très difficile de proposer une signature recommandée puisque les séquences observées sur l'ensemble des sujets sont trop hétérogènes.

Le paragraphe suivant propose la même étude sur le critère « qualité de service ».

5.2.2.2.18 La perturbation CM, étude sur le critère « qualité de service »

Le tableau *5.35* présente l'ensemble des séquences de stabilité relevées pour cette perturbation.

Tableau 5.35 – *Séquence de la nature des états et changements d'état sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CM*

Sujets	Message	Acquittement	Feu rouge 1	Train en pleine voie	Feu 2
Sujet 1	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Rupture / Instable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 2	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 3	Stable / Saut / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Saut / Stable
Sujet 4	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 5	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Saut	Stable / Stable / Saut	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 6	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 7	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Sujet 8	Stable /	Stable /	Stable /	Instable /	Saut /
Continue page suivante ...					

Sujets	Message	Acquittement	Feu rouge 1	Train en pleine voie	Feu 2
	Stable / Stable	Stable / Stable	Stable / Stable	Instable / Instable	Stable / Stable
Sujet 9	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Saut / Stable / Stable
Sujet 10	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Saut / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable

Sur ce critère, il est possible de fournir une signature recommandée de stabilité humaine. Néanmoins, celle-ci n'aurait pu permettre une détection du franchissement du « feu 1 » par le sujet 6. Cette signature est fournie dans le tableau *5.36*.

Tableau 5.36 – *Signature recommandée et risquée de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CM*

	Message	Acquittement	Feu rouge 1	Train en pleine voie	Feu 2
Signature recommandée	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable	Stable / Stable / Stable
Signature risquée	n.d. / n.d. / n.d.	n.d. / n.d. / n.d.	n.d. / n.d. / n.d.	Stable / Stable / Saut	n.d. / n.d.

La section suivante propose une synthèse de l'ensemble des résultats présentés dans cette section.

5.2.3 Synthèse des résultats de la campagne expérimentale

5.2.3.1 Observations durant l'expérimentation

Durant l'expérimentation, il a été observé que les sujets portaient davantage leur attention sur l'interface **DMI** plutôt que sur la restitution 3D de la voie. En discutant avec des ergonomes et psychologues issus du mode ferroviaire, il apparaît que dans la réalité ce comportement est essentiellement propre aux nouveaux conducteurs. Les conducteurs plus expérimentés sur les systèmes de contrôle/commande tels que **KVB**/TVM430 sont habitués à surveiller l'environnement dans lequel évolue le train et n'accorde qu'une confiance limitée au système embarqué **ERTMS/ETCS**. Cette confiance excessive dans le système, pour les conducteurs novices, entraîne parfois des erreurs humaines ; certains signaux carrés peuvent être franchis car non détectés par l'agent de conduite.

5.2.3.2 Synthèse de la nature des états et changements d'état de la stabilité humaine face aux perturbations

Cette section propose d'étudier les états ou changements d'état à l'occurrence de chaque perturbation sur chaque critère.

5.2.3.2.1 Le critère « vitesse »

Le tableaux *5.37* présente pour chaque perturbation, le nombre d'états stables, instables et de changements d'état pour chaque étape de chaque perturbation sur le critère « vitesse ».

Tableau 5.37 – *Tableau récapitulatif des perturbations et nature des états et changements d'état d'occurrence sur le critère « vitesse »*

Code de la perturbation	Nombre d'occurrence	État stable	État instable	Saut/rupture
DF	10	8	0	0/2
Début ZT	10	10	0	0/0
Fin ZT	10	8	0	0/2
CN2-0 message	10	5	2	0/3
CN2-0 acquittement	10	3	5	1/1
CN2-0 changement	10	2	5	0/3
CN2-0 fin	10	10	0	0/0
CN0-2 message	10	9	0	1/0
CN0-2 changement	10	10	0	0/0
CN0-2 fin	10	7	2	0/1
CN2-1 message	10	8	1	0/1
CN2-1 changement	10	8	2	0/0
CM message	10	9	0	0/1
CM acquittement	10	6	0	2/2
CM Feu 1	10	4	4	1/1
CM Train immobilisé	10	5	2	3/0
CM Feu 2	10	4	5	0/1
Total	170	116	28	8/18

Sur le critère « vitesse », 68,24% des occurrences de perturbation surviennent durant un état stable, 16.47% durant un état instable, 4,70% durant un saut et 10,59% durant une rupture. L'état stable est l'état le plus couramment observé. Afin d'identifier les états susceptibles d'impacter la sécurité du système, nous proposons une étude centrée sur les évènements redoutés constatés au cours de la simulation. Le tableau *5.38* liste ces différents évènements et les états et changements d'état de la stabilité humaine associés.

La figure *5.11* montre la proportion d'occurrences d'évènements indésirables, liées au comportement de l'opérateur, en fonction de la nature des états et changements d'état de la stabilité humaine. La figure *5.12* illustre la distribution de chaque évènement redouté en fonction de la nature des états et changements d'état.

L'analyse de ces figures montre que, sur le critère « vitesse », les évènements redoutés surviennent dans 33,3% des cas durant un état stable, dans 44,44% des cas durant un état instable et dans 22,2% durant une rupture. Pour l'échec de l'acquittement de changement de niveau CN2-0, 42,86% survient pendant un état stable, 42,86% durant un état instable et 14,86% durant une rupture. Pour ce type de perturbation, il semble intéressant de vérifier que l'occurrence d'un état stable ou d'un état instable apparaît. D'après les résultats, c'est principalement pendant ce type d'états (stable/instable) qu'apparaît un risque d'erreur humaine. Cette erreur provoque une sur-vitesse dans la zone de niveau 0. Lors du franchissement d'un signal carré, un unique cas

Tableau 5.38 – Évènements redoutés observés

Évènements redoutés observés	Nombre d'états stables observés	Nombre d'états instables observés	Nombre de sauts/ruptures observés
Défaut d'acquittement changement niveau 2-0	3	3	0/1
Signal carré franchi	0	0	0/1
Collision avec train	0	1	0/0

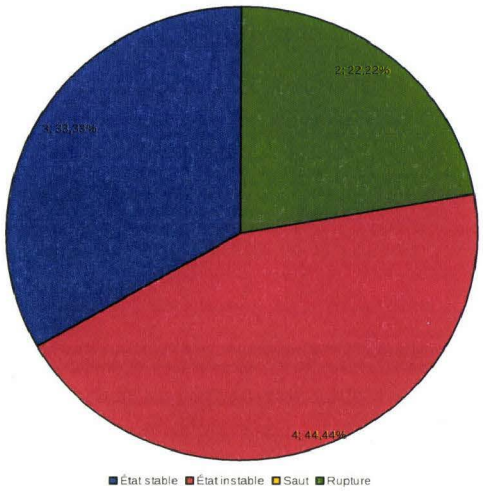


Figure 5.11 – Association des évènements redoutés et des états de stabilité

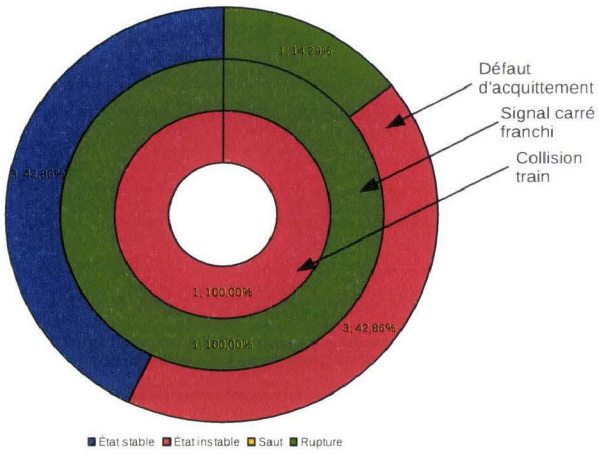


Figure 5.12 – Distribution des évènements en fonction de la nature des états et changement d'état

a été identifié et survient durant un état instable. Il est envisageable de penser que l'état instable à l'occurrence du signal carré peut être dangereux. De manière identique, lors la collision avec le train, elle survient pendant une rupture.

5.2.3.2.2 Le critère « confort des passages »

Le tableaux *5.39* présente pour chaque perturbation, le nombre d'états stables, instables et de changements d'état pour chacune des étapes des différents perturbations sur le critère « confort des passagers ».

Tableau 5.39 – Tableau récapitulatif des perturbations et nature des états et changements d'état d'occurrence sur le critère « confort des passagers »

Code de la perturbation	Nombre d'occurrence	État stable	État instable	Saut/rupture
DF	10	10	0	0
Début ZT	10	7	0	0/3
Fin ZT	10	6	0	0/4
CN2-0 message	10	8	0	2/0
0 CN2-0 acquittement	10	7		3/0
CN2-0 changement	10	6	0	4/0
CN2-0 fin	10	9	0	1/0
CN0-2 message	10	9	0	1/0
CN0-2 changement	10	10	0	0/0
CN0-2 fin	10	7	0	2/1
CN2-1 message	10	7	0	3/0
CN2-1 changement	10	8	0	2/0
CM message	10	9	0	1/0
CM acquittement	10	6	1	3/0
CM feu 1	10	5	0	5/0
CM train immobilisé	10	6	0	4/0
CM feu 2	10	8	0	2/0
Total	170	128	1	33/8

Sur le critère « confort des passagers », 75,29% des occurrences de perturbation surviennent durant un état stable, 0,59% durant un état instable, 19,41% durant un saut et 4,71% durant une rupture. De même que pour le critère « vitesse » l'état de stabilité humaine le plus couramment observé à l'occurrence des perturbations est l'état stable. Nous proposons la même étude que précédemment (cf. *tableau 5.40*).

Tableau 5.40 – *Évènements redoutés observés*

Évènements redoutés observés	Nombre d'états stables observés	Nombre d'états instables observés	Nombre de sauts/ruptures observés
Défaut d'acquittement changement niveau 2-0	5	0	2/0
Signal carré franchi	0	0	1/0
Collision avec train	1	0	0/0

La figure *5.13* montre la proportion d'occurrences d'évènements indésirables, liées au comportement de l'opérateur, en fonction de la nature des états et changements d'état de la stabilité humaine. La figure *5.14* illustre la distribution de chaque évènement redouté en fonction de la nature des états et changements d'état.

L'analyse de ces figures montre que, sur le critère « confort des passagers », les évènements redoutés surviennent dans 66,67% des cas durant un état stable et dans 33,33% durant un saut.

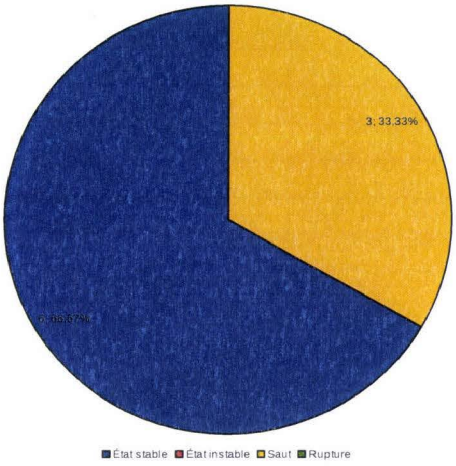


Figure 5.13 – *Association des évènements redoutés et des états de stabilité*

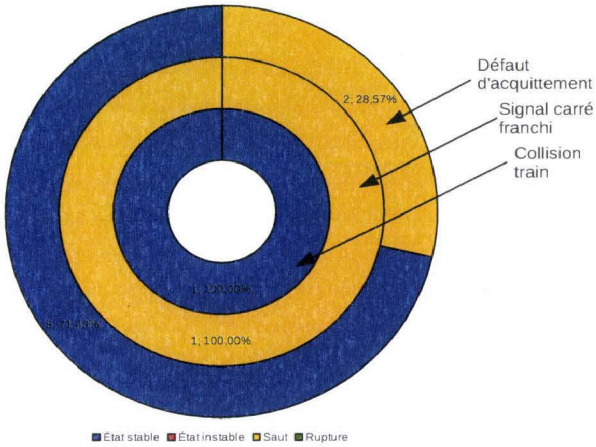


Figure 5.14 – *Distribution des évènements en fonction de la nature des états et changements d'état*

Pour l'échec de l'acquittement de changement de niveau CN2-0, 71,57% survient pendant un état stable et 28,57% durant un état instable. L'état stable semble donc présenter un risque important de sur-vitesse dans la zone de niveau 0. Lors du franchissement d'un signal carré, il apparaît durant un saut. Enfin, il est a noté que lors de la collision avec le train, elle survient une unique fois, durant un état stable.

5.2.3.2.3 Le critère « qualité de service » Le tableau *5.41* présente pour chaque perturbation, le nombre d'états stables, instables et de changements d'état pour chaque étape de chaque perturbation sur le critère « qualité de service ».

Tableau 5.41 – *Tableau récapitulatif des perturbations et nature des états et changements d'état d'occurrence sur le critère « qualité de service »*

Code de la perturbation	Nombre d'occurrence	État stable	État instable	Saut/rupture
Code de la perturbation	Nombre d'occurrence	État stable	État instable	Saut/rupture
DF	10	9	0	1/0
Début ZT	10	10	0	0/0
Fin ZT	10	10	0	0/0
CN2-0 message	10	7	3	0/0
0 CN2-0 acquittement	10	9	0	0/1
CN2-0 changement	10	10	0	0/0
CN2-0 fin	10	9	1	0/0
CN0-2 message	10	9	0	1/0
Continue page suivante ...				

Code de la perturbation	Nombre d'occurrence	État stable	État instable	Saut/rupture
CN0-2 changement	10	9	1	0/0
CN0-2 fin	10	10	0	0/0
CN2-1 message	10	10	0	1/0
CN2-1 changement	10	10	0	0/0
CM message	10	9	0	1/0
CM acquittement	10	10	0	0/0
CM feu 1	10	9	1	0/0
CM train immobilisé	10	9	1	0/0
CM feu 2	10	9	0	1/0
Total	170	158	7	5/1

Sur le critère « confort des passagers », 92,94% des occurrences de perturbation surviennent durant un état stable, 4,38% durant un état instable, 3,12% durant un saut et 0,63% durant une rupture. De même que pour les deux autres critères, l'état de stabilité humaine le plus couramment observé à l'occurrence des perturbations est l'état stable. Nous étudions maintenant les états liés aux évènements observés sur le critère « qualité de service » (cf. *tableau 5.42*).

Tableau 5.42 – *Évènements redoutés observés*

Évènements redoutés observés	Nombre d'états stables observés	Nombre d'états instables observés	Nombre de sauts/ruptures observés
Défaut d'acquittement changement niveau 2-0	6	0	1/0
Signal carré franchi	1	0	0/0
Collision avec train	1	0	0/0

La figure *5.15* montre la proportion d'occurrences d'évènements indésirables, liées au comportement de l'opérateur, en fonction de la nature des états et changements d'état de la stabilité humaine. La figure *5.16* illustre la distribution de chaque évènement redouté en fonction de la nature des états en changements d'état.

L'analyse de ces figures montre que, sur le critère « qualité de service », les évènements redoutés surviennent dans 88,89% des cas durant un état stable et 11,11% durant une rupture. En étudiant la distribution des états et changements d'état en fonction des évènements redoutés :

- le défaut d'acquittement apparaît dans 85,71% des cas durant un état stable et 14,29% durant une rupture,
- le franchissement d'un signal carré intervient toujours durant un état stable,
- la collision avec le train apparaît également toujours en état stable. Pour ce dernier critère, il est nécessaire de vérifier que l'état stable à l'occurrence de la perturbation n'est pas présent car il est source d'erreurs et facteur de risques.

Ces observations permettent de mettre à jour le tableau *4.4*. L'opérateur, en condition perturbée, est souvent dans un état stable ou en transition vers un état instable. Les risques liés

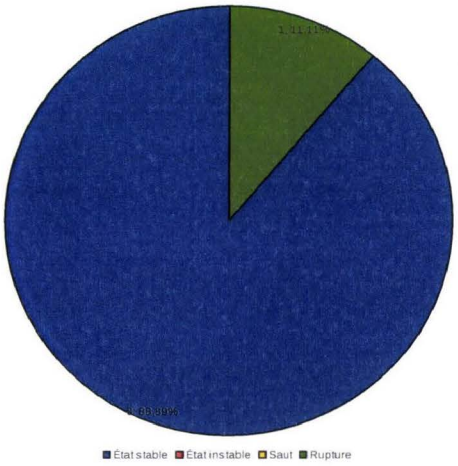


Figure 5.15 – *Association des évènements redoutés et des états de stabilité*

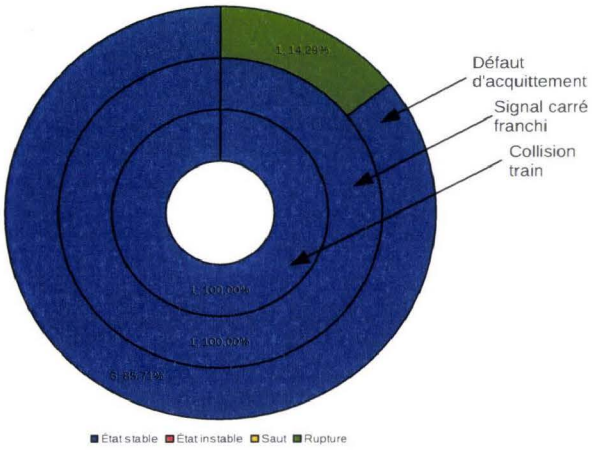


Figure 5.16 – *Distribution des évènements en fonction de la nature des états et changements d'état*

aux états de stabilité dépendent de la nature de la perturbation mais aussi du critère d'étude.

Tableau 5.43 – *Nature des états et changements d'état et leurs risques envisagés*

Système et/ou environnement	Nature des états et changements d'état relatif à la stabilité humaine
Non perturbé	ES
	T saut
	T rupture
	EI
Perturbé	ES ou ES
	T saut ouT saut
	T rupture ouT rupture
	EI ou EI

La détection de la nature de l'état ou changement d'état au moment de l'occurrence d'une perturbation permet d'identifier des natures d'états et changements d'état dangereuses de la stabilité humaine. Néanmoins, ces états ne permettent pas toujours de conclure qu'un risque potentiel peut apparaître. Il est donc nécessaire de le compléter par la prise en compte des signatures recommandées ou risquées. En cas de détection par le système d'une perturbation, si la signature recommandée est connue pour cette perturbation, il est possible d'alerter l'opérateur humain, lorsque la nature des états et changements d'état de la stabilité humaine s'écarte de la signature recommandée, qu'un risque potentiel d'erreur humaine existe. Afin d'illustrer ce cas, nous allons utiliser un cas identifié dans les paragraphes précédents. Dans le cadre de la perturbation CM pour l'étape « train arrêté en pleine voie », la conclusion du paragraphe précédent montrait que l'état stable à l'occurrence de la perturbation était dangereux, avec une

signature recommandée identifiée dans le tableau *5.36* Stable / Stable / Stable. Cela signifie que l'état stable pendant l'occurrence de la perturbation ne présente pas vraiment de danger en soi. La signature risquée identifiée Stable / Stable / Saut indique, par contre, que c'est le saut qui suit l'état à l'occurrence qui présente un risque. Il reste préférable, dans l'ensemble, de s'appuyer sur la signature recommandée lorsqu'il est possible de la définir.

Suite à ces enseignements liés aux résultats de la campagne expérimentale, la section suivante propose plusieurs perspectives aux travaux de recherche détaillés dans ce mémoire.

5.3 Perspectives de valorisation de la stabilité humaine

Cette dernière section détaille les perspectives des travaux actuels suite aux résultats de la validation de ce concept et également en retour des commentaires issus de la communauté de chercheurs à qui ont été présentés ces travaux. Ces perspectives s'orientent vers cinq voies principales :

1. la première est d'accroître la prise en compte des signatures recommandées de stabilité dans la gestion du risque,
2. la seconde est de permettre le contrôle de la stabilité en ligne. L'objectif de cette perspective est d'intégrer le facteur humain sous un nouvel angle en considérant l'opérateur humain comme un capteur de sécurité. Ceci devrait permettre d'effectuer un pronostic permettant d'anticiper d'éventuelles erreurs humaines,
3. la troisième vise à étudier, non pas la stabilité humaine et la stabilité du système indépendamment, mais la stabilité du système homme-machine dans sa globalité,
4. la quatrième est axée sur l'extension à l'étude de la facette « état », liés à des critères intrinsèques à l'opérateur humain afin d'affiner la détection des états et changements d'état de la stabilité humaine,
5. la cinquième vise à contrôler la stabilité humaine par une étude multi-critère.

5.3.1 Prise en compte des signatures de la stabilité humaine

La campagne expérimentale a permis de créer des signatures de référence de stabilité humaine pour les évènements perturbateurs étudiés durant cette campagne. La première partie de cette perspective est de compléter ces signatures. L'objectif est, dans un premier temps, de se focaliser sur les évènements perturbateurs majeurs du transport.

Ensuite, cette base de données est utilisée de la manière suivante (cf. *figure 5.17*).

La première phase de cette utilisation est la détection indispensable de la perturbation par le système. Si le système n'est pas équipé de capteurs ou systèmes permettant de connaître la nature de la perturbation, l'utilisation de la base de données devient inefficace. Une fois cette perturbation détectée et connue, la nature des états et changements d'état est contrôlée en ligne par les algorithmes AT et/ou AF. Pendant cette détection, la base de données des signatures de la stabilité humaine est utilisée. Elle contient le type de la perturbation et la séquence de la nature des états et changements d'état de stabilité. La détection des états et changements d'état est alors comparée au cours du temps et l'on s'assure qu'ils sont conformes à la signature recommandée. En cas de non conformité, un avertissement peut être envoyé à l'opérateur humain afin qu'il puisse corriger ses actions et/ou son comportement. Ces avertissements peuvent être

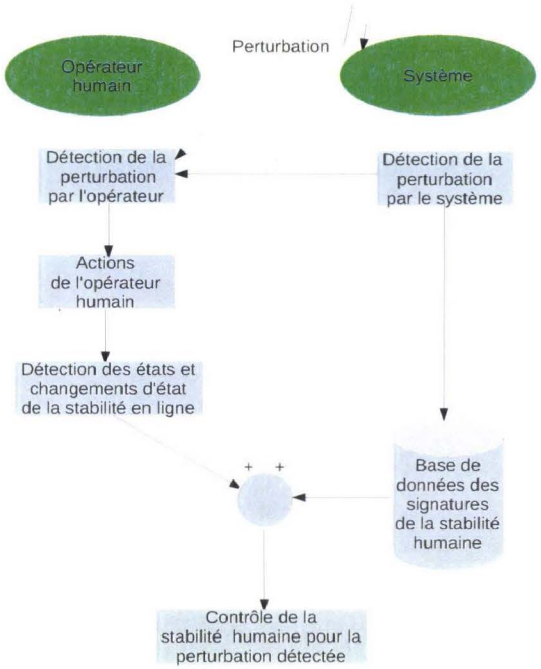


Figure 5.17 – Utilisation des signatures de stabilité humaine

de type alarme sonore ou visuelle. En cas de non réponse de l'opérateur humain, un freinage d'urgence peut être envisagé afin d'éviter l'incident ou l'accident.

5.3.2 Le contrôle de la stabilité en ligne

La campagne expérimentale a permis d'identifier la stabilité humaine comme un détecteur d'erreurs humaines et de risques pour le système Homme-Machine. En l'état actuel des travaux, la stabilité humaine est étudiée *a posteriori*. Néanmoins, il apparaît que la stabilité humaine peut être étudiée en ligne. Cette surveillance en ligne propose une approche intéressante dans la prise en compte de la sécurité des systèmes. En effet, elle permettrait alors d'effectuer un pronostic sur le risque d'erreur humaine. Cette détection potentielle d'erreur humaine est alors effectuée en fonction des états de stabilité détectés et des risques associés à ces états. L'objectif de cette identification en ligne est de permettre de remonter des alarmes, voire d'enclencher un arrêt d'urgence lorsque le risque d'erreur humaine, sous forme de probabilité, est élevé. Ce contrôle de la stabilité humaine en ligne peut être renforcé par la prise en compte des signatures de stabilité humaine par l'algorithme AS.

5.3.3 Extension de la stabilité aux systèmes homme-machine

En l'état actuel des travaux, la stabilité humaine et la stabilité du système sont étudiées indépendamment l'une de l'autre. Pourtant, au cours de la campagne expérimentale, il est observé que la stabilité humaine influe sur la stabilité du système en terme de sécurité, de qualité de service.... La réciprocité a elle aussi été observée. Lorsque le système est défaillant, la stabilité de l'opérateur humain est influencée. On observe des changements d'état de stabilité suite à

l'occurrence d'une défaillance sur le système (*figure 5.18*) L'étude de la stabilité du système Homme-Machine est une voie intéressante dans l'étude de ce concept.

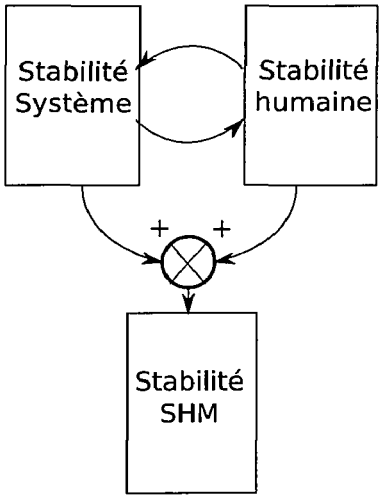


Figure 5.18 – *Stabilité du système Homme-Machine*

5.3.4 De nouveaux critères d'évaluation de la stabilité humaine

Dans un premier temps, les travaux de recherche de ce mémoire se focalisent sur les facettes « performance » et « comportement » présentées dans le chapitre 3. Néanmoins, une autre facette, la facette « état » est mise de côté pour des raisons d'équipements. Pourtant, à la différence des facettes « performance » et « comportement », qui fournissent des indicateurs indirects sur le comportement de l'opérateur humain, la facette « état » permet de connaître de façon intrinsèque de l'opérateur humain. Néanmoins, les équipements nécessaires à l'étude de ces critères sont intrusifs, même si de nouvelles pistes de recherche, comme la reconnaissance faciale, le sont moins. L'extension de l'étude de la stabilité humaine sur ce type de critères est donc essentielle. Elle nécessite la mise en place de capteurs de mesure importants afin de connaître par exemple le rythme cardiaque (cf. *figure 5.19*) le rythme alpha et les rythmes bêta des signaux (cf. *figure 5.20*) issus de l'électroencéphalogramme.

Figure 5.19 – *Exemple d'électrocardiogramme (source : Google images)*

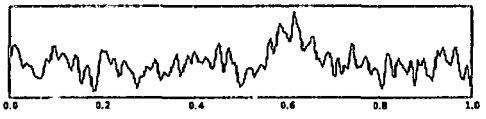


Figure 5.20 – *Exemple d'onde issu d'un électroencéphalogramme (source : Google images)*

En se replaçant dans le cas de l'électrocardiogramme, l'algorithme AF semble indiqué dans l'étude de la nature des états et changements d'état de la stabilité humaine sur ce critère. En effet, ce signal se répète de façon fréquentielle au cours du temps comme le montre la figure *5.21*.

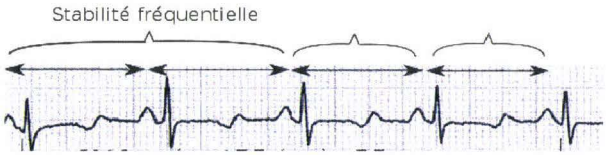


Figure 5.21 – Exemple d'électrocardiogramme

L'étude de la stabilité sur ce critère permet de connaître une partie de l'état intrinsèque de l'opérateur humain. Par exemple, si le rythme cardiaque reste fréquentiellement stable, l'opérateur humain n'est pas en condition de stress par exemple et la situation semble sous contrôle. Par contre, en cas de changement d'état de stabilité, par exemple suite à une augmentation du rythme cardiaque, on peut identifier une situation stressante. Si on se replace dans le domaine du transport guidé, il peut s'agir, par exemple, d'un obstacle sur la voie. Ce type de critères permet donc de détecter des situations dangereuses.

Néanmoins, l'équipement nécessaire pour l'étude de ce type de critères est très lourd et intrusif. Il existe une possibilité nécessitant un équipement beaucoup plus léger et moins intrusif, afin de connaître la stabilité interne de l'opérateur humain : la reconnaissance faciale. Cette reconnaissance vise à connaître l'état émotionnel de l'opérateur humain.

La première étape consiste à créer une base de caractéristiques faciales liées à ces émotions. De nombreuses études proposent des classifications. La figure *5.22* propose un extrait de ses bases issus de [Luong 2006].

Figure 5.22 – Exemple d'émotions tiré de [Luong 2006]

La reconnaissance faciale est un processus qui se divise en plusieurs étapes (cf. *figure 5.23*).

Figure 5.23 – Schéma général du processus de reconnaissance faciale issu de [Chelali 2005]

La première étape consiste à acquérir la vidéo à partir d'une webcam par exemple. Ensuite, un traitement des images obtenues est réalisé afin d'obtenir des images fixes en couleur. Généralement ces images fixes en couleur sont passées en niveau de gris afin de réduire la taille de la matrice d'étude. L'étape suivante consiste en une étude statistique. Plus précisément, il est effectué un calcul statistique basé sur l'**ACP** (Analyse en Composantes Principales). L'objectif est ensuite de créer un modèle de reconnaissance faciale (pour plus d'informations voir, par exemple, [Nkambou 2004], [Chelali 2005], [Tian 2005] et [Luong 2006]).

Dans le cadre de l'étude de la stabilité humaine, l'objectif est d'identifier les états et le changements d'état de stabilité des émotions de l'opérateur par ce processus de reconnaissance faciale. Ceci permet d'identifier des risques potentiels, par exemple en détectant l'émotion de surprise, de peur. Ces différentes émotions peuvent indiquer une situation grave ou inconnue pour l'opérateur humain.

5.3.5 L'étude multi-critère

La campagne expérimentale a montré que l'étude mono-critère n'est pas suffisante en fonction du système que conduit ou supervise l'opérateur humain. Ce constat est dû à la dynamique du système. La perspective est de passer à une étude multi-critère. Un étude bibliographique permet de constater l'existence d'un ensemble de méthode d'étude multi-critère. Deux types d'approche existent. Le première consiste à pondérer les critères, c'est-à-dire à privilégier un critère par rapport à l'autre en lui fournissant un coefficient plus élevé que l'autre. La seconde approche se base sur les méthodes « multi-objectif ».

5.3.5.1 Approche par pondération de critères

La première approche possible afin d'étudier la stabilité humaine, de façon multi-critère, est de pondérer, les uns en fonction des autres, les critères d'étude de cette stabilité. Cette méthode pose plusieurs problèmes. Le premier est la pondération des critères en elle-même. Par exemple, imaginons que les critères qualité de service comme respecter des horaires soient privilégiés par rapport au confort des passagers. Dans ce cas, les algorithmes pourraient être appliqués sur le signal obtenu par l'équation 5.1 :

$$S(t) = 0.2 * Q(t) + 0.8 * C(t) \tag{5.1}$$

Avec $S(t)$ signal fusionné par pondération des critères, $Q(t)$ signal de la qualité de service et $C(t)$ signal du confort des passagers.

La stabilité humaine serait alors étudiée sur le signal $S(t)$. L'avantage principal de cette méthode est qu'elle fournit une et une seule solution. Néanmoins cette méthode possède des limites et n'est pas retenue. Quels critères privilégier par rapport à quels autres critères. De plus cette pondération peut être remise en cause en fonction du contexte dans lequel évolue l'opérateur humain. Par exemple, dans le cadre des transports guidés, l'opérateur humain peut décider de privilégier le confort des passagers et non pas la qualité de service.

5.3.5.2 Approche multi-objectif

La deuxième approche consiste à utiliser des méthodes multi-objectif aussi appelées multi-critère. Ces méthodes sont divisées en deux grandes familles comme le présente la figure 5.24

Les méthodes exactes proposent des solutions exactes. Ces méthodes sont très efficaces mais les temps nécessaires aux calculs augmentent rapidement dès que la complexité du problème augmente, c'est-à-dire lorsque le nombre d'objectifs et de variables croissent.

5.3.5.2.1 Les méthodes exactes

Ces méthodes proposent plusieurs approches. Elles sont basées sur des procédures de séparation et évaluation (les méthodes Branch and Bound) [Ulungu 1995], sur l'algorithme A*

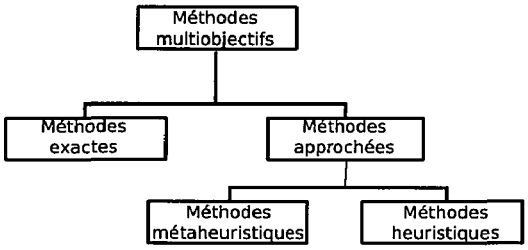


Figure 5.24 – Les méthodes multi-objectif

[Stewart 1991] et la programmation dynamiques. L'ensemble de ces méthodes permettent de résoudre des problèmes à 2 objectifs. D'autres approches existent, par exemple la programmation par but (« goal programming ») [Carraway 1990]. Le décideur doit fixer une valeur cible et l'objectif est de réduire au maximum l'écart entre cette valeur cible et la solution proposée.

Néanmoins, dès que le nombre d'objectifs et la complexité des problèmes augmentent, ces méthodes deviennent inefficaces du à la complexité NP difficile des problèmes que ce soit en mono-objectif ou multi-objectif [Dhaenens-Flipo 2005].

Cette fusion de signal peut se faire de deux façons distinctes. Soit en fusionnant les données sources, soit en fusionnant les résultats des algorithmes précédemment présentés.

Les méthodes approchées permettent de réduire ces temps de calcul. Les solutions apportées sont moins précises. Elles sont très utilisées dans les problèmes industriels nécessitant un résultat rapide. Elles se subdivisent en deux grandes familles :

- les méthodes méta-heuristiques propose un squelette de traitement qui peut être adapté en fonction du problème qui cherche à résoudre,
- les méthodes heuristiques qui sont réservées aux types de problèmes pour lesquels elles ont été conçues.

5.3.5.2.2 Les méthodes heuristiques

Ces méthodes ne garantissent pas de trouver une valeur exacte mais une valeur aussi proche que possible de la solution [Dhaenens-Flipo 2005]. Elles sont décomposées en plusieurs approches :

- transformations en un ou plusieurs problèmes mono-objectif
- approches Non Pareto
- approches Pareto

5.4 Conclusion

À travers de l'évaluation de la stabilité humaine, dans le domaine des transports guidés, ce chapitre achève la partie applicative et expérimentale de nos travaux de recherche. Il présente et discute des résultats obtenus par l'analyse de données recueillies durant la phase expérimentale. Plusieurs enseignements sont tirés de ces résultats.

Tout d'abord, les enseignements attestent de la capacité du concept de stabilité humaine à détecter le comportement de l'opérateur humain à travers des natures d'états et changements

d'état de la stabilité. Cette détection est réalisée grâce aux différents algorithmes de détection des états et ce chapitre les valide.

Il en ressort qu'il est difficile d'associer à un état un risque potentiel mais qu'il est préférable d'utiliser une signature recommandée de stabilité qui correspond à une séquence de nature d'états et de changements d'état pour un évènement donné dans des conditions données.

Ces conclusions encourageantes ouvrent une marge de progression importante du concept de la stabilité humaine. En effet, plusieurs perspectives de recherche sont émises. Elles concernent l'enrichissement du formalisme mathématique et des algorithmes. Elles proposent un modèle d'utilisation des signatures de stabilité, en ligne, dans le but de contrôler le comportement de l'opérateur humain et de permettre de lui ajouter une fonction de « capteur » de danger.

Conclusion générale

Les travaux de recherche introduits dans ce mémoire concernent une nouvelle approche de la prise en compte des facteurs humains dans les systèmes : la stabilité humaine. L'enjeu de cette approche est d'accroître l'intégration de la composante humaine dans la sécurité des transports guidés.

Dans le premier chapitre, nous avons étudié les différents aspects associés à la sécurité des transports guidés. La sécurité est prise en compte tout au long du cycle de vie du système, depuis sa conception (par le respect des normes par exemple) jusqu'à son exploitation (par les **REX**). Ce chapitre a proposé un bref état de l'art sur les normes et règles de conception et d'exploitation de systèmes de transports guidés ainsi que sur les rôles des différents acteurs impliqués dans la mise en œuvre de ces normes. Un ensemble de méthodes permettant l'étude en sécurité de ces systèmes a également été présenté. Ces méthodes sont essentiellement centrées sur les aspects techniques du système (par exemple **AMDEC** ou **APR**) et, dans une proportion beaucoup plus faible, sur les aspects humains. Cette étude montre d'une part que la connaissance des risques liés aux aspects techniques est aujourd'hui relativement bien maîtrisée et d'autre part que la prise en compte des facteurs humains dans la sécurité des systèmes reste sporadique. Les méthodes actuelles d'étude du facteur humain se focalisent, principalement, sur la probabilité d'occurrence d'erreurs humaines ou de succès de la tâche à accomplir (par exemple la méthode **THERP**). D'autres méthodes proposent des pistes de recherche comme l'étude des conséquences de l'infiabilité humaine (par exemple la méthode **ACIH**) ou encore, les risques engendrés par la dérive de paramètres liés à la tâche de l'opérateur humain (par exemple la méthode **HAZOP**). Pourtant, de nombreux incidents et accidents restent, aujourd'hui, imputables aux facteurs humains. Ces accidents sont généralement repris par les médias et impactent fortement l'opinion publique. De ces constats, les travaux de recherche de cette thèse s'orientent vers une nouvelle approche, l'étude de la stabilité de l'opérateur humain en phase de conduite de systèmes afin de tenir compte des risques liés à cette notion de stabilité.

Afin de répondre à cette nouvelle piste de recherche, le second chapitre a proposé l'étude de la notion de stabilité dans divers domaines d'application. La première partie de ce chapitre a montré qu'aujourd'hui les méthodes de la sûreté de fonctionnement commencent à atteindre leurs limites et que d'autres voies de recherche apparaissent. La principale piste actuelle est la résilience des systèmes. Afin de comprendre cet axe concernant les systèmes techniques, la seconde partie s'est centrée sur l'étude de la résilience dans différents domaines d'application. Il en ressort que la résilience est un concept en lien avec la stabilité. En effet, plusieurs domaines utilisent, dans la définition de la résilience, l'expression « état stable ». La différence entre les deux notions s'effectue dans le type d'évènements rencontrés. La résilience s'adresse plutôt à des évènements non prévus et la stabilité à des perturbations régulières. Les perturbations régulières étant plus fréquentes que celles imprévues, le choix a été fait de se focaliser sur le concept de stabilité. La suite du chapitre s'est concentrée sur une étude de la notion de stabilité. On en conclut que la stabilité est à la recherche d'un point d'équilibre durablement établi dans le temps. Pour les systèmes techniques, ce point d'équilibre est souhaité et assure que le système reste dans un mode de fonctionnement voulu. Afin de répondre à l'objectif de

l'étude qui est d'associer le concept de stabilité à la sécurité, la dernière partie a étudié l'impact de la stabilité et de la perte de stabilité sur la sécurité des systèmes dans différents domaines.

C'est dans ce contexte que nous nous sommes attachés à présenter, dans le chapitre trois, cette nouvelle approche de la prise en compte des facteurs humains dans les systèmes : la stabilité humaine. Les objectifs de ce chapitre sont multiples :

- définir la notion de stabilité humaine,
- caractériser et formaliser la stabilité humaine,
- proposer des moyens d'identification de la nature des états et changements d'état de la stabilité humaine,
- et enfin de déterminer des critères d'étude de la stabilité humaine.

En se basant sur l'étude de la notion de stabilité dans le chapitre précédent, la stabilité humaine a été définie comme la capacité de l'opérateur humain à être et à se maintenir dans un état stable, dans des conditions (environnementales, organisationnelles, *etc.*) données. Plusieurs états et changements d'état de stabilité sont définis :

- état stable,
- état instable,
- changements d'état (saut ou rupture).

Afin de permettre l'identification de la nature des états et changements d'état, un formalisme mathématique est proposé. De ce formalisme, et dans le but de détecter les différentes natures, plusieurs algorithmes sont définis. Le premier propose une détection des états et changements d'état de la stabilité humaine de manière temporelle, le second propose d'étudier la stabilité fréquentielle (l'algorithme recherche une répétition de signal). Le troisième et dernier algorithme, se basant sur les résultats fournis par les algorithmes temporel et séquentiel, vise à identifier des séquences de stabilité pour les évènements perturbateurs. Ces séquences, appelées signatures recommandées, permettent de s'assurer que le conducteur reste dans des états ou changements d'état conseillés. Un ensemble de critères permet l'étude de la stabilité humaine. Ils sont répartis en trois facettes : « état », « comportement » et « performance ». Les facettes « comportement » et « performance » permettent d'étudier l'opérateur humain de manière extrinsèque. La facette « état », quant à elle, se focalise sur des critères intrinsèques de l'opérateur humain. Dans l'objectif d'illustrer les états et changements d'état de la stabilité, les données issues d'une campagne expérimentale dans le domaine du contrôle aérien, sont traitées avec l'algorithme temporel. Les résultats obtenus suite à cette campagne montrent que cet algorithme est capable de détecter la nature des états et changements d'état de la stabilité humaine. Il permet aussi d'associer aux états et changements d'état, les erreurs humaines observées durant la simulation et ainsi de déduire les risques potentiels. Afin d'éprouver les algorithmes de détection de la nature des états et changements d'état de la stabilité humaine, un protocole expérimental a été mis en place. Son domaine d'application est le transport ferroviaire dans le contexte du nouveau système ferroviaire **ERTMS/ETCS**.

Le chapitre 4 a présenté, dans un premier temps, le système **ERTMS/ETCS** avec ses différents niveaux et modes de fonctionnement. Puis, une description de la plate-forme expérimentale sur laquelle a eu lieu la campagne est fournie avec ses différents modules : le **DMI**, une

station de surveillance de la voie, un poste de gestion d'infrastructure et une restitution 3D. La suite du chapitre a exposé les deux scénarios sur lesquels se déroulent l'expérimentation. Ces scénarios ont été conçus, d'une part pour familiariser les sujets avec le système **ERTMS/ETCS** et la plate-forme, et d'autre part pour tester les algorithmes de détection de la stabilité humaine.

Le chapitre 5 a exposé l'ensemble des résultats de la campagne expérimentale. L'algorithme AT permet d'identifier la nature des états et changements d'état de la stabilité humaine. Néanmoins, cette approche n'est pas toujours suffisante pour associer, de façon efficace, les risques liés aux natures de la stabilité humaine. La deuxième partie des résultats présente l'application de l'algorithme AS. Cet algorithme permet de définir des signatures de stabilité recommandées. Pour des écarts entre états et changements d'état de cette signature, un risque potentiel peut apparaître. De plus, cet algorithme est capable d'identifier des séquences à proscrire. En effet, certaines séquences amènent toujours vers un échec de la tâche à accomplir. Enfin, un ensemble de perspectives de recherche issu des enseignements de la campagne expérimentale a été développé. Une première perspective consiste à exploiter davantage le rôle des signatures de stabilité humaine dans l'étude de sécurité. L'objectif est de créer une base de données associant une séquence de stabilité recommandée pour chaque type de perturbations. Cette perspective permet de viser le contrôle de la stabilité humaine en ligne. L'objectif est de contrôler les signatures de stabilité lorsqu'une perturbation est détectée par le système. En cas d'écart des natures de la stabilité humaine par rapport à une signature recommandée, il sera alors possible d'alerter le conducteur afin de l'orienter vers une séquence de stabilité recommandée quand cela est possible. L'opérateur humain sera alors perçu comme un capteur de sécurité en plus de ses fonctions premières, la supervision et la conduite du système. Afin d'affiner le concept de stabilité humaine présenté, il est nécessaire d'étendre la recherche à la facette « état » des critères de la stabilité. Cette extension permettra de détecter des perturbations pour lesquelles le système n'est pas équipé de capteurs de détection. De plus, cette facette permet d'identifier directement l'état intrinsèque de l'opérateur humain. La dernière perspective est d'étendre les travaux à une approche multi-critère ou multi-objectif, toujours dans l'optique d'améliorer les résultats de la stabilité humaine au regard de la sécurité.

Évaluer la stabilité humaine est une nouvelle approche d'intégration des facteurs humains dans les systèmes dits « complexes » au sens de l'ingénierie des systèmes. Cette thèse apporte une première contribution à la caractérisation et à la détection de la stabilité humaine. L'application de l'apport de la thèse à un système de transport guidé montre que la stabilité humaine est une approche innovante et prometteuse. L'extension de son application à d'autres systèmes reste également une perspective de nos travaux.

Bibliographie

[Akhenak 2009] A. Akhenak, M. Chadli, J. Ragot et D. Maquin. *Design of observers for Takagi-Sugeno fuzzy models for fault detection and isolation.* In 7th IFAC symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, 2009. 41

[Albinet 2006] C. Albinet, P.-L. Benard et Y. Palut. *Contrôle attentionnel de la stabilité posturale chez la personne âgée institutionnalisée : effets d'un programme d'activité physique.* Annales de réadaptation et de médecine physique, vol. 49, pages 625–631, 2006. 37

[Amalberti 2001] René Amalberti. *The paradoxes of almost totally safe tranportation systems.* Safety Science, pages 109–126, 2001. 1, 24, 26

[Amemiya 2005] Takashi Amemiya, Takatoshi Enomoto, A.G. Rossberg, Noriko Takamura et Kiminori Itoh. *Lake restoration in terms of ecological resilience : a numerical study of biomanipulations under bistable conditions.* Ecology and Society, vol. 10, 2005. 35

[Bello 1980] G.C et al. Bello. *The Human Factors in Risk Analyses of Process Plant : The Control Room Operator Model "TESEO".* Reliability Engineering, vol. 1, pages 3–14, 1980. 21

[Benard 2004] Vincent Benard. *Evaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes complexes, basée sur un modèle fonctionnel dynamique : la méthode SAFE-SADT.* PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2004. vii, 28

[Beugin 2006] Julie Beugin. *Contribution à l'évaluation de la sécurité des systèmes complexes de transport guidé.* PhD thesis, UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRÉSIS, 2006. 6, 28

[Boy 2005] Guy Boy. *Les actions à risques.* In Journées RSCIF, 2005. 58

[Boy 2007] Guy A. Boy. *Perceived Complexity and cognitive stability in human-centered design.* In HCI international conference, Beijin, China, 2007. 58

[Brunel 2011] Olivier Brunel et Céline Gallen. *Et si c'était de la dissonnance cognitive ?* In 27ème congrès international de l'association française de marketing, 2011. viii, 58, 59

[Carraway 1990] R.L. Carraway, T.L. Morin et H. Moskowitz. *Generalized dynamic programming for multicriteria optimization.* European Journal of Operational Research, vol. 44, pages 95–104, 1990. 125

[CEI61508 1998] CEI61508. *CEI61508 : Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité.* Rapport technique, 1998. 7

[Chelali 2005] F/Z Chelali, A. Djeradi et R. Djeradi. *Mise en place d'un système de reconnaissance faciale basé sur l'approche statistique "Analyse en composantes principales" développée sous l'environnement MATLAB.* In 3rd International Conference : Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, 2005. ix, 123

[Chen 2007] C.-M. Chen, C.6W. Lin et Y.-C. Chen. *Adaptive error-resilience transcoding using prioritized intra-refresh for video multicast over wireless networks.* Signal Processig : Image and Communication, vol. 22, pages 277–297, 2007. 32

[Châtelet 2008] Éric Châtelet et Jean-François Aubry. Sûreté de fonctionnement des systèmes de commandes - principes et méthodes. 2008. 13, 14

[Clarhaut 2009] Jeoffrey Clarhaut. *Prise en compte des séquences de défaillances pour la conception de systèmes d'automatisation, Application au ferroutage.* PhD thesis, Université de Lille, 2009. 28

[Corridor A] Corridor A. www.corridora.eu/programme/interoperability. viii, 68

[Crevits 2002] Igor Crevits, Serge Debernard et Pascal Denecker. *Model building of air-traffic controller's work-load regulation.* European Journal of Operational Research, vol. 136, pages 234–332, 2002. 60

[Delépine 2007] Olivier Delépine. *Contribution à l'intégration du pronostic en supervision Homme-Machine des systèmes complexes selon l'approche système dynamique hybride.* PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2007. 51, 52

[Dhaenens-Flipo 2005] Clarisse Dhaenens-Flipo. *Optimisation Combinatoire Multi-Objectif : Apport des Méthodes Coopératives et Contribution à l'Extraction de Connaissances.* PhD thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille, U.F.R. d'I.E.E.A., 2005. 125

[Directive 2001/16/CE 2001] Directive 2001/16/CE. *Directive 2001/16/CE relative à l'interopérabilité du système ferroviaire transeuropéen conventionnel.* Rapport technique, Parlement européen, 2001. 68

[Directive 2004/50/CE 2004] Directive 2004/50/CE. *Directive 2004/50/CE modifiant la directive 96/48/CE du Conseil relative à l'interopérabilité du système ferroviaire transeuropéen à grande vitesse et la directive 2001/16/CE du Parlement européen et du Conseil relative à l'interopérabilité du système ferroviaire transeuropéen conventionnel.* Rapport technique, Parlement européen, 2004. 68

[Directive 96/48/CE 1996] Directive 96/48/CE. *Directive 96/48/CE du Conseil relative à l'interopérabilité du système ferroviaire transeuropéen à grande vitesse.* Rapport technique, Parlement européen, 1996. 68

[Edkins 2007] Graham D. Edkins et Clare M. Pollock. *The influence of sustained attention on railway accidents.* Accident Analysis and Prevention, vol. 29, pages 533–539, 2007. 57

[EN50126 2000] EN50126. *EN50126 : Applications ferroviaires - Spécification et démonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité.* Rapport technique, 2000. 7

[EN50128 2001] EN50128. *EN50128 : Applications ferroviaires - Systèmes de signalisation, de télécommunication et de traitement.* Rapport technique, 2001. 7

[EN50129 2003] EN50129. *EN50129 : Applications ferroviaires - Systèmes électroniques de sécurité pour la signalisation.* Rapport technique, 2003. 7

[Encyclopædia Britannica] www.merriam-webster.com Encyclopædia Britannica. 30

[EPSF 2009] EPSF. *Conditions d'autorisation de mise en exploitation d'un projet sur le RFN.* Rapport technique, 2009. vii, 9

[European Railway Agency 2008] European Railway Agency, UNISIG et EEIG ERTMS Users Group. *System Requirements Specification (SUBSET 026) Version 3.0.0.* Rapport technique, 2008. viii, 69, 71, 72, 150

[European Railway Agency 2010] European Railway Agency. *Railway Safety Performance in the European Union.* Rapport technique, ERA, 2010. 24

[Fadier 1994] E. Fadier. Ouvrage collectif, sous la direction de fadier e., l'état de l'art dans le domaine de la fiabilité humaine. collection ISdF, 1994. 21

[Festinger 1956] Leon Festinger, Henri Riecken et Stanley Schachter. When prophecy falls. Harper-Torchbooks, 1956. 25, 58

[Fossion 2007] P. Fossion et P. Linkowski. *La pertinence du concept de résilience en psychiatrie.* In Rev Med Brux, 2007. 31

[Gajewski 2006] Jean-François Gajewski, Christine Bezard et André Cabarbaye. *De la sûreté de fonctionnement à la résilience des systèmes.* In 16ème congrès de Maîtrise des Risques et de la Sûreté de Fonctionnement, 2006. 30

[Goussé 2005] V. Goussé. Apport de la génétique dans les études sur la résilience : l'exemple de l'autisme. Annales Médico-Psychologiques, 2005. 31

[Granjon 2003] Yves Granjon. Automatique - systèmes linéaires, non linéaires, à temps continu, à temps discret, représentation d'état. Dunod, 2003. 39

[Guelton 2003] Kevin Guelton. *Éstimation des caractéristiques du mouvement humain en station debout. Mise en oeuvre d'observateurs flous sous forme descripteur.* PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2003. 41

[Hardy 2010] Karim Hardy. *Contribution à l'étude d'un modèle d'accident systémique. Le cas du modèle STAMP : Application et pistes d'amélioration.* PhD thesis, École National Supérieure des Mines de Paris, 2010. 23

[Heurtel 2003] A. Heurtel. *La gestion des RISQUES TECHNIQUES (Sûreté de Fonctionnement) et des RISQUES DE MANAGEMENT.* Rapport technique, CNRS IN2P3/LAL, 2003. 13, 28, 29

[Holling 1973] C.S. Holling. *Resilience and stability of ecological system.* Annual Review of Ecological Systems, vol. 4, pages 1–23, 1973. 31, 35

[Hollnagel 2004] Eric Hollnagel. Barriers abd accident prevention. Ashgate Publishing Ltd., 2004. vii, 22

[Hollnagel 2006] Eric Hollnagel et D.D. Woods. Resilience engineering : concepts and precepts, chapitre Epilogue : Resilience Engineering Precepts. Ashgate Publishing Ltd., 2006. 32, 34

[IEC62290-2 2011] IEC62290-2. *IEC 62290-2 : Applications ferroviaires - Systèmes de contrôle/commande et de gestion des transports guidés urbains.* Rapport technique, 2011. 7

[Kervern 2005] Georges Yves Kervern. *Émergence et histoire des cindyniques. Déconstruction de la destruction.* In Colloque Intelligence de la Complexité, Epistémologie et Pragmatique, 2005. 25

[Kervern 2006] G.Y. Kervern. La théorie de la description appliquée à l'essentiel des cindyniques. 2006. 43

[Kirwan 1997] Barry Kirwan. *Validation of human reliability assessment techniques :part2 - Validation results.* Safety Science, vol. 27, pages 43–75, 1997. 18

[Kumamoto 1996] H. Kumamoto et J.H Enrets. Probabilistic risk assessment and management for engineers and scientists. 1996. vii, 21, 22

[Lannoy 2008] André Lannoy. Maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement, repères historiques et méthodologiques. Lavoisiser, 2008. 23, 26

[Lavoille] Dominique Lavoille. *Étude sur la flottabilité et la stabilité du navire suivie d'une méthode simple pour le calcul des volumes de carènes et des éléments définissant le navire pour construire les tables hydrostatiques nécessaires aux calculs de stabilité et d'assiette quand on dispose des plans des formes du navire.* vii, 36, 37

[Le Moigne 1999] Jean Louis Le Moigne. La modélisation de systèmes complexes. Dunod, 1999. 26, 30

[Legrand 2010] Cyril Legrand. *Mise en place d'un protocole expérimental sur la plateforme ERTMS pour l'évaluation de la stabilité humaine*, 2010. Rapport de stage. 71

[Li 2010] Dong Li, Jingying Li et Zhigang Zheng. *Measuring nonequilibrium stability and resilience in an n-competitor system.* Nonlinear Analysis : Real World Applications, vol. 11, pages 2016–2022, 2010. 35

[Ligeron 2006] Jean Claude Ligeron. Le cercle des fiabilistes disparus ou critique de la raison fiabiliste. Édition préventique, 2006. 26, 28

[Liu 2003] X. Liu et Q. Zhang. *New approches to H^∞ controller designs based on fuzzy observers fot T-S fuzzy systems via LMI.* Automatica, 2003. 41

[Lundberg 2006] Jonas Lundberg et Björn Johanson. *Resilience, stability and requisite interpretation in accident investigations.* In Proceedings if the Second Resilience Engineering Symposium, pages 191–198. (Eds.) Hollnagel, E. & Rigaud, E., 2006. 34, 35

[Lundberg 2007] Jonas Lundberg et Björn Johanson. *Pragmatic resilience.* In Linköping Electronic Conference N°23, 2007. 34

[Luong 2006] Hong-Viet Luong. Mémoire de fin d'études : Reconnaissance multimodale de gestes de communication non verbale. 2006. ix, 123

[Martin 2005] S. Martin. *La résilience dans les modèles de systèmes écologiques et sociaux.* PhD thesis, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2005. 31

[Mitchell 2010] Diane Khul Mitchell et Chameta Samms. *Predicting the consequences of workload management strategies with human performance modeling.* In Modsim World, conference and expo, 2010. viii, 62

[MODSAFE 2011] MODSAFE. *MODSAFE - WP7 - D7.2, Draft Report, Acceptance, approval, cerification, list of elementary activity modules.* Rapport technique, European Commission, Seventh Framework programme MODSafe Modular Urban Transport Safety and Security analysis, 2011. Dissemination level : Restricted. vii, 11

[MODURBAN 2009] MODURBAN. *D93 - Conformity assessment, guidelines for functional and technical specification.* Rapport technique, 2009. 13

[Mohamad 2009] N. Mohamad, E. Lefrançois, P. Sergent et P. Debaillon. *Analyse de la réponse dynamique d'un navire pour la modélisation numérique du squat dans un canal.* In 19ème Congrès Français de Mécanique, 2009. 36

[Munier 2006] Bertrand Munier et Céline TEA. Systèmes d'information pour la gestion des risques : intégration de données objectives et de données subjectives. "Facteurs socio-culturels de réussite du retour d'expérience" Colloque de suivi du 6 décembre 2006, 2006. 23

[Murray 1993] Richard M. Murray et Zexiang Li ans S.Shankar Sastry. A mathemical introduction to robotic. CRC Press, 1993. 40

[Nkambou 2004] Roger Nkambou et Vincent Heritier. *Reconnaissance émotionnelle par l'analyse des expressions faciales dans un tuteur intelligent affectif.* In Canada, Colloque TICE, 2004. 123

[Pimm 1984] S. Pimm. *The complexity and stability of ecosystem.* Nature, vol. 307, pages 321–326, 1984. 31

[Polet 2002] Philippe Polet. *Modélisation des franchissements de barrières pour l'analyse des risques des systèmes Homme-Machine.* PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2002. 15

[Poupon 2006] Yves Poupon et Pascal Arnould. Mécanique : choix d'un matériau polymère injectable. 2006. 31

[Pérez-Espana 1999] H. Pérez-Espana et F. Arreguí-Sánchez. *Complexity related to behavior of stability in modelled coastal zone ecosysteme.* Aquatic Ecosystem Health and Management, vol. 2, pages 129–135, 1999. vii, 37, 39

[Rasmussen 1982] Jens Rasmussen. *Human errors. A taxonomy for describing human malfunction in industrial installation.* Journal of Occupational Accidents, vol. 4, pages 311–333, 1982. 16

[Reason 1990] James Reason. Human error. Cambridge University Press, 1990. 16

[Reitzman 2005] Igor Reitzman. Richesse et puissance de la dissonance cognitive. 2005. 59

[Richard 2008a] Philippe Richard, Stephen Queva, Rudy Dahyot et Frédéric Vanderhaegen. *Prise en compte des facteurs humains dans la démonstration de la sécurité ferroviaire.* Conférence Internationale Francophone en Automatique, 2008. 10, 19, 21

[Richard 2008b] Philippe Richard, Frédéric Vanderhaegen, Vincent Benard et Patrice Caulier. *Human stability toward a risk indicator in guided transport.* In European Annual Manual, 2008. 49

[Richard 2008c] Philippe Richard, Frédéric Vanderhaegen, Vincent Benard et Patrice Caulier. *La stabilité humaine dans les transports guidés : vers un indicateur de risques.* In Ergo'IA, 2008. 49

[Richard 2010a] Philippe Richard, Vincent Benard, Frédéric Vanderhaegen et Patrice Caulier. *Towards the « Human stability » in Transportation systems : concept and objectives.* In IFAC Human Machine System, 2010. 57, 60

[Richard 2010b] Philippe Richard, Vincent Benard, Frédéric Vanderhaegen et Patrice Caulier. *Vers le concept de stabilité humaine pour l'amélioration de la sécurité des transports.* In Lambda Mu 17, 2010. 57

[Richard 2011] Philippe Richard, Vincent Benard, Frédéric Vanderhaegen et Patrice Caulier. *Towards the « Human stability » concept in order to improve safety in transport systems.* In IEEE Industrial Engineering and Engineering Management, 2011. 60

[Robert 2006] Thomas Robert. *Analyse biomécanique du maintien de l'équilibre debout suite à une accélération transitoire de la surface d'appui : Application à l'amélioration de la protection des passagers de transports en commun.* PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2006. 88, 105

[Rodriguez 1999] Sabine Rodriguez. *Sur la simulation logicielle des arbres de défaillances par des modèles neuronaux appliquée à des systèmes industriels.* PhD thesis, Université de Paris VI, 1999. 14

[Schneider Electric 2004] Schneider Electric. *La Sûreté de Fonctionnement (SdF)*, intersections - le magazine schneider electric de l'enseignement technologique et professionnel édition, Novembre 2004. vii, 28, 29

[Sourisse 1996] L. Sourisse C. Boudillon. La sécurité des machines automatisées. mars-avril 1996. 13, 14

[Sperandio 1980] Jean Claude Sperandio. La psychologie en ergonomie. Presse Universitaire de France, 1980. 57

[Stamatelatos 2002] M. Stamatelatos. *Probabilistic Risk Assessment Procedure Guide for NASA Managers and Practitioners*, 2002. 21

[Stewart 1991] B.S. Stewart et C.C. White. *Multiobjective A*.* Journal of the ACM, vol. 38(4), pages 775–814, 1991. 125

[Swain 1983] A.G. Swain et H.E. Guttmann. *Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications.* NUREG/CR-1278, 1983. 18, 20

[Tanaka 1994] K. Tanaka et M. Sano. *A robust stabilization problem of fuzzy control systems and its application to backup control of a truck-trailer.* IEEE transactions on fuzzy systems, vol. 2, pages 119–134, 1994. 41

[Tian 2005] Ying-Li Tian, Takeo Kanade et Jeffrey F. Cohn. Facial expression analysis, chapitre 11, pages 247–275. Springer, 2005. 123

[Tirmant 2004] Hélène Tirmant. *Synthèse de lois de commande pour les modèles flous de type Takagi-Sugeno : application à un prototype de véhicule à deux roues.* PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2004. 41

[Ulungu 1995] E.L. Ulungu et J. Teghem. *The two phases method : An efficient procedure to solve bi-objective combinatorial optimization problems.* Foundation of computing and decision science, vol. 20, pages 149–156, 1995. 124

[Vanderhaegen 1997] F. Vanderhaegen. *Multilevel organization design : the case of the air traffic controller's.* Control Engineering Practise, vol. 5, pages 391–399, 1997. 60

[Vanderhaegen 2001] F. Vanderhaegen. *A non-probabilistic prospective and retrospective human reliabity analysis method - application to railway system.* Reliability Engineering and System Safety, vol. 71, pages 1–13, 2001. 21

[Vanderhaegen 2003] F. Vanderhaegen. Analyse et contrôle de l'erreur humaine. Hermes Science Publications, 2003. 15, 19, 60

[Villemeur 1988] A. Villemeur. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, 1988. 28

[Wei 2007] Kunlin Wei, Tjeerd M. H. Dijkstra et Dagmar Sternad. *Passive stability and active control in a rhythmic task.* Neurphysiol, vol. 99, pages 2633–2646, 2007. 58

[Wei 2008] Kunlin Wei, Tjeerd M. H. Dijkstra et Dagmar Sternad. *Stability and variability : indicators for passive stability and active control in a rhythmic task.* Neurophysiol, vol. 99, pages 3027–3041, 2008. 58

[Winter 2009] Peter Winter, Jens Braband, Paolo De Cicco, Patrick Deutsch, Poul Frosig, Klaus Konrad, Libor Lochman, Dan Mandoc, Harald Reisinger, Bernhard Stamm, Jaime Tamarit et Ekkehard Wendler. Compendium on ertms europen rail traffic management system. Eurail Press, 2009. viii, 69, 70, 71

[Yerkes 1908] R.M. Yerkes et J.D. Dodson. *The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation.* Journal of comparative neurology and psychology, vol. 31, pages 519–537, 1908. 61

[Zieba 2007] Stéphane Zieba, David Jouglet, Philippe Polet et Frédéric Vanderhaegen. *Resilience and affordances : perspectives for human-robot cooperation ?* In European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control, 2007. 32

[Zwingelstein 2000] Gilles Zwingelstein. *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes.* Techniques de l'Ingénieur, traité Informatique industrielle, 2000. 29

Glossaire

ACIH Analyse des Conséquences de l'Infiabilité Humaine. 19, 21, 127

ACP Analyse en Composantes Principales. 124

ALARP As Low As Reasonably Practicable. 12, 34

AMDEC Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité. 14, 15, 19, 20, 127

AOT Autorité Organisatrice des Transports. 8, 10

APR Analyse Préliminaire de Risques. 13, 14, 20, 127

BEATT Bureau d'Enquête et Accident de Transport Terrestre. 23

BIBO Bounded Input Bounded Output. 49

CDV Circuit De Voie. 70

CENELEC Comité Européen de la Normalisation Electrotechnique. 7

DDE Direction Départementale de l'Équipement. 8

DDS Dossier de Définition de Sécurité. 8–10

DMI Driver Machine Interface. 69, 71, 72, 80, 94, 96, 113, 128

DPS Dossier Préliminaire de Sécurité. 8–10

DRIEA Direction Régionale et Interdépartementale de l'Équipement et de l'Aménagement d'Ile-de-France. 8

DS Dossier de Sécurité. 8–10

DTS Dossier Technique de Sécurité. 9, 10

E/E/PE Electrical/Electronic/Programmable Electronic. 7

EBI European Railway Agency. 82

EOQA Expert ou Organisme Qualifié Agréé. 8, 9

EPSF Étalissement Public de Sécurité Ferroviaire. 8, 9

ER Évenements Redoutés. 13

ERA European Railway Agency. 69

ERTMS European Rail Traffic Management System. i, 1, 3, 6, 65, 69–76, 79, 80, 82–84, 99, 104, 106, 109, 113, 128, 129, 154, 161

ESTAS Évaluation des systèmes de transports Automatisés et de leur Sécurité. i, 2, 71

ETCS European Train Control System. 3, 65, 69, 70, 72–76, 78–80, 82–84, 99, 104, 106, 109, 113, 128, 129, 161

EVC European Vital Computer. 69

FS Full Supervision. 71, 75, 76, 78, 97, 98, 109

GAME Globalement Au Moins Équivalent. 12, 34

GSM Global System for Mobile communication. 69, 70

HAZOP HAZardous OPerability. 19–21, 127

HCR Human Cognitive Reliability. 17, 21

IFSTTAR Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. i, 71

IMDR Institut pour la Maîtrise Des Risques. ii, 28

ITERATE IT for Error Remediation And Trapping Emergencies. 6

KVB Contrôle de Vitesse par Balises. 24, 68, 113

LZB Linienzugbeeinflussung (littéralement : contrôle linéaire des trains). 68

MODSAFE Modular Urban Transport Safety and Security Analysis. 6

MODURBAN Modular Urban Guided Rail Systems. 6

NP No Power. 71

OS On Sight. 71, 76, 78, 109

P Permitted. 81–83, 94, 110

PANsafer Passage À Niveau plus sûr. 6

PCC Poste de Contrôle Commande. 76

REX Retour d'EXpérience. 23, 34, 35, 127

RFF Réseau Ferré de France. 10, 73

RFN Réseau Ferré National. 8–10

SB Stand By. 71

SBI European Railway Agency. 82

SIL Safety Integrated Level. 7

SNCF Société Nationale des Chemins de Fer. 10, 23

SPADs Signals Passed At Dangers. 23

STM Specific Transmission Module. 70

STRMTG Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés. 8

T-S Takagi-Sugeno. 41

TESEO Tecnica Empirica Stuma Errori Operati. 17, 21

THERP Technique for Human Error Rate Prediction. 18–20, 127

TR TRip. 71

TVM Contrôle de Vitesse par Balises. 68

UE Union Européenne. 1, 6, 7, 69

UGTMS Urban Guided Transport Management System. 6

UNISIG Union Industry of Signalling. 69

VACMA Veille Automatique par Maintien d'Appui. 25, 54

W Warning. 81, 82

Annexes

Annexe 1 : Article du décret du 1er juillet 2004

Article 2 modifié par l'arrêté du 19 février 2010

La démonstration de la satisfaction aux exigences relatives aux caractéristiques techniques des matériels roulants dont la circulation est prévue sur le réseau ferré national est apportée à l'aide des dossiers prévus au titre V du décret n° 2006-1279 du 19 octobre 2006 relatif à la sécurité des circulations ferroviaires et à l'interopérabilité du système ferroviaire. En vue de pourvoir à la sécurité des personnes, au bon fonctionnement du système ferroviaire et à la préservation de l'environnement, ces dossiers, rédigés en français, font référence aux prescriptions techniques ainsi qu'aux recommandations et règles de l'art représentatives de l'expérience acquise en matière de matériel roulant, figurant en annexe au présent arrêté. La conformité, dans leur domaine de pertinence, à ces prescriptions, recommandations et règles de l'art, assure le respect des prescriptions auxquelles doivent satisfaire les matériels roulants appelés à circuler sur le réseau ferré national.

Lorsque des écarts par rapport à ce référentiel sont envisagés, les dossiers comportent une analyse de ces écarts, ainsi que les études de sûreté de fonctionnement et les analyses de risques qui ont été menées afin de démontrer que les solutions proposées permettent l'obtention d'un niveau global de sécurité au moins équivalent à celui offert par des matériels existants assurant des services comparables sur le réseau ferré national.

Annexe 2 : Tables nécessaires à la méthode APR

Matrice de gravité

Gravité	Classe
G1	Mineure
G2	Significative
G3	Critique
G4	Grave
G5	Catastrophique

Échelle de vraisemblance

Vraisemblance	Classe	Probabilités
V1	Improbable	$P_1 < 10^{-7}$
V2	Très rare	$10^{-6} < P_2 < 10^{-5}$
V3	Rare	$10 - 5 < P_3 < 10^{-4}$
V4	Possible	$10^{-4} < P_1 < 10^{-3}$
V5	Fréquent	$10^{-3} < P_1 < 10^{-2}$

Table de criticité

	Degré de gravité			
Fréquence d'occurrence	4	3	2	1
Fréquent	C1	C1	C1	C1
Probable	C2	C1	C1	C1
Occasionnel	C2	C1	C1	C1
Rare	C3	C2	C1	C1
Improbable	C3	C3	C2	C2
Invraisemblable	C3	C3	C3	C3

C1	Inacceptable. Mesure de réduction du risque à mettre en place
C2	Acceptable sous condition
C3	Acceptable

Annexe 3 : Description fonctionnelle des méthodes

l'AMDEC

Elle définit un niveau de priorité des risques (NPR) (I.1) :

$$NPR = F * G * D \tag{1}$$

où F représente la fréquence d'apparition d'une défaillance, G la gravité perçue par le « client / consommateur » et D le risque de non détection de la défaillance. En fonction de ce NPR des actions prioritaires sont déclenchées, réalisées et suivies.

L'application de cette méthode peut s'effectuer en suivant ces étapes :

1. définir l'objectif à atteindre et le champ d'application,
2. définir le demandeur par exemple le client et le décideur (le chef de projet),
3. définir l'équipe AMDEC qui doit être pluridisciplinaire,
4. effectuer une analyse fonctionnelle du système,
5. effectuer une analyse qualitative des défaillances en effectuant un recensement des modes de défaillances, des causes et de leurs effets,
6. effectuer une analyse quantitative des défaillances c'est-à-dire pour chaque mode de défaillances prédéfini, évaluer la gravité, la fréquence d'occurrence et le risque de non détection puis en déduire le NPR,
7. déterminer le NPR critique,
8. préparer un plan d'action,
9. appliquer et suivre le plan d'action,
10. vérifier l'efficacité des solutions.

La méthode du nœud papillon

Le nœud papillon est un outil qui combine un arbre des causes et un arbre d'évènements.

Le point central du Nœud Papillon, appelé ici évènement Redouté Central, désigne généralement une perte de confinement ou une perte d'intégrité physique (décomposition). La partie gauche du Nœud Papillon s'apparente alors à un arbre des défaillances s'attachant à identifier les causes de cette perte de confinement. La partie droite du Nœud Papillon s'attache, quant à elle, à déterminer les conséquences de cet évènement redouté central tout comme le ferait un arbre d'évènements. Sur ce schéma, les barrières de sécurité sont représentées sous la forme de barres verticales pour symboliser le fait qu'elles s'opposent au développement d'un scénario d'accident. De fait, dans cette représentation, chaque chemin conduisant d'une défaillance d'origine (évènement indésirable ou courant) jusqu'à l'apparition de dommages au niveau des cibles (effets majeurs) désigne un scénario d'accident particulier pour un même évènement redouté central. Cet outil permet d'apporter une démonstration renforcée de la bonne maîtrise des risques en présentant clairement l'action de barrières de sécurité sur le déroulement d'un accident.

L'arbre des causes MAC

L'arbre des causes ou arbre de défaillances propose une représentation graphique des évènements qui aboutissent à l'occurrence d'un évènement redouté. Cette méthode est déductive, c'est-à-dire que chaque niveau de l'arbre est constitué d'évènements qui sont générés par l'évènement du niveau supérieur. Le processus s'arrête lorsque l'évènement élémentaire est atteint. (*cf. A.1*).

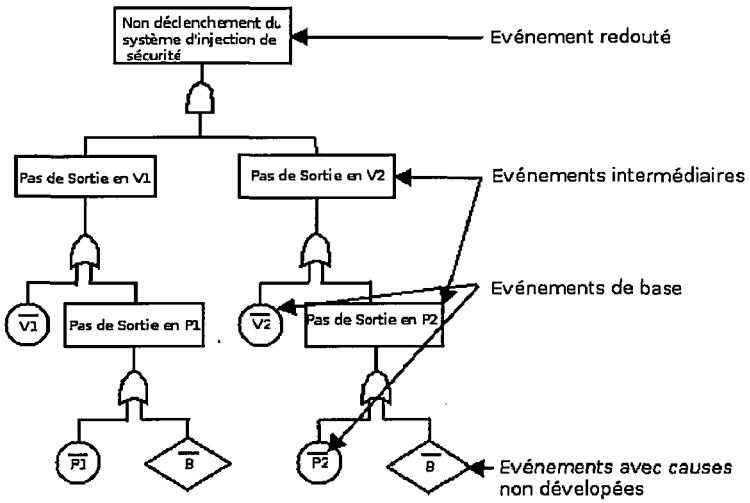


Figure A.1 – Arbre des causes du système d'injection de sécurité d'une centrale nucléaire

Après cette représentation qualitative, la phase quantitative de la méthode repose sur l'expression logique qui mène à l'évènement redouté. L'équation appliquée à l'évènement ci-dessus est définie par (I.2) :

$$\overline{RIS} = ((\overline{B} + \overline{P1}) + \overline{V1}).((\overline{B} + \overline{P2}) + \overline{V2}) = \overline{B} + \overline{P1}.\overline{P2} + \overline{P1}.\overline{V2} + \overline{V1}.\overline{P2} + \overline{V1}.\overline{V2} \quad (2)$$

Cette méthode permet donc de déterminer les causes d'un évènement redouté. Elle est néanmoins plus difficile à mettre en pratique pour les systèmes complexes du fait des nombreuses interactions entre les différents composants.

L'arbre des conséquences MACQ

L'arbre des conséquences est une méthode déductive. Elle représente les séquences d'évènements. Cette représentation peut se faire qualitativement et quantitativement. L'arbre démarre sur un évènement initiateur suivi d'une combinaison de fonctionnements et de défaillances du système. L'objectif final est de fournir une probabilité d'occurrence d'un évènement en tenant compte des liens entre évènements, les probabilités étant à utiliser avec prudence.

La méthode HAZOP

Pour chaque partie du système étudié, la génération des dérives est effectuée de manière systématique par la conjonction :

- de paramètres associés au système étudié,
- de mots-clés comme « pas de » ; « plus de » ou « trop de ».

La procédure de la méthode HAZOP se divise en plusieurs phases :

1. choisir une ligne ou une maille (un équipement et ses connexions),
2. définir un paramètre,
3. retenir un mot-clé associé au paramètre,
4. vérifier que la dérive est crédible. Si oui passer au point suivant, si non revenir au point précédent,
5. identifier les causes et les conséquences potentielles de cette dérive,
6. examiner les moyens de détecter ces dérives,
7. proposer, le cas échéant, des améliorations ou des recommandations,
8. retenir un nouveau mot-clé pour le même paramètre et revenir au point 3,
9. lorsque tous les mots-clés pour le paramètre ont été considérés, choisir un nouveau paramètre et revenir au point 2,
10. lorsque tous les paramètres et mots-clés ont été considérés, remplir le tableau *A.1.*

Tableau A.1 – *Tableau de la méthode HAZOP*

Numéro de la ligne								
N°	Mot-clé	Paramètre	Cause(s)	Conséquence(s)	Détection	Sécurité(s) existante(s)	Proposition(s) d'amélioration(s)	Observation(s)

La méthode TESEO

Cette méthode permet d'obtenir rapidement une probabilité d'erreur humaine par la multiplication de cinq coefficients. Ces coefficients sont déterminés par des tables prédéfinies en fonction des caractéristiques supposées connues de la tâche de l'opérateur humain.

$$P(E) = K_1 * K_2 * K_3 * K_4 * K_5 \qquad (3)$$

Avec K_1 : type d'activité, complexité, K_2 : temps disponible, stress temporel, K_3 : caractéristiques de l'opérateur (formation, expérience), K_4 : anxiété due à l'activité (gravité de la situation), K_5 : caractéristiques ergonomiques des interfaces et environnement.

La méthode HCR

Cette méthode permet de calculer la probabilité de non réponse à un stimulus. Ce calcul s'effectue en fonction du temps et du type de comportement cognitif dominant.

Cette méthode propose une classification des tâches selon les trois types de comportement proposés par Rasmussen qui sont :

- les habilités,
- les règles,

- les connaissances.

Cette méthode comporte 3 étapes :

1. Sélection du type cognitif dominant
2. Estimation du temps médian pour réaliser la tâche
3. Détermination de la fiabilité des opérateurs pour une tâche donnée

$$P(E) = f_i(\frac{t}{T_{1/2}(1+K_1)(1+K_2)(1+K_3)}) \tag{4}$$

avec : t, temps disponible $T_{1/2}$, le temps nécessaire K_1, compétence de l'opérateur K_2, niveau de stress K_3, qualité de l'interface

La méthode THERP

Cette méthode permet de prédire l'erreur humaine en terme de probabilité et ceci pendant une tâche.

$$P(E) = P_1 * k * P_2 \tag{5}$$

où $P(E)$ représente la probabilité d'erreur, P_1 la probabilité de base et P_2 la probabilité de non récupération de l'erreur. On obtient donc pour chaque tâche une probabilité de succès ou d'échec de la tâche, puis une probabilité de succès ou d'échec pour la tâche suivante en fonction de la probabilité de succès ou d'échec de la tâche précédente comme le montre la figure *A.2*.

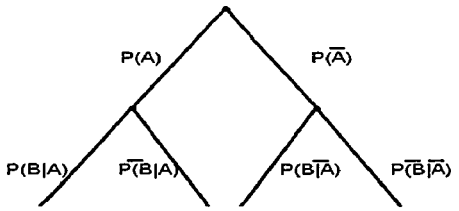


Figure A.2 – La méthode Therp

Exemple d'APR et d'AMDEC

Exemple d'APR (partie gauche) et d'AMDEC (partie droite)

N°	Danger	Situation dangereuse	Cause	Évènements redoutés	Cause amorce	Traitements déjà existants	Conséquences	G	V	C	Actions de maîtrise des risques	G	V	C	Gestion du risque résiduel
1	Brouillard	Arrivée du train sur la mauvaise voie	Signalisation non efficace	Collision avec autre train	Erreur SNCF (position aiguillage)	Embranchement privé partant de la voie	fuite de produit	4	3	2	Taquet de déraillement dédié et vannes d'isolement	2	2	1	Aucune action à entreprendre
2	Procédure mal appliquée	Manœuvre des wagons sur voie occupée	Agent de conduite mal formé	Collision avec autre train	Absence de contrôle par OH	Présence de 2 opérateurs et formation des opérateurs	Fuite	4	2	2	Interruption des déchargements et vannes d'isolement	2	2	1	Aucune action à entreprendre
3	Obscurité	Wagons mal positionnés, arrêt train tardif	Signalisation latérale mal perçue	Déraillement	Défaut de liaison entre opérateur et agent de conduite	Formation agent de conduite et opérateur et site éclairé en permanence	Sortie de voie	2	4	2	Sabot sur voie et présence butoir	1	4	1	Aucune action à entreprendre
4	Voies ferrées	Sortie de voie d'un wagon	Voies mal entretenues et écartement voies non conforme	Déraillement train avec renversement	Vitesse excessive	Entretien annuel voie, contrôle des voies et formation agent de conduite	Sortie de voie sans dégât matériel et fuite	3	3	2	SNCF appelé pour remettre wagon sur les voies	2	3	1	Aucune action à entreprendre

Équipement	Fonction	Mode de défaillance	Causes	Effet local	Effet intermédiaire	Effet final	F	G	C	Actions correctives
Signalisation	Sécurise la voie	Panne signalisation	Rupture alimentation électrique	Pas de signalisation	néant	Collision	4	3	2	Néant
Voie ferrée	Transfert marchandise	Casse	Entretien insuffisant	Déraillement	Néant	Accident	3	3	2	Entretien plus régulier

Annexe 4 : Transitions des modes ERTMS/ETCS tirés de [European Railway Agency 2008]

4.6 Transitions between modes

4.6.1 Symbols

4.6.1.1 The indication "**4>**" means: The condition n°4 must be fulfilled to trigger the transition

4.6.1.2 From the mode located in the column

4.6.1.3 To the mode that is indicated by the arrow "**>**".

4.6.1.4 Each transition from a given mode receives a priority order (indicated by "**-px-**", x is the priority order) to avoid a conflict between the different transitions when they occur at the same time (i.e. in the same clock cycle). P1 has a higher priority than P2.

4.6.1.5 Some transitions have received the same priority order. This has been decided when it is obvious that these transitions cannot occur at the same time, and so can never lead to a conflicting situation (for example, the RBC cannot give in the same time a MA for FS and a MA for OS to a given engine, this is why the transition "from SR to FS" and the transition "from SR to OS" have the same priority order).

4.6.1.6 "16, 17, 18" means "16 or 17 or 18".

4.6.2 Transitions Table

NP	<29 -p2-	<29 -p2-	<29 -p2-	<29 -p2-	<29 -p2-	<29 -p2-	<29 -p2-	<29 -p2-	<29 -p2-	<29 -p2-	<29 -p2-	<29 -p2-	<29 -p2-			<29 -p2-	<2 -p2
4> -p2-	SB	<22 -p4-	<19, 27, 30 -p5-	<28 -p5-	<28 -p5-	<28, -p5-	<28, -p5-	<2, 3 -p3-	<28, 47 -p3-	<28, -p6-		<28, -p4				<28 -p6-	<2 -p4
		PS	<26 -p5-														
	5, 6, 50> -p7-	23> -p4	SH	<5,6, 50,51 -p6-	<5,6, 50,51 -p6-	<5,6, 51 -p6-	<5,6 50,51 -p6-			<5,61 -p7-	<68 -p4	<5,6, 50 -p5-				<5,61 -p7	
	10> -p7-			FS	<31,32 -p6-	<31,32 -p6-	<31,32 -p6-			<25 -p7-		<31 -p5-				<25 -p7-	
	70> -p7-			70,72> -p6-	LS	<72 -p6-	<70,74 -p6-			<71 -p7-		<70 -p5-				<71 -p7-	
	8,37> -p7-			37> -p6-	37> -p6-	SR	<37 -p6-			<44,45 -p4-		<8,37 -p5-				<44,45 -p4-	
	15> -p7-			15,40> -p6-	15,73> -p6-	40> -p6-	OS			<34 -p7-		<15 -p5-				<34 -p7-	
	14> -p5-	14> -p4						SL									
	46> -p6-		46> -p5-	46> -p6-	46> -p6-	46> -p6-	46> -p6-		NL								
	60> -p7-			21> -p6-	21> -p6-	21> -p6-	21> -p6-			UN	<62 -p4-					<21 -p7-	
	20> -p4-		49,52, 65> -p4-	12,16, 17,18, 20,41, 65,66, 69> -p4-	12,16, 17,18, 20,41, 65,66, 69> -p4-	18,20, 42, 43, 36, 54,65> -p4-	12,16, 17,18, 20,41, 65,66, 69> -p4-			67,39, 20> -p5-	TR					<67, 39,38, 20 -p5-	
											7> -p4-	PT					
	13> -p3-	13> -p3-	13> -p3-	13> -p3-	13> -p3-	13> -p3-	13> -p3-			13> -p3-	13> -p3-	13> -p3-	SF			<13 -p3-	<1 -p3
1> -p1-	1> -p1-	1> -p1-	1> -p1-	1> -p1-	1> -p1-	1> -p1-	1> -p1-	1> -p1-	1> -p1-	1> -p1-	1> -p1-	1> -p1-	1> -p1-	IS		<1 -p1-	<1 -p1
	58> -p7-			58> -p6-	58> -p6-	58> -p6-	58> -p6-			58> -p7-	63> -p4-					SN	
				59> -p6-	59> -p6-		59> -p6-										R

Figure 2: Transition table.

4.6.3 Transitions Conditions Table

Condition Id	Content of the conditions
[1]	The driver isolates the ERTMS/ETCS on-board equipment.
[2]	(a desk is open)
[3]	(no "go sleeping" input signal is received any more) AND (train is at standstill)
[4]	The ERTMS/ETCS on-board equipment is powered.
[5]	(train is at standstill) AND (ERTMS/ETCS level is 0 or NTC or 1) AND (driver selects Shunting mode)
[6]	(train is at standstill) AND (ERTMS/ETCS level is 2 or 3) AND (reception of the information "Shunting granted by RBC", due to a Shunting request from the driver)
[7]	(the driver acknowledges the train trip) AND (the train is at standstill) AND (the ERTMS/ETCS level is different from 0, NTC)
[8]	(Staff Responsible mode is proposed to the driver) AND (driver acknowledges) **{4}**
[9]	*Empty*
[10]	(valid Train Data is stored on board) AND (MA + SSP +gradient are on-board) AND (no specific mode is required by a Mode Profile)
[11]	*Empty*
[12]	(The train/engine overpasses the EOA/LOA with its min safe antenna position) AND (ERTMS/ETCS level is 1)
[13]	The ERTMS/ETCS on-board equipment detects a fault that affects safety
[14]	(The "sleeping" input signal is received) AND (train is at standstill) AND (all desks connected to the ERTMS/ETCS on-board equipment are closed)
[15]	(An ackn. request for On Sight is displayed to the driver) AND (the driver acknowledges) **see {1} here under**
[16]	(The train/engine overpasses the EOA/LOA with its min safe front end) AND (ERTMS/ETCS level is 2 or 3).
[17]	The onboard reacts according to a linking reaction set to "trip".
[18]	(the train/engine receives and uses a trip order given by balise) AND (override is not active)
[19]	(driver selects "exit Shunting") AND (train is at standstill).
[20]	(unconditional emergency stop message is accepted)
[21]	(ERTMS/ETCS level switches to 0) **see {2} here under**
[22]	(a desk is open) AND ("Stop Shunting on desk opening" information is stored onboard) .
[23]	(a desk is open) AND (no "Stop Shunting on desk opening" information is stored

	onboard)
[24]	*Empty*
[25]	(ERTMS/ETCS level switches to 1,2 or 3) AND (MA+SSP+gradient are on-board) AND (no specific mode is required by a Mode Profile)
[26]	(desks are closed) AND ("Continue Shunting on desk closure" function is active) AND (the "passive shunting" input signal is received)
[27]	(desks are closed) AND ("Continue Shunting on desk closure" function is not active)
[28]	(desks are closed)
[29]	the ERTMS/ETCS on-board equipment is NOT powered
[30]	(desks are closed) AND (no "passive shunting" input signal is received)
[31]	(MA+SSP+gradient are on-board) AND (no specific mode is required by a Mode Profile) AND (ERTMS/ETCS level is 2 or 3)
[32]	(MA+SSP+gradient are on-board) AND (no specific mode is required by a Mode Profile) AND (ERTMS/ETCS level is 1) AND (no trip order is given by balise)
[33]	*Empty*
[34]	(A Mode Profile defining an On Sight area is on-board) AND (The max safe front end of the train is inside the On Sight area) AND (The ERTMS/ETCS level switches to 1,2 or 3)
[35]	*Empty*
[36]	(the identity of the over-passed balise group is not in the list of expected balises related to SR mode) AND (override is not active).
[37]	(driver selects "override") AND (train speed is under or equal to the speed limit for triggering the "override" function) **see {3} here under**
[38]	(The ERTMS/ETCS on-board equipment is interfaced to the National System through an STM) AND (The ERTMS/ETCS level switches to 0,1,2 or 3) AND (Emergency Brake is commanded by this STM)
[39]	(The ERTMS/ETCS level switches to 1,2 or 3) AND (no MA has been accepted)
[40]	(A Mode Profile defining an On Sight area is on-board) AND (The max safe front end of the train is inside the On Sight area)
[41]	(T_NVCONTACT is passed) AND (associated reaction is "train trip")
[42]	(The train/engine overpasses the SR distance with its estimated front end) AND (override is not active)
[43]	(The train/engine overpasses the former EOA (when Override was activated) with the min safe antenna position) AND (override is not active), see {3} here under
[44]	("override" function is active) AND (ERTMS/ETCS level switches to 1) **see {3} here under**
[45]	("override" function is active) AND (no unconditional emergency stop message has been received) AND (ERTMS/ETCS level switches to 2 or 3) **see {3} here under**
[46]	(Driver selects NON LEADING) AND (train is at standstill) AND (The "non leading"

	input signal is received)
[47]	(no "non leading" input signal is received any more) AND (train is at standstill)
[48]	*Empty*
[49]	(reception of information "stop if in shunting") AND (override is not active)
[50]	(An ackn. request for Shunting is displayed to the driver) AND (the driver acknowledges) **see {5} here under**
[51]	(A Mode Profile defining the entry of a Shunting area is used on-board) AND (The max safe front end of the train is inside the Shunting area)
[52]	(the identity of the over-passed balise group is not in the list of expected balise groups related to SH mode) AND (override is not active).
[53]	*Empty*
[54]	(reception of information "stop if in Staff Responsible") AND (no list of expected balise groups related to SR mode has been received or the list of expected balise groups related to SR mode does not include the identity of the over-passed balise group) AND (override is not active)
[56]	(the ERTMS/ETCS level switches to "NTC")
[58]	(the ERTMS/ETCS level is "NTC") AND (an acknowledgement request for SN mode is displayed to the driver) AND (the driver acknowledges)
[59]	(train is at standstill) AND (driver has acknowledged the reversing) **see {6} here under**
[60]	(an acknowledgement request for UN mode is displayed to the driver) AND (the driver acknowledges)
[61]	(A Mode Profile defining a Shunting area is on-board) AND (The max safe front end of the train is inside the Shunting area) AND (The ERTMS/ETCS level switches to 1,2 or 3)
[62]	(the driver acknowledges the train trip) AND (the train is at standstill) AND (the ERTMS/ETCS level is 0) AND (valid Train Data is on-board)
[63]	(the driver acknowledges the train trip) AND (the train is at standstill) AND (the ERTMS/ETCS level is NTC) AND (valid Train Data is on-board)
[65]	(The system version number X of a received balise telegram is greater than the highest version number X supported by the on-board equipment) AND (ERTMS/ETCS level is 1, 2 or 3)
[66]	A balise group contained in the linking information is passed in the unexpected direction
[67]	(The ERTMS/ETCS level switches to level 1) AND (a trip order has been received) AND (override is not active)
[68]	(the driver acknowledges the train trip) AND (the train is at standstill) AND (the ERTMS/ETCS level is 0 or NTC) AND (no valid Train Data is on-board)
[69]	Estimated train front end is in rear of the start location of either SSP or gradient profile stored on-board

[70]	(An ackn. request for Limited Supervision is displayed to the driver) AND (the driver acknowledges) **see {7} here under**
[71]	(A Mode Profile defining a Limited Supervision area is on-board) AND (The max safe front end of the train is inside the Limited Supervision area) AND (The ERTMS/ETCS level switches to 1,2 or 3)
[72]	(A Mode Profile defining a Limited Supervision area is on-board) AND (The max safe front end of the train is inside the Limited Supervision area).
[73]	(A Mode Profile defining an On Sight area is on-board) AND (The max safe front end of the train is inside the On Sight area) AND (The estimated front end of the train is not inside an LS acknowledgement area)
[74]	(A Mode Profile defining a Limited Supervision area is on-board) AND (The max safe front end of the train is inside the Limited Supervision area) AND (The estimated front end of the train is not inside an OS acknowledgement area)

{1} The request to acknowledge On Sight is displayed to the driver only if certain conditions are fulfilled. These conditions are not specified here. See the "On Sight" procedure" of SRS-§5 (for transitions from FS/LS/UN to OS) and the "Start of mission" procedure (for transition from SB to OS).

{2} This transition to the Unfitted mode is also a transition of level.. For further information, See the "Level Transition" procedure" (SRS-§5) for transitions from FS/SR/OS/LS to UN and the "Start Of Mission" procedure" (SRS-§5) for transition from SB to UN.

{3} See the "Override" procedure" of SRS-§5.

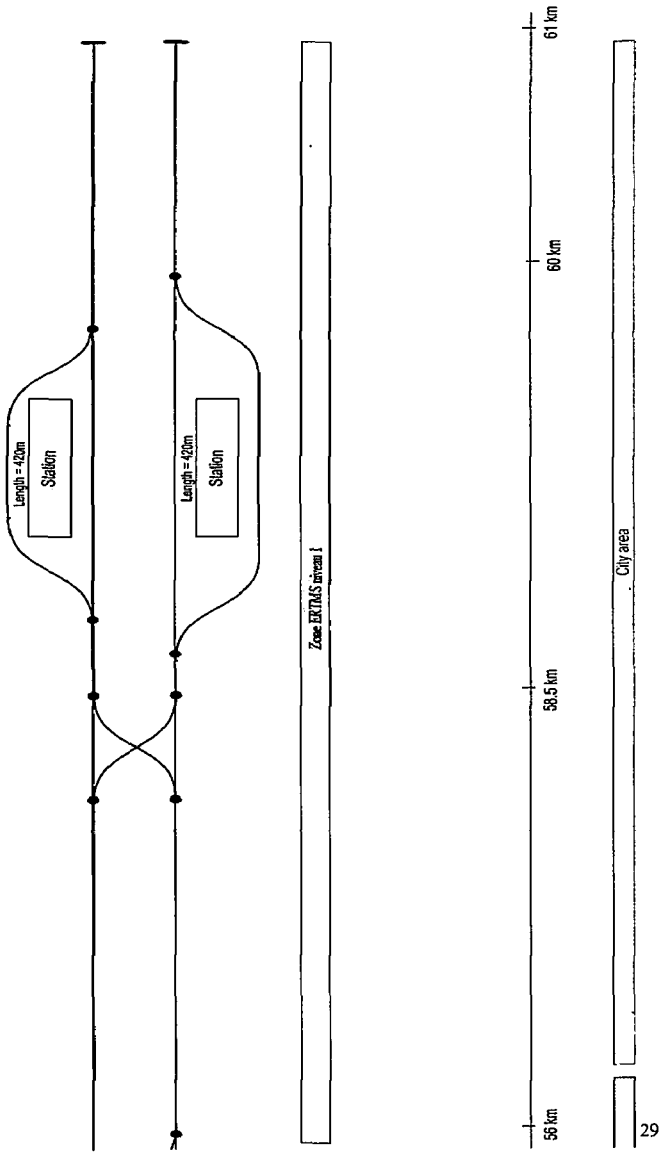
{4} The Staff Responsible mode is proposed to the driver only if certain conditions are fulfilled. These conditions are not specified here. See the "Start Of Mission" procedure and the "Train Trip" procedure of SRS-§5.

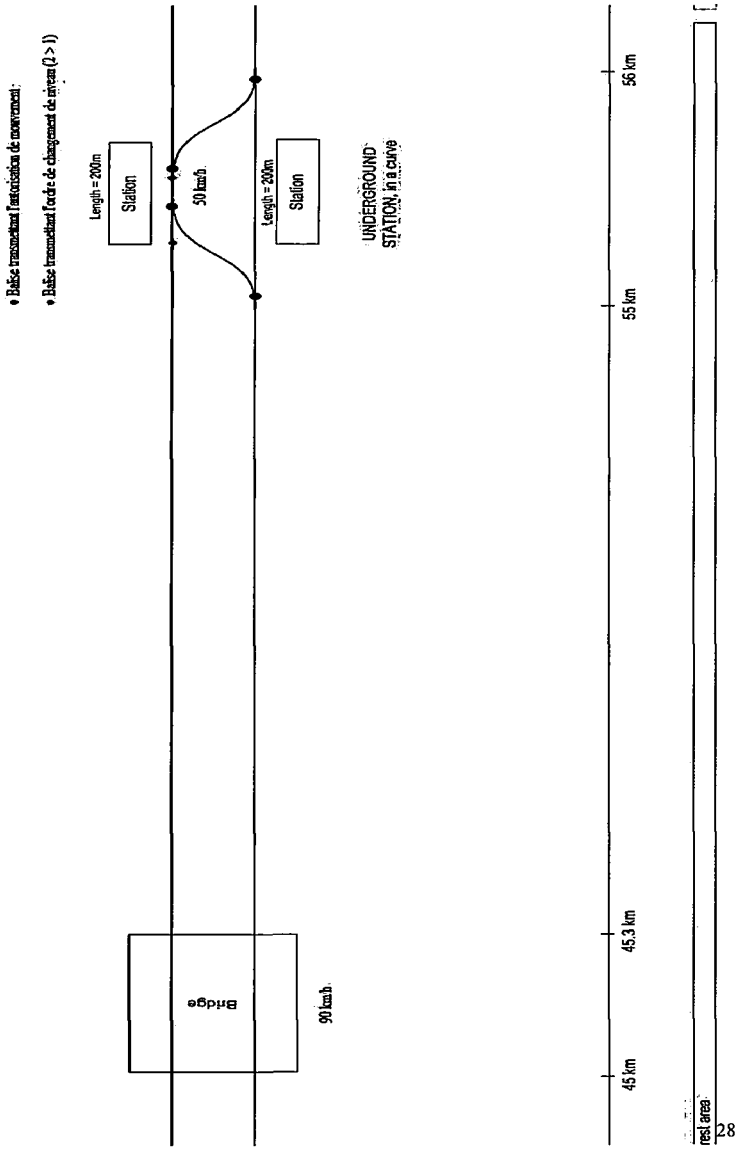
{5} The request to acknowledge Shunting is displayed to the driver only if certain conditions are fulfilled. These conditions are not specified here. See the "Entry in Shunting" procedure and the "Start Of Mission" procedure of SRS-§5.

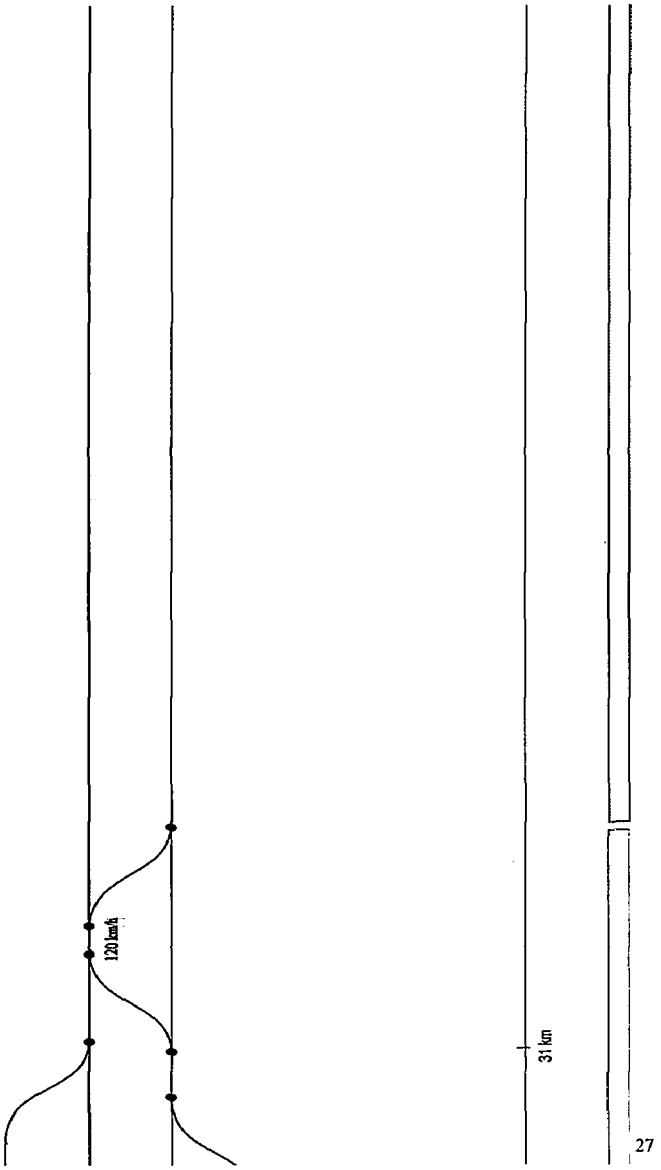
{6} The request to acknowledge Reversing is displayed to the driver when certain conditions are fulfilled. These conditions are not specified here. See the "reversing" procedure of SRS-§5.

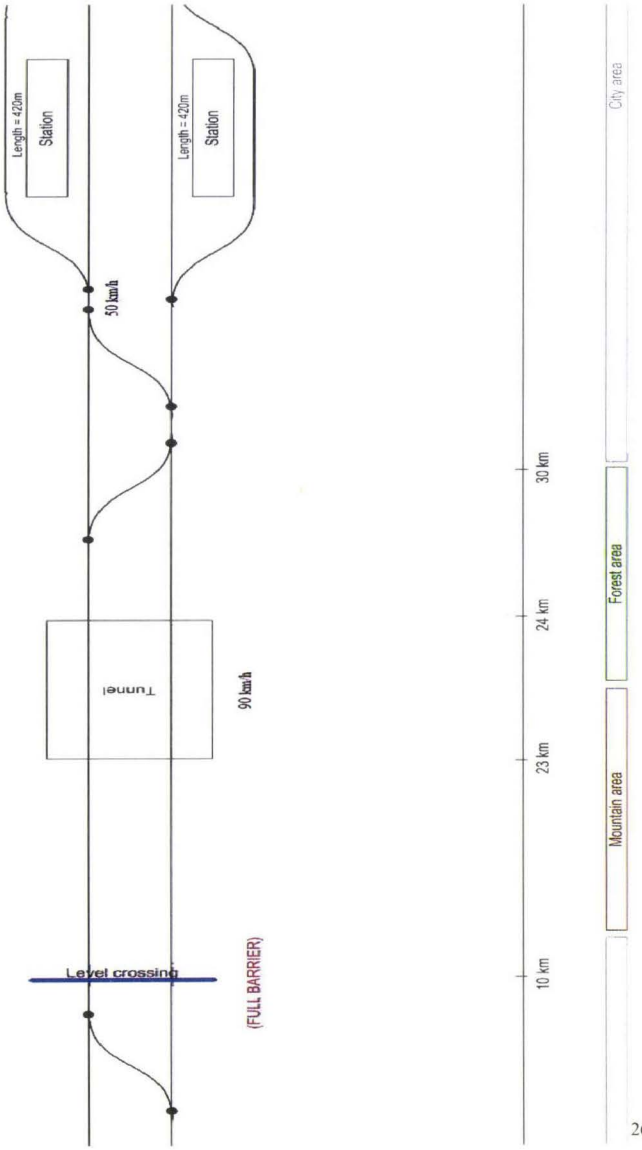
{7} The request to acknowledge Limited Supervision is displayed to the driver only if certain conditions are fulfilled. These conditions are not specified here. See the "Limited Supervision" procedure" of SRS-§5 (for transitions from FS/OS/UN to LS) and the "Start of mission" procedure (for transition from SB to LS).

Annexe 5 : Ligne ferroviaire de la plate-forme ERTMS

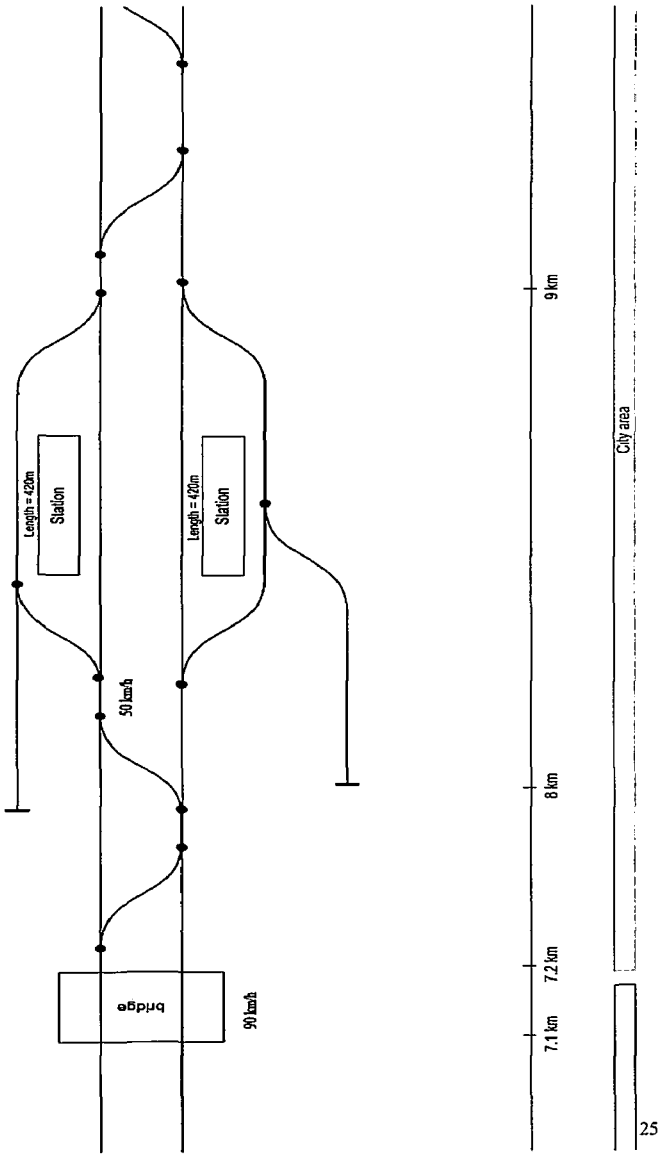


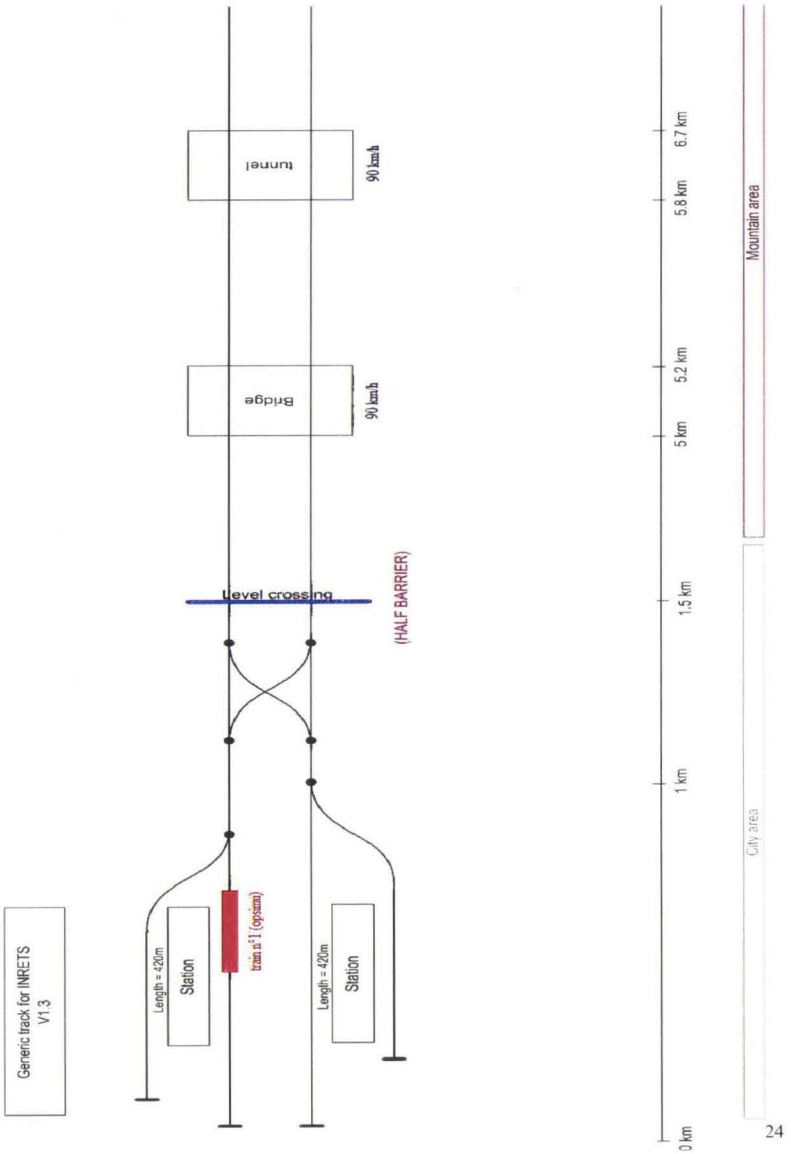

• Balise transmettant l'autorisation de mouvement
• Balise transmettant l'ordre de changement de niveau (2 -> 1)
Length = 200m
Station
50 km/h
Length = 200m
Station
UNDERGROUND
STATION, in a curve
Bridge
90 km/h
56 km
55 km
45.3 km
45 km
rest area
28


120 km/h
31 km
27


Length = 420m
Station
Length = 420m
Station
50 km/h
Tunnel
90 km/h
Level crossing
(FULL BARRIER)
10 km
23 km
24 km
30 km
Mountain area
Forest area
City area

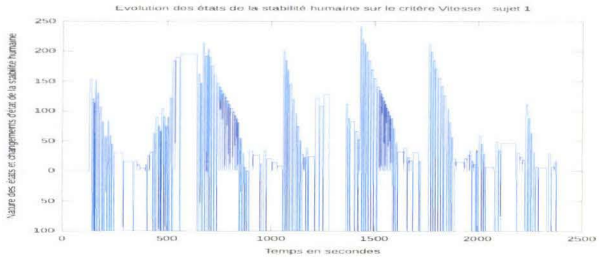
26


Length = 420m
Station
Length = 420m
Station
50 km/h
bridge
90 km/h
9 km
8 km
7.2 km
7.1 km
City area
25

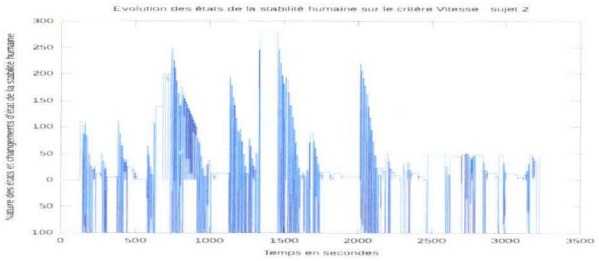

Generic track for INRETS
V1.3
Length = 420m
Station
train n°1 (optional)
Length = 420m
Station
Level crossing
(HALF BARRIER)
Bridge
90 km/h
tunnel
90 km/h
0 km
1 km
1.5 km
5 km
5.2 km
5.8 km
6.7 km
City area
Mountain area
24

Annexe 6 : Courbes des états et changements d'état de la stabilité humaine pour tous les critères, scénario sans perturbation

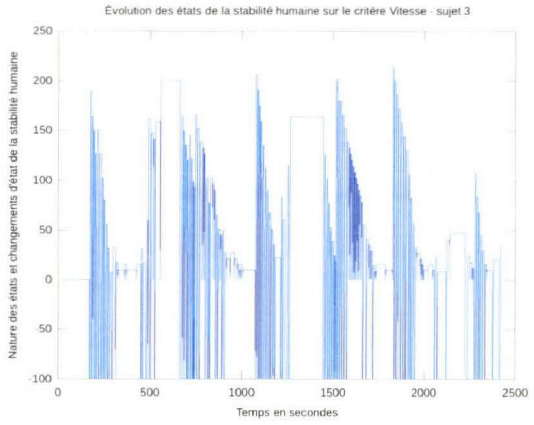
Le critère « vitesse »



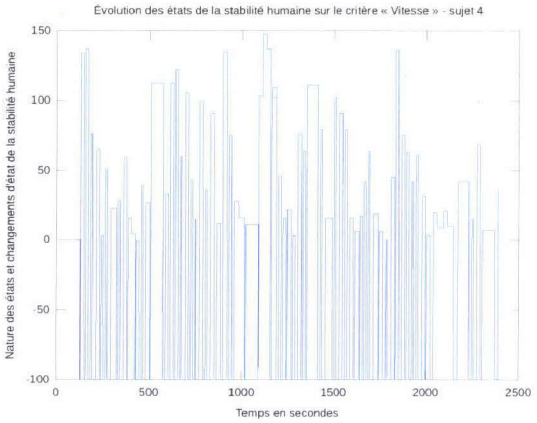
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » - sujet 1



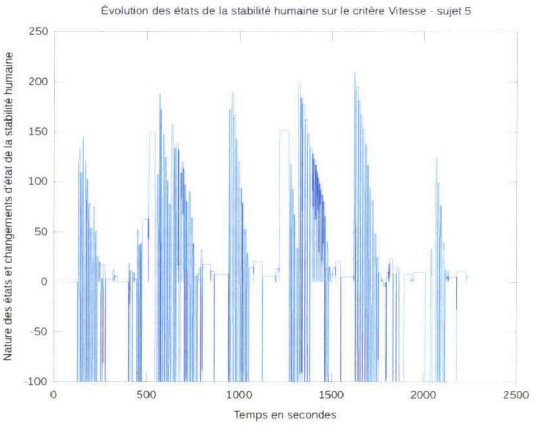
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » - sujet 2



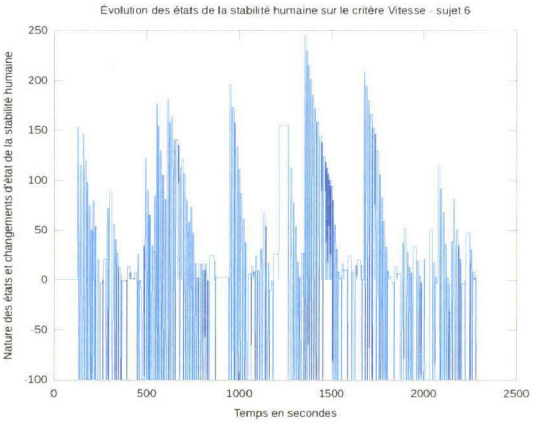
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » - sujet 3



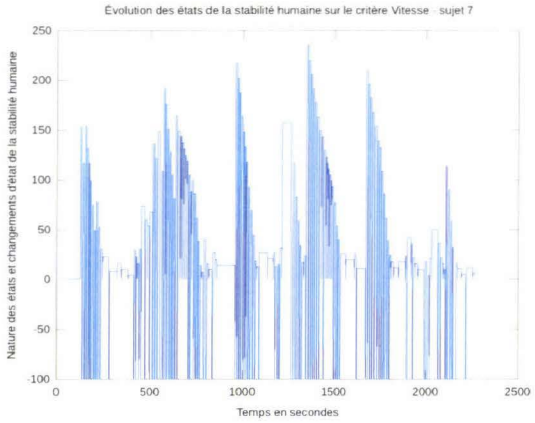
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » - sujet 4



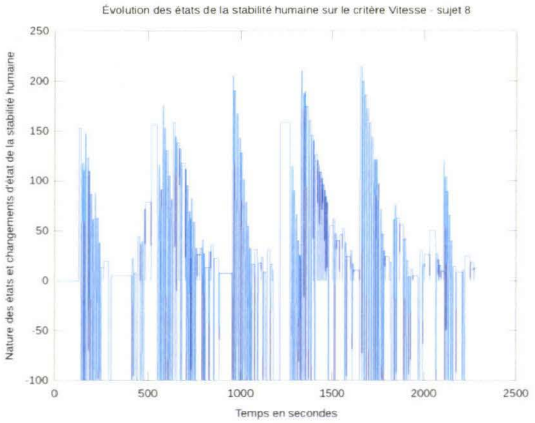
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » - sujet 5



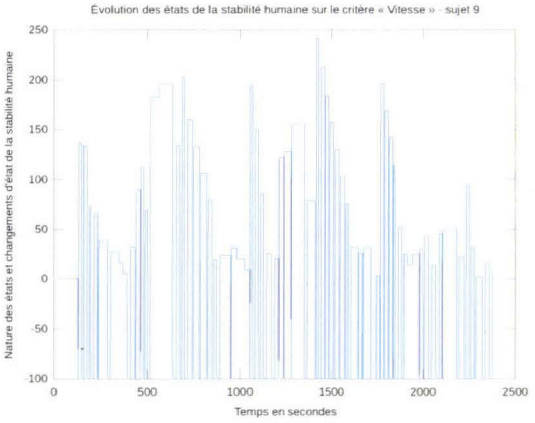
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » - sujet 6



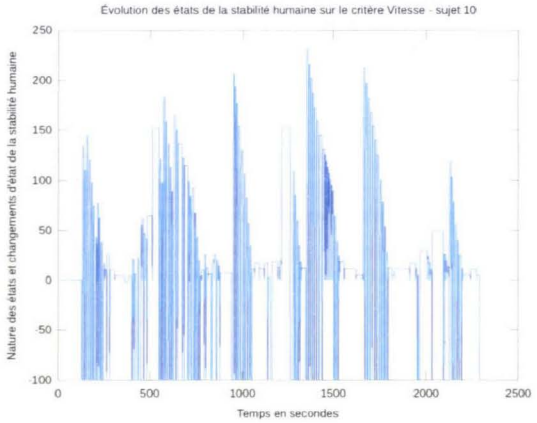
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » - sujet 7



États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » - sujet 8

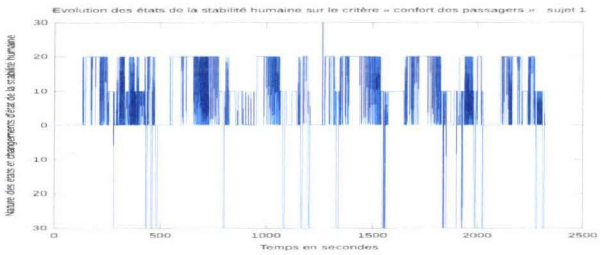


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » - sujet 9

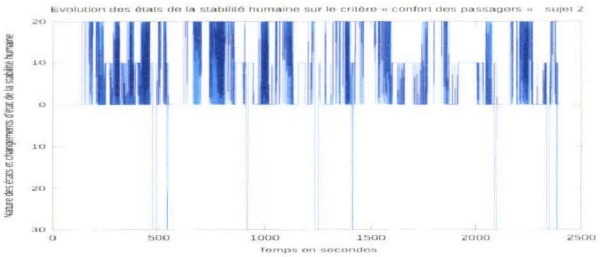


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » - sujet 10

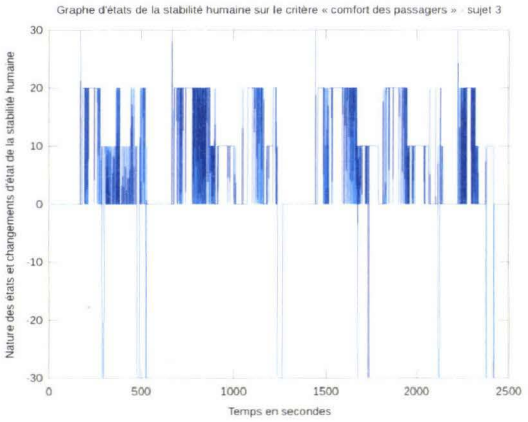
Le critère « confort des passagers »



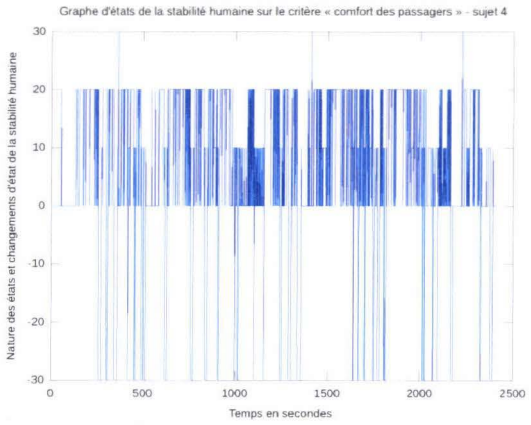
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » - sujet 1



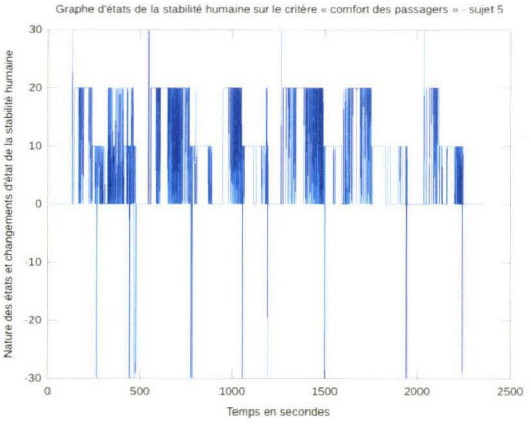
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » - sujet 2



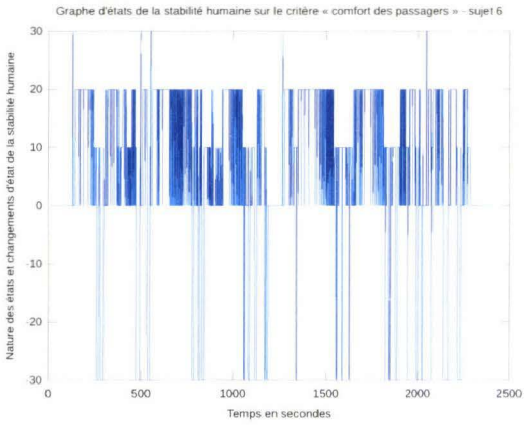
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » - sujet 3



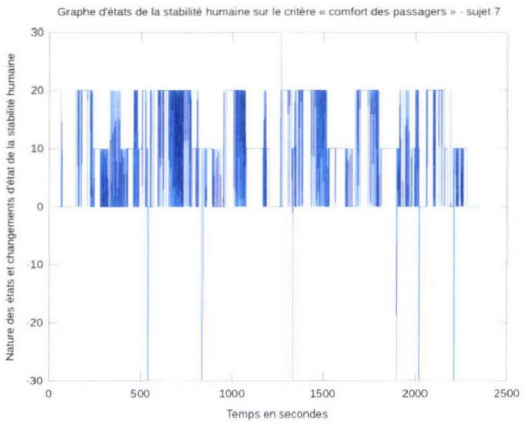
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » - sujet 4



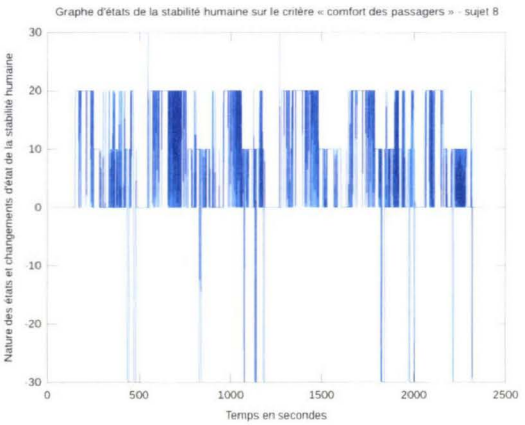
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » - sujet 5



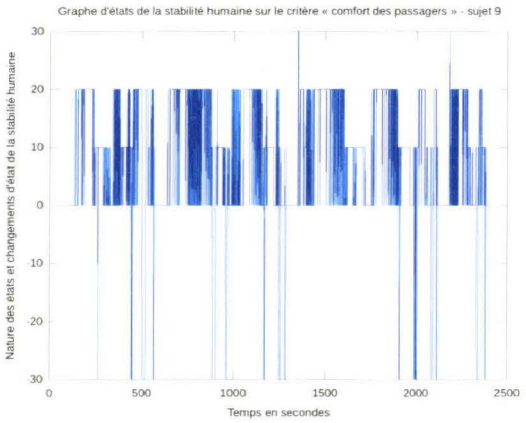
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » - sujet 6



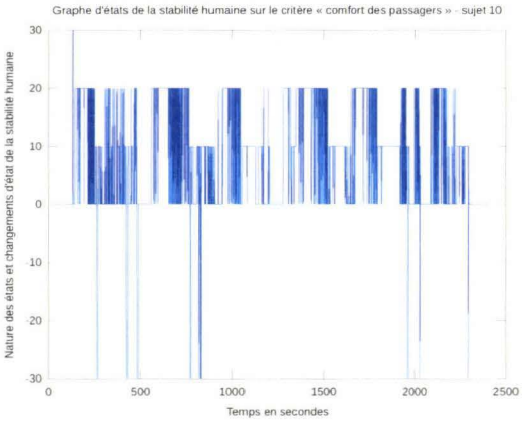
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » - sujet 7



États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » - sujet 8

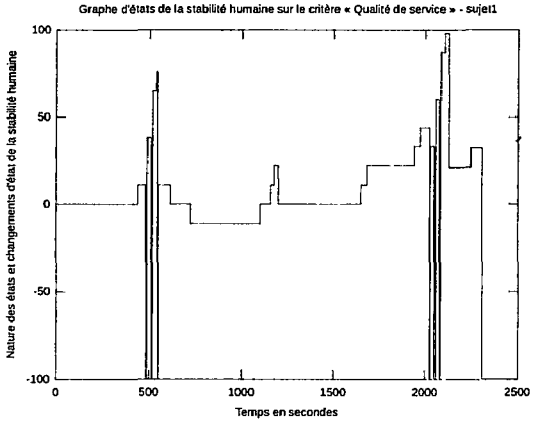


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » - sujet 9

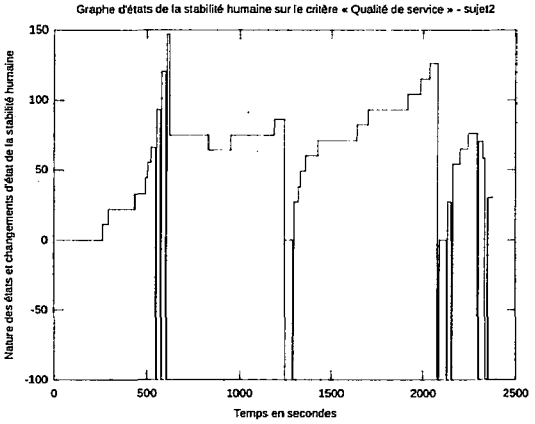


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » - sujet 10

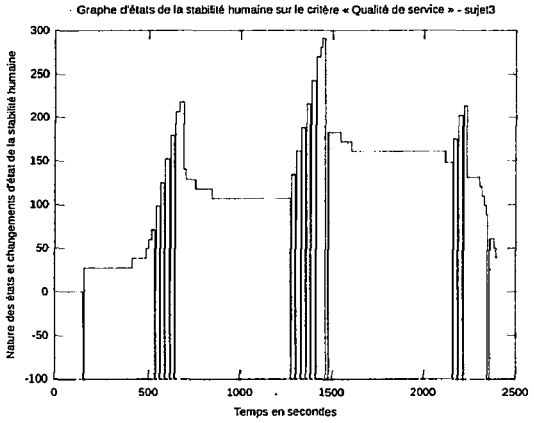
Le critère « qualité de service »



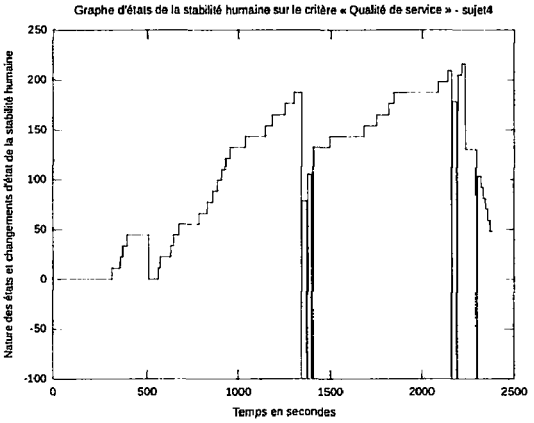
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » - sujet 1



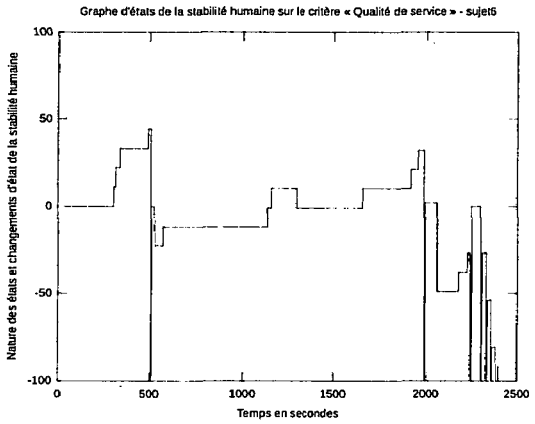
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » - sujet 2



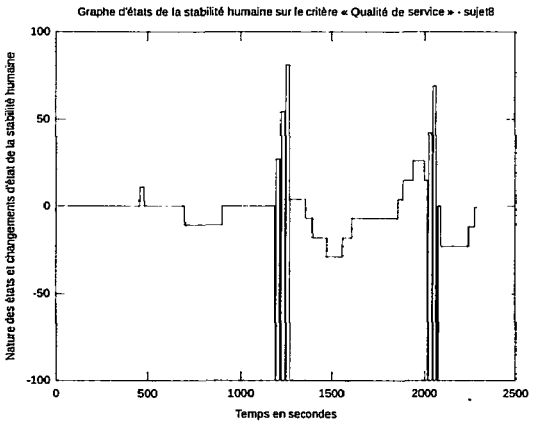
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » - sujet 3



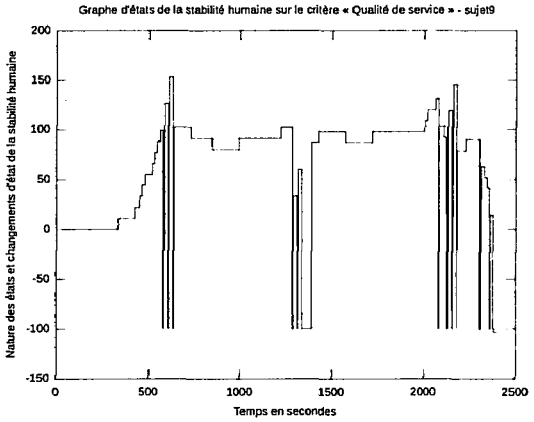
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » - sujet 4



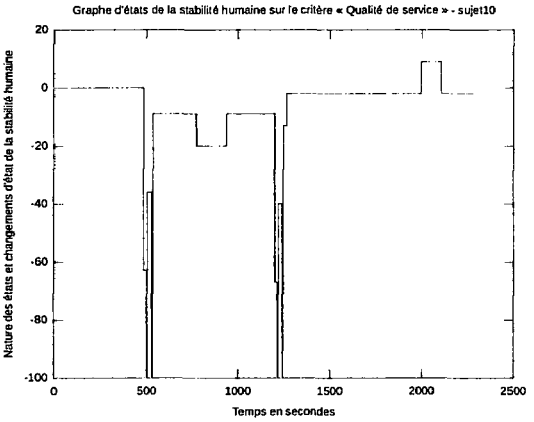
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » - sujet 6



États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » - sujet 8



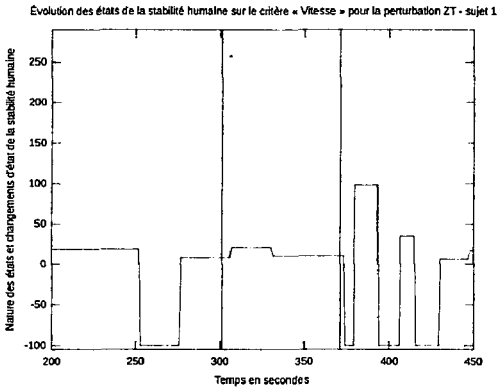
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » - sujet 9



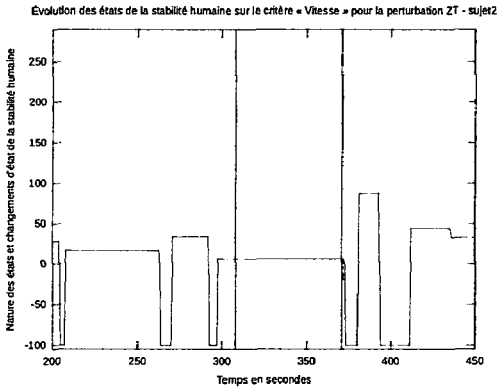
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » - sujet 10

Annexe 7 : Courbes des états et changements d'état de la stabilité humaine pour tous les critères, scénario avec perturbations

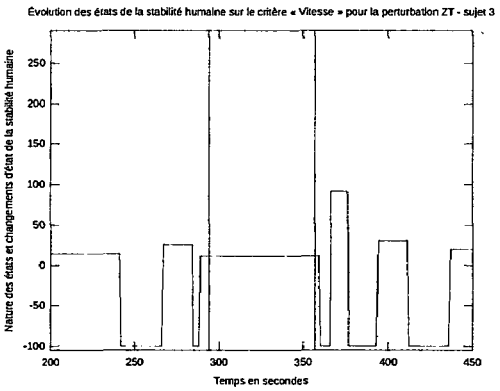
La perturbation ZT



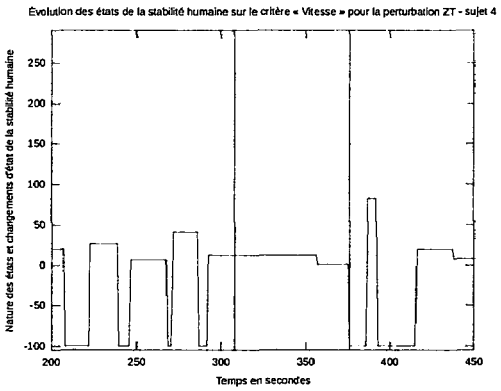
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation ZT - sujet 1



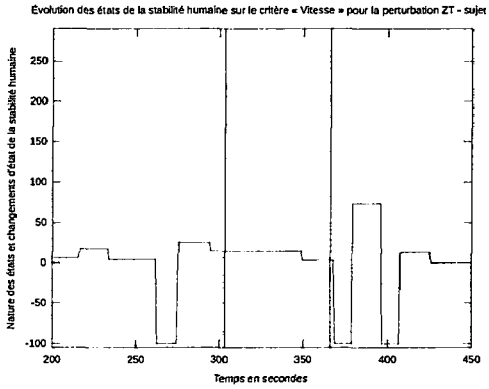
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation ZT - sujet 2



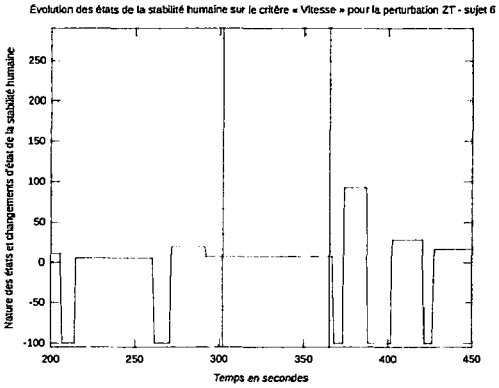
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation ZT - sujet 3



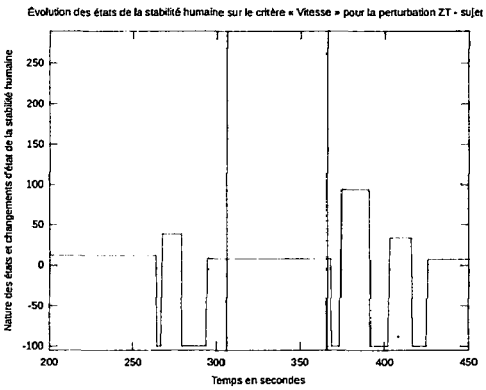
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation ZT - sujet 4



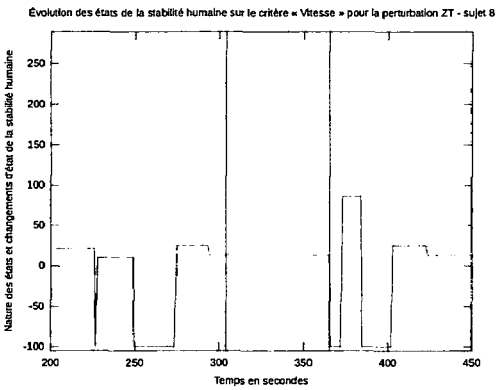
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation ZT - sujet 5



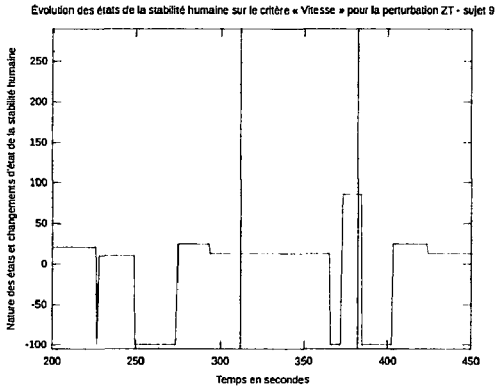
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation ZT - sujet 6



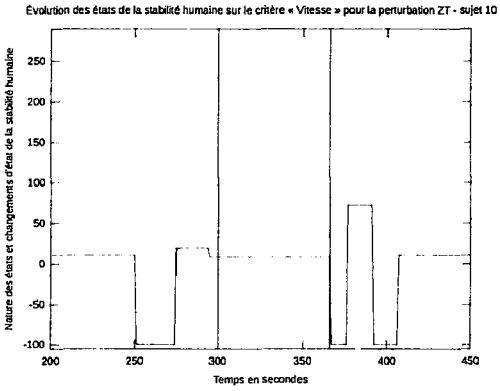
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation ZT - sujet 7



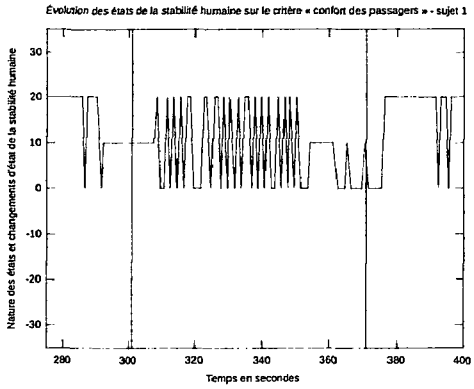
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation ZT - sujet 8



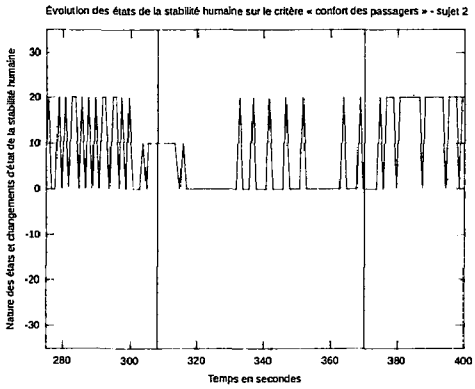
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation ZT - sujet 9



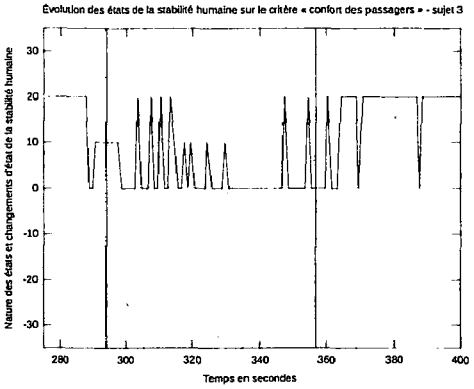
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation ZT - sujet 10



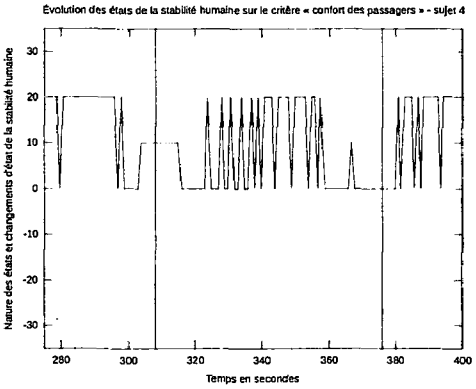
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation ZT - sujet 1



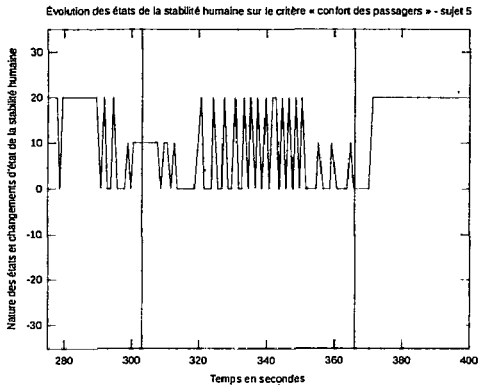
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation ZT - sujet 2



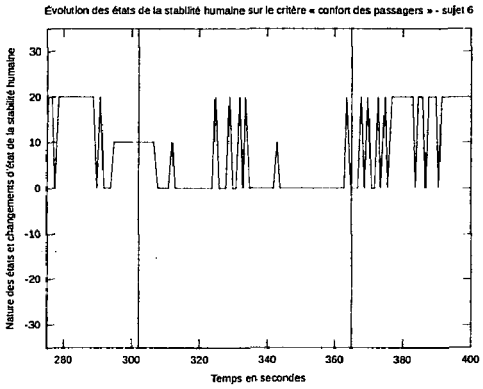
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation ZT - sujet 3



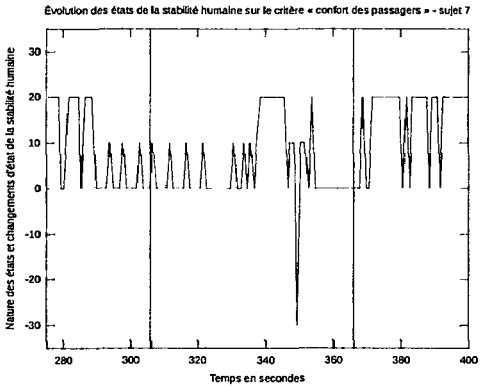
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation ZT - sujet 4



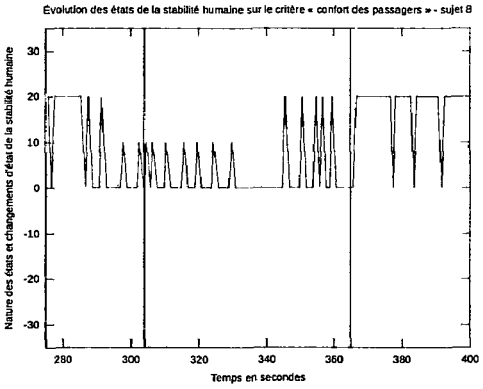
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation ZT - sujet 5



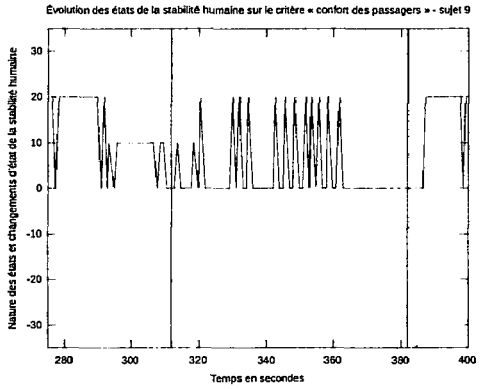
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation ZT - sujet 6



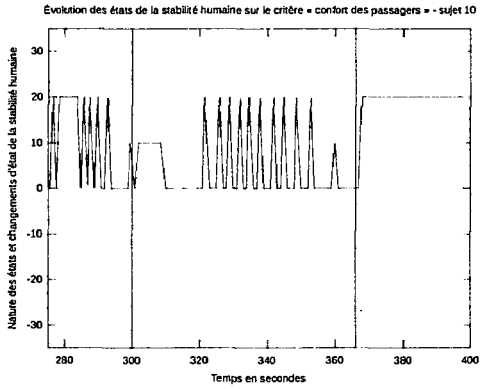
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation ZT - sujet 7



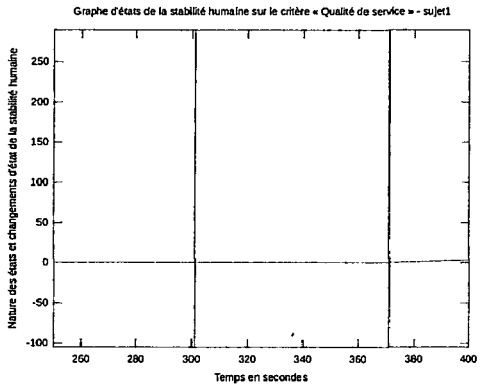
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation ZT - sujet 8



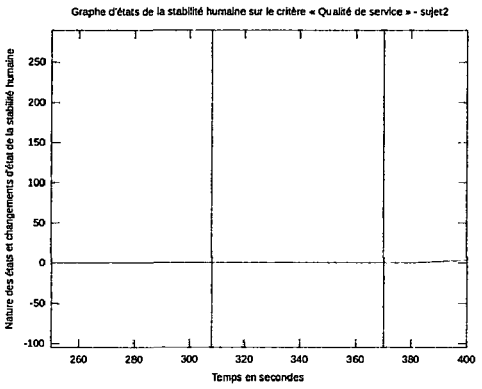
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation ZT - sujet 9



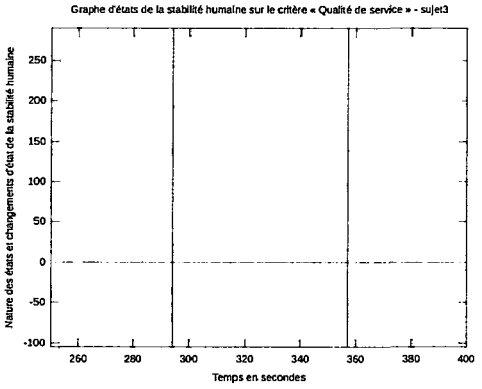
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation ZT - sujet 10



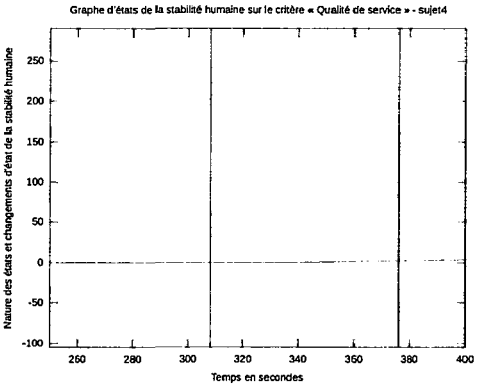
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation ZT - sujet 1



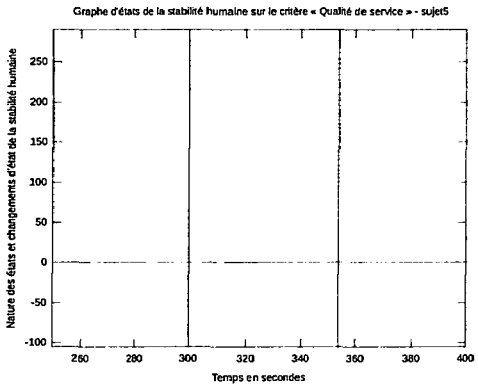
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation ZT - sujet 2



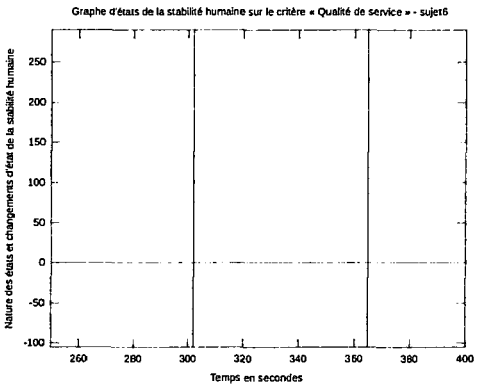
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation ZT - sujet 3



États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation ZT - sujet 4

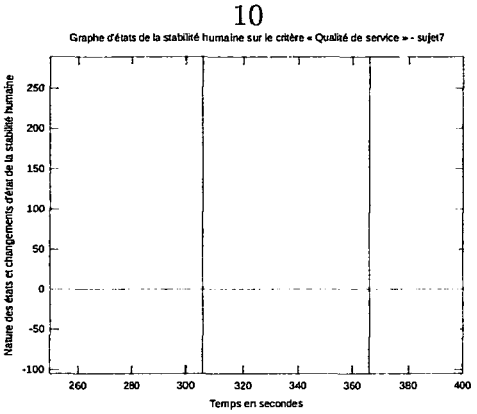


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation ZT - sujet 5

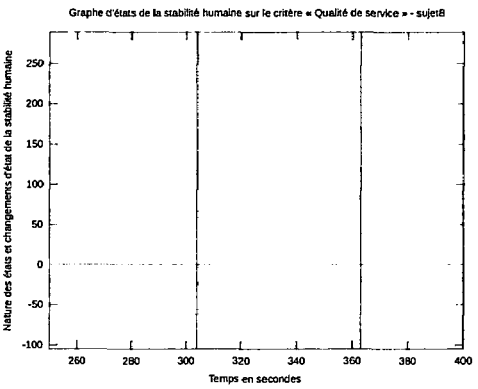


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation ZT - sujet 6

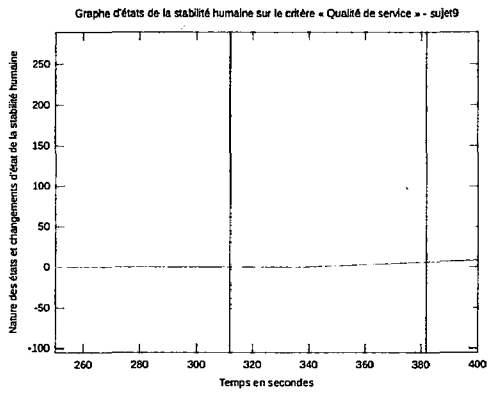
10



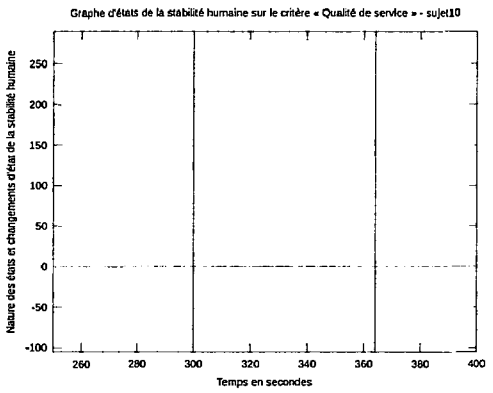
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation ZT - sujet 7



États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation ZT - sujet 8

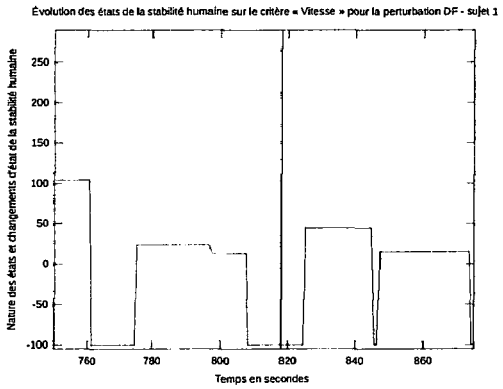


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation ZT - sujet 9

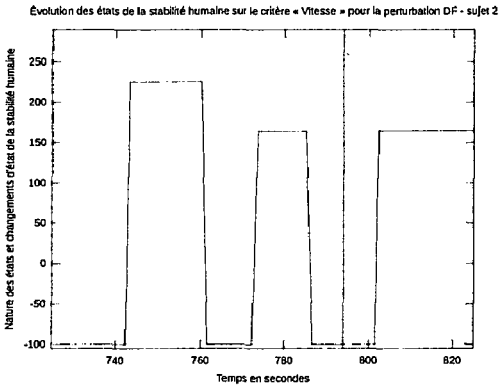


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation ZT - sujet 10

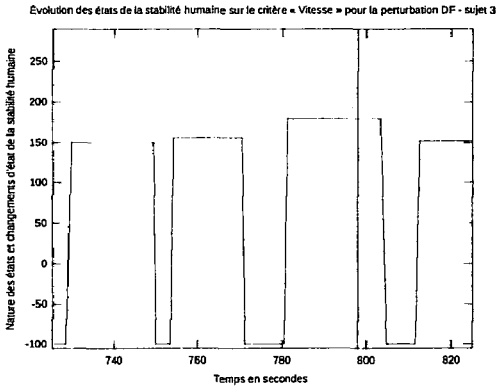
La perturbation DF



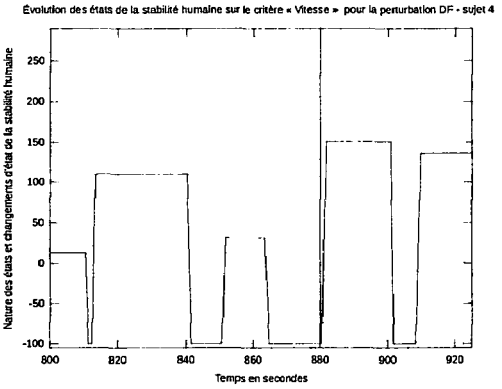
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation DF - sujet 1



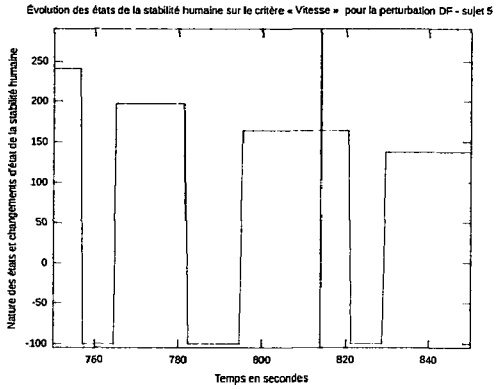
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation DF - sujet 2



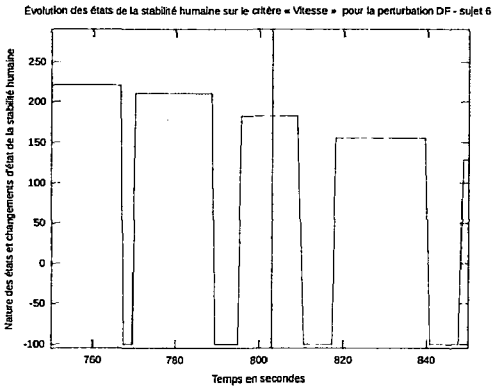
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation DF - sujet 3



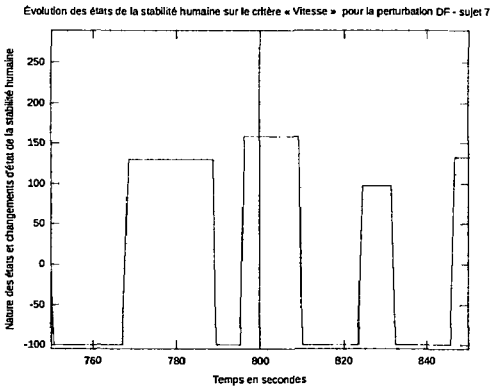
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation DF - sujet 4



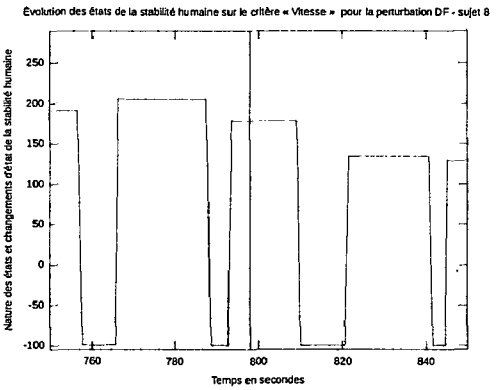
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation DF - sujet 5



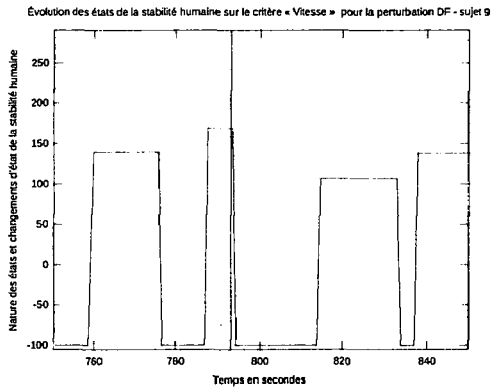
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation DF - sujet 6



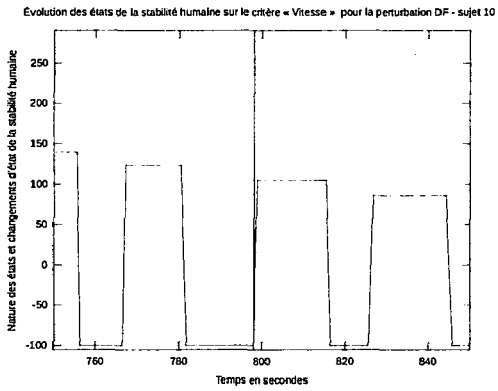
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation DF - sujet 7



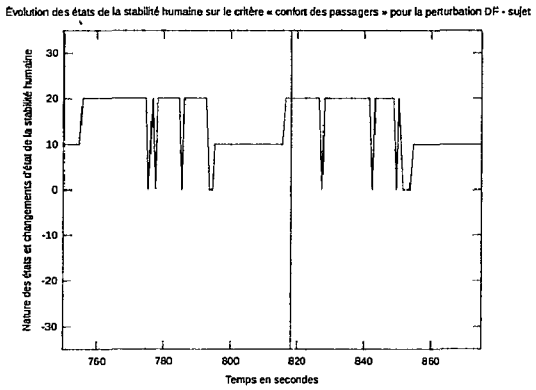
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation DF - sujet 8



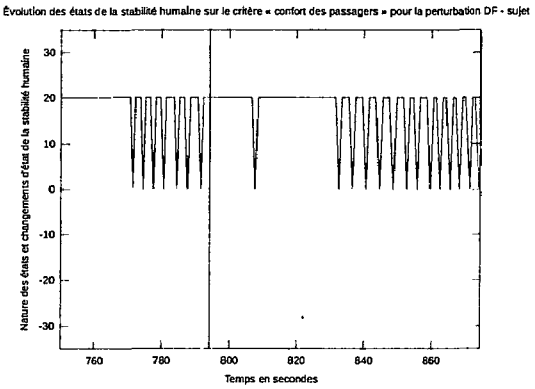
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation DF - sujet 9



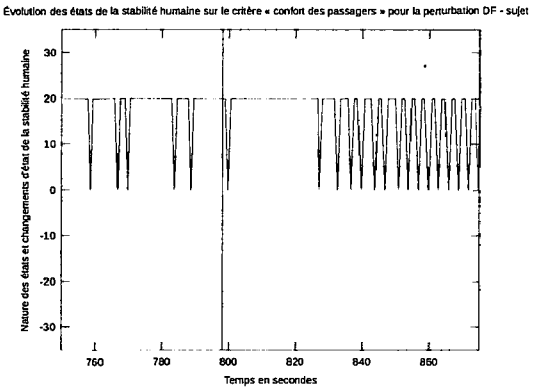
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation DF - sujet 10



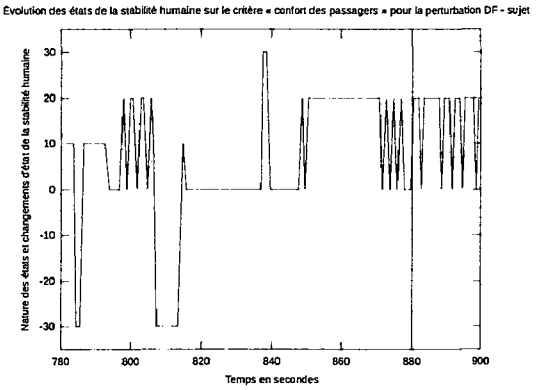
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation DF - sujet 1



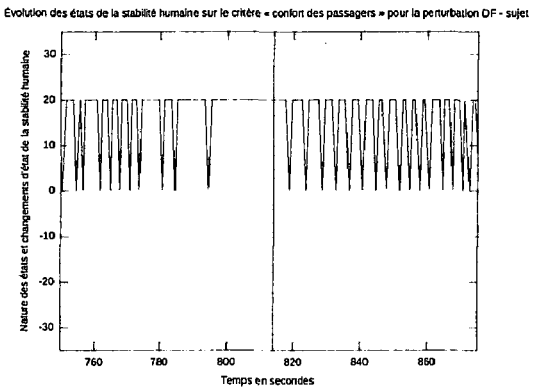
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation DF - sujet 2



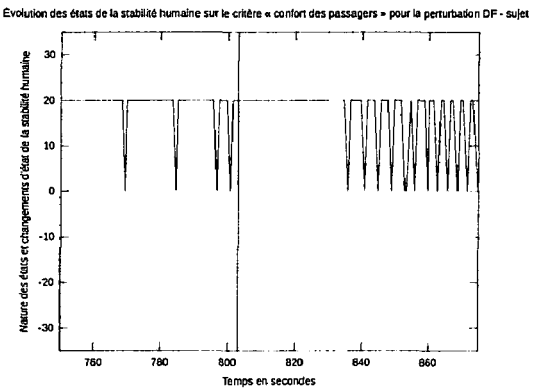
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation DF - sujet 3



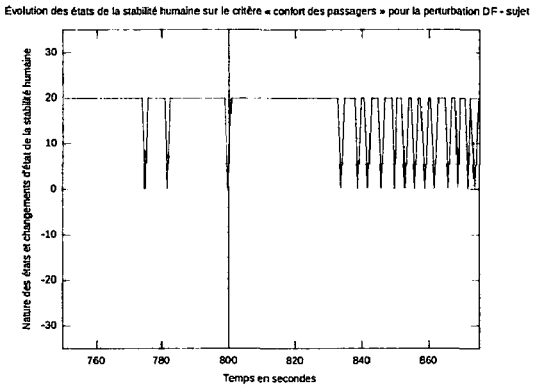
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation DF - sujet 4



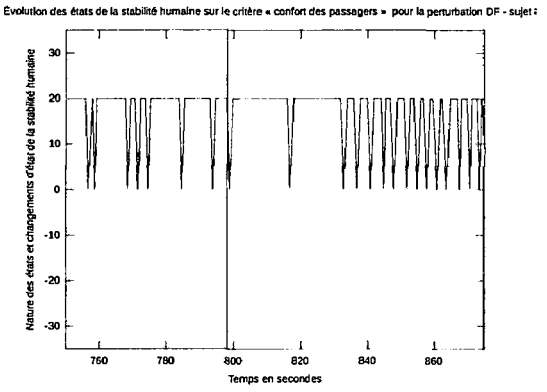
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation DF - sujet 5



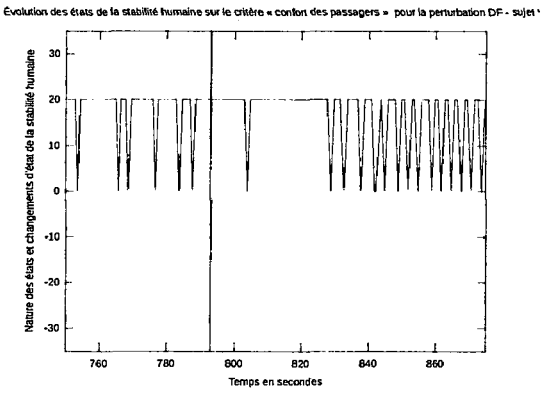
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation DF - sujet 6



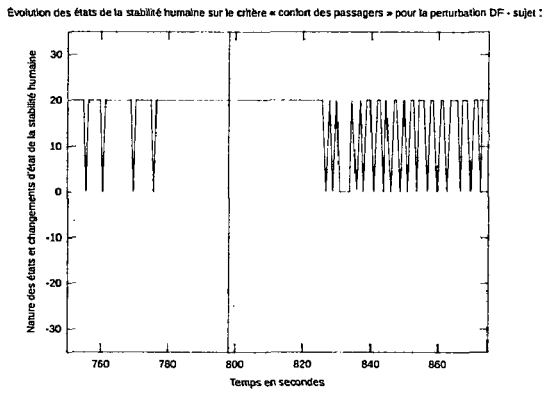
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation DF - sujet 7



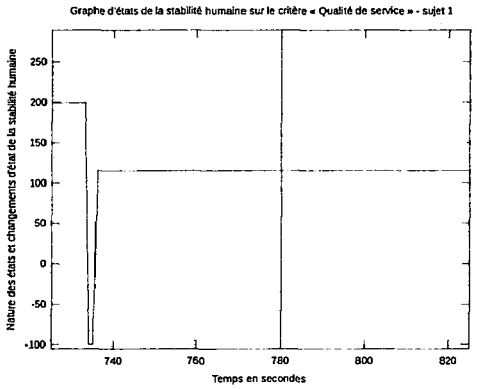
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation DF - sujet 8



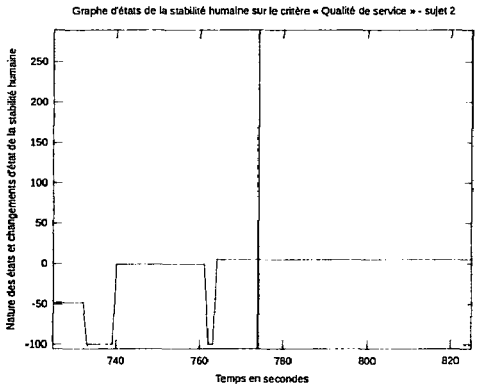
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation DF - sujet 9



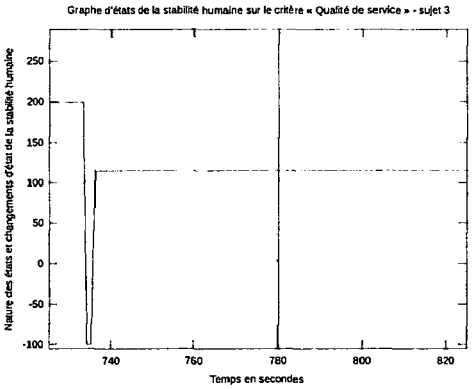
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation DF - sujet 10



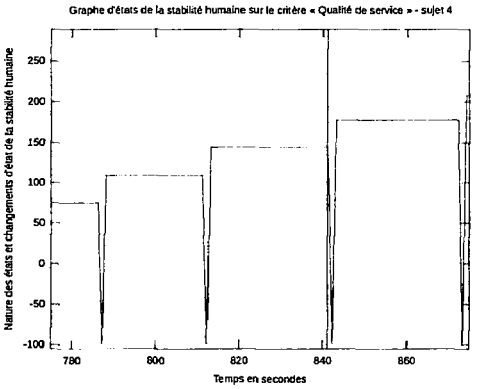
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation DF - sujet 1



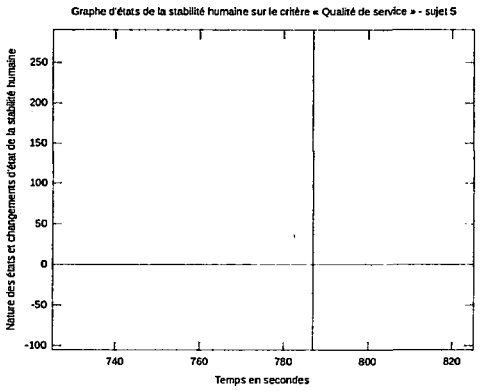
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation DF - sujet 2



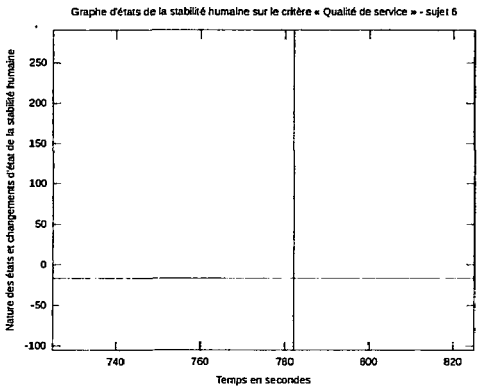
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation DF - sujet 3



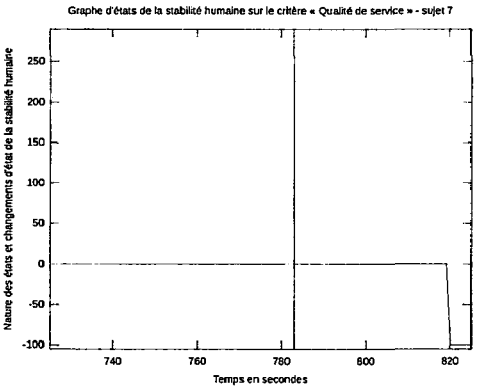
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation DF - sujet 4



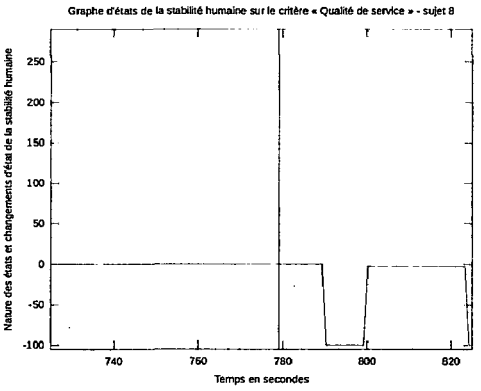
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation DF - sujet 5



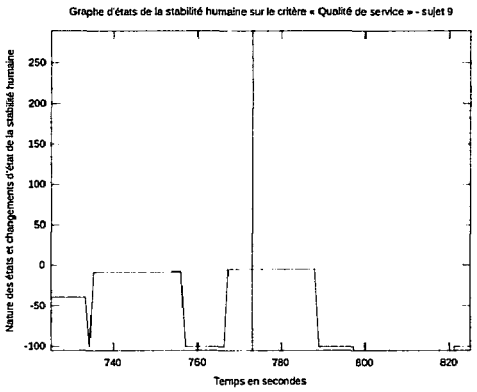
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation DF - sujet 6



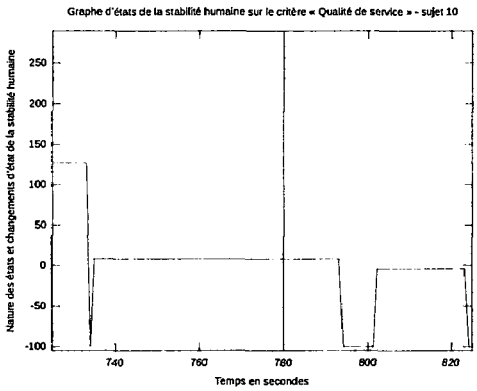
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation DF - sujet 7



États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation DF - sujet 8

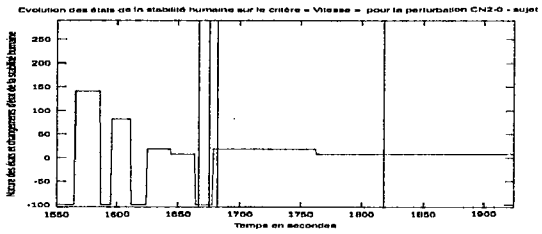


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation DF - sujet 9

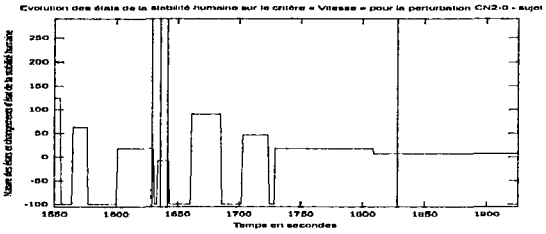


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation DF - sujet 10

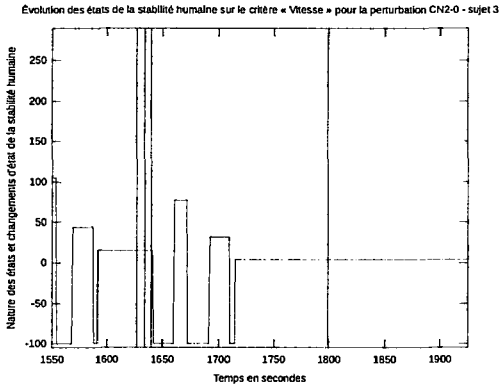
La perturbation CN2-0



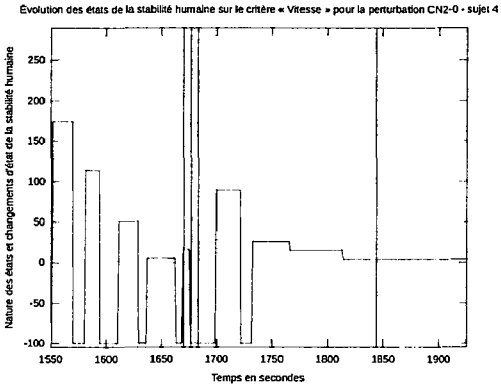
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN2-0 - sujet 1



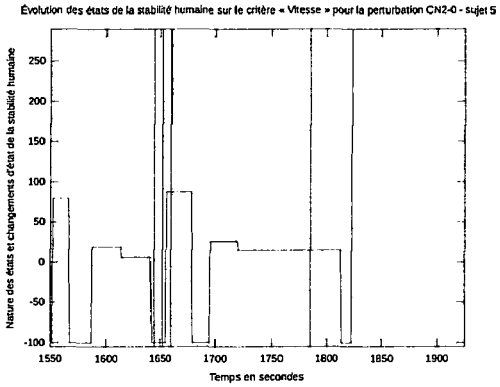
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN2-0 - sujet 2



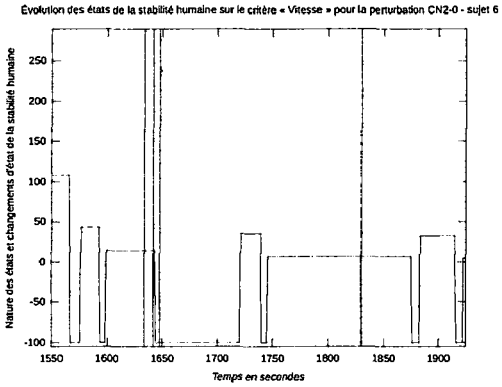
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN2-0 - sujet 3



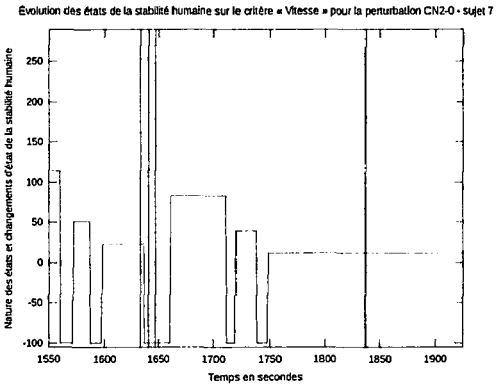
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN2-0 - sujet 4



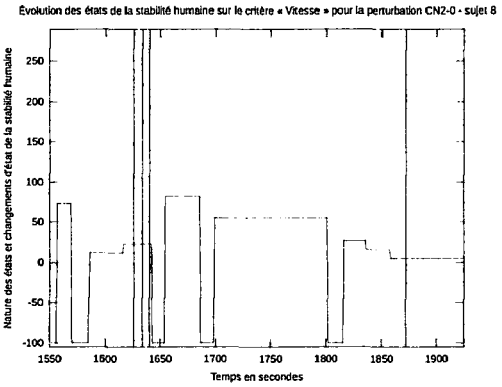
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN2-0 - sujet 5



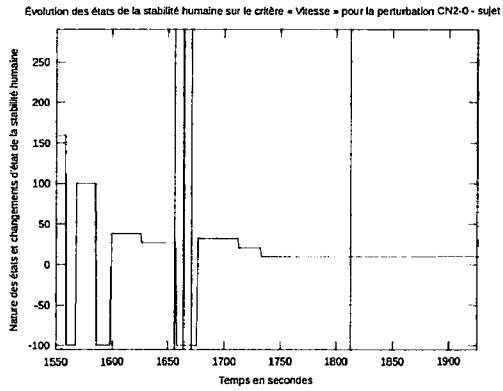
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN2-0 - sujet 6



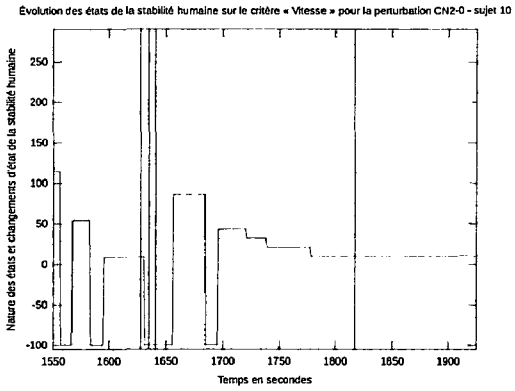
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN2-0 - sujet 7



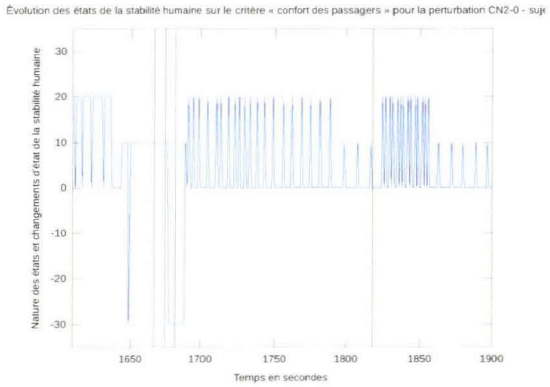
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN2-0 - sujet 8



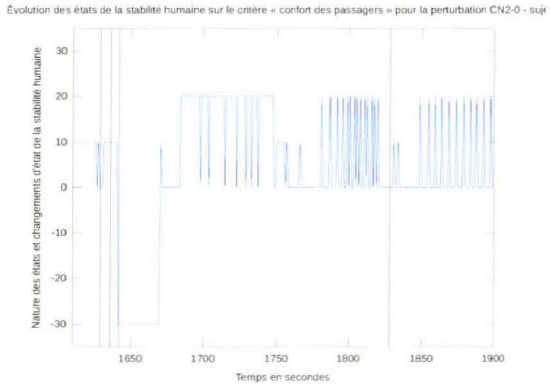
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN2-0 - sujet 9



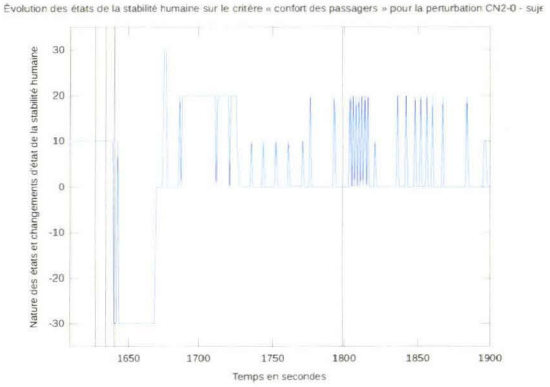
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN2-0 - sujet 10



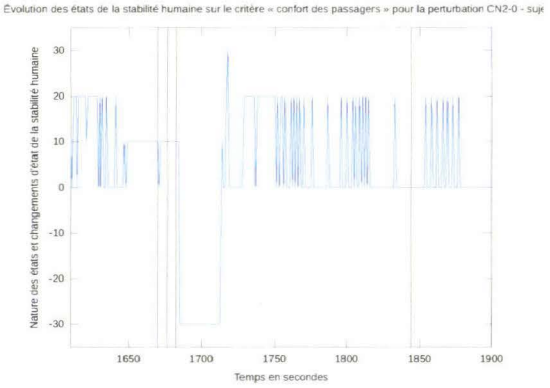
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-0 - sujet 1



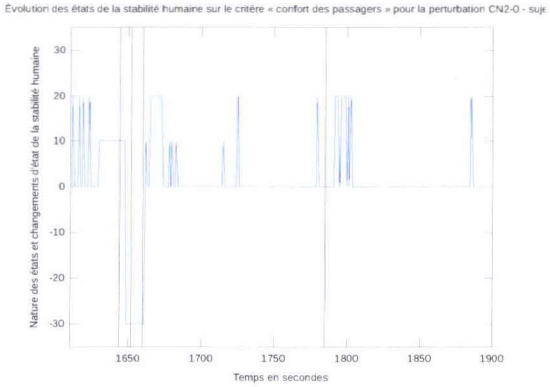
États et changements d'état deF la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-0 - sujet 2



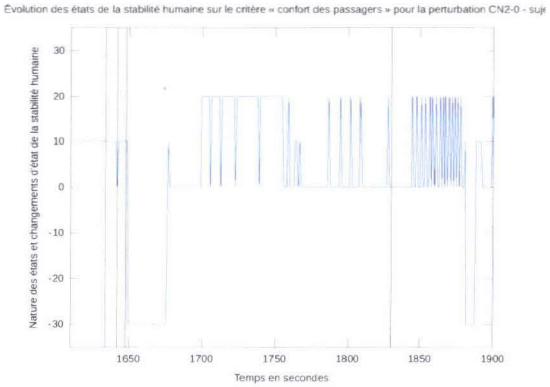
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-0 - sujet 3



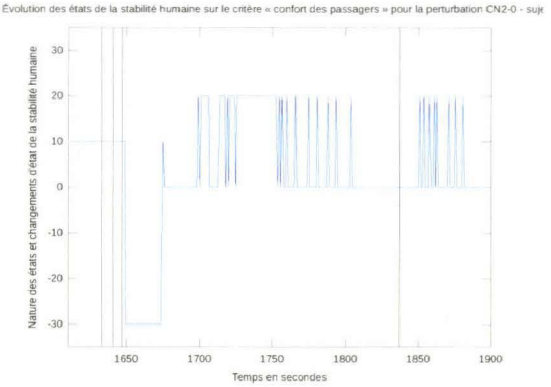
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-0 - sujet 4



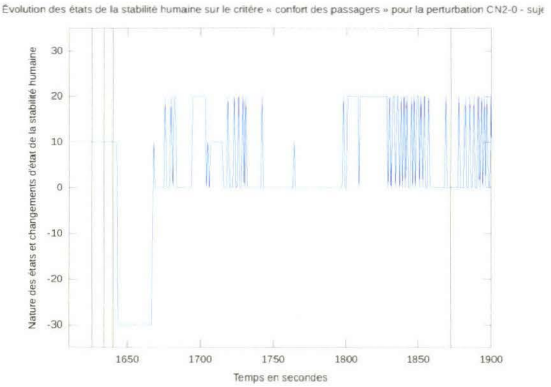
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-0 - sujet 5



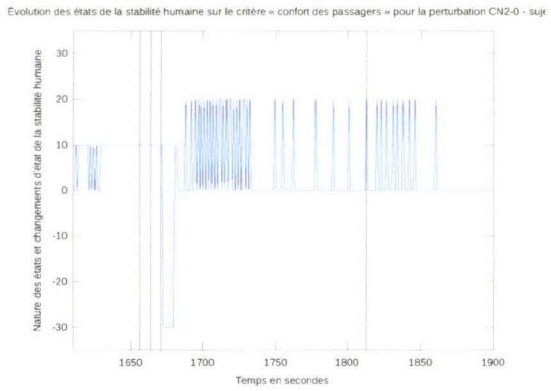
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-0 - sujet 6



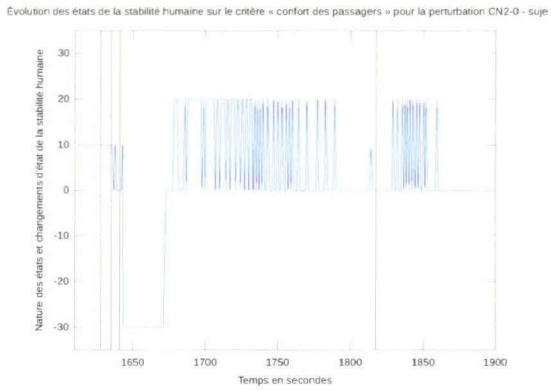
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-0 - sujet 7



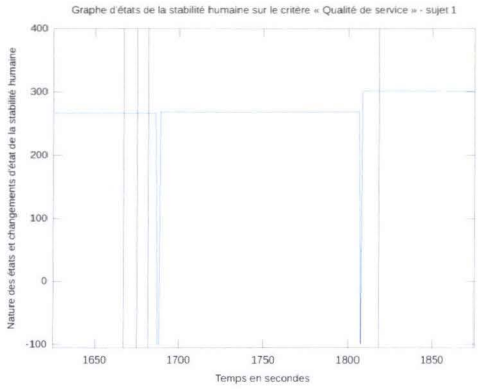
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-0 - sujet 8



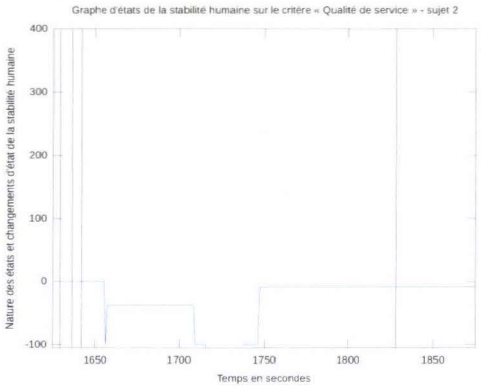
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-0 - sujet 9



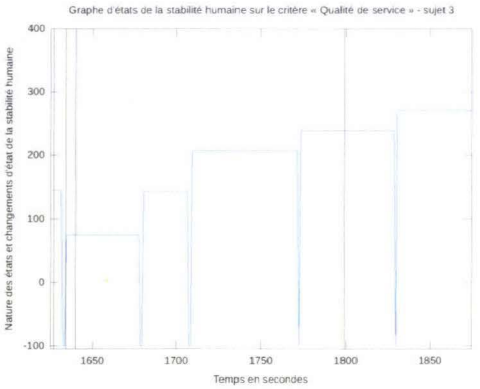
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN2-0 - sujet 10



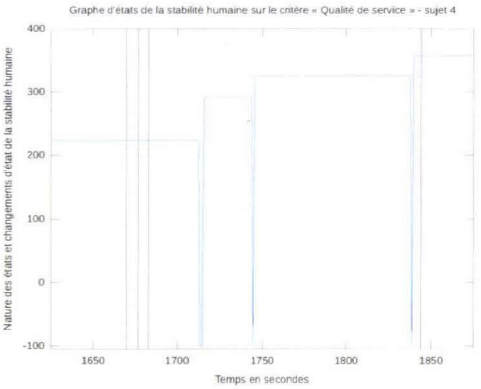
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN2-0 - sujet 1



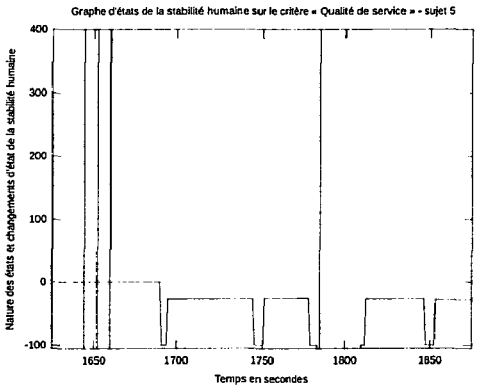
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN2-0 - sujet 2



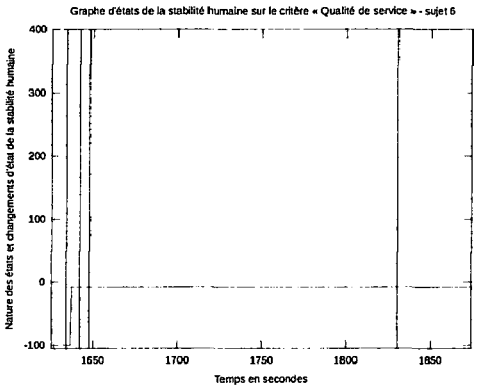
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN2-0 - sujet 3



États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN2-0 - sujet 4

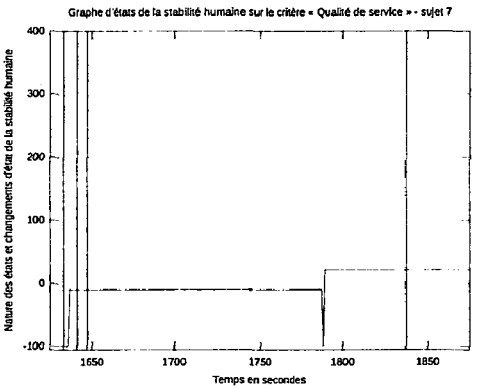


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN2-0 - sujet 5

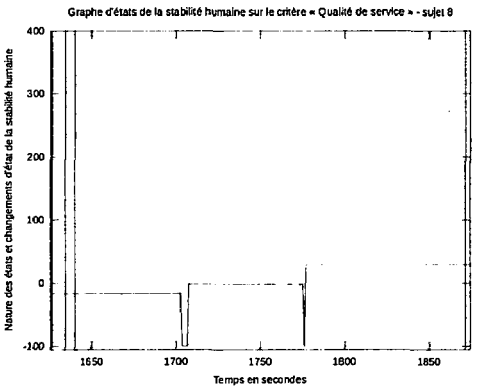


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN2-0 - sujet 6

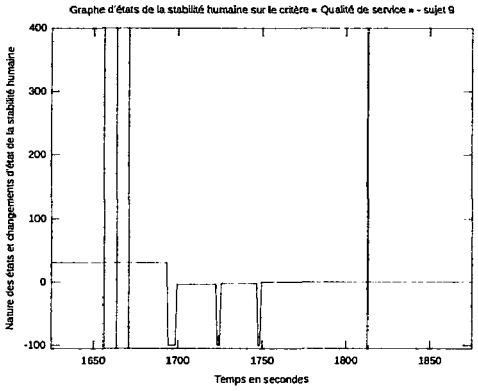
10



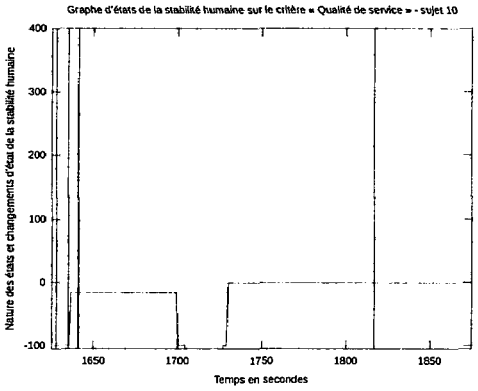
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN2-0 - sujet 7



États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN2-0 - sujet 8

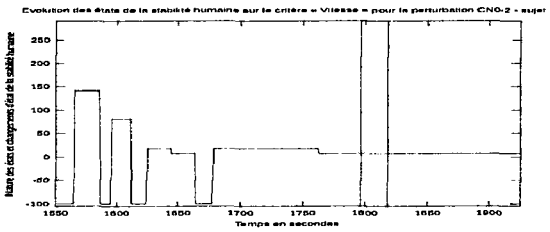


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN2-0 - sujet 9

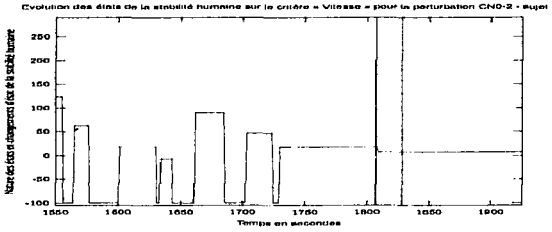


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN2-0 - sujet 10

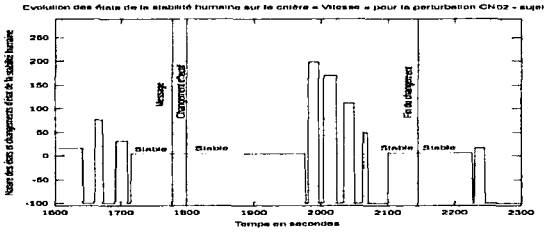
La perturbation CN0-2



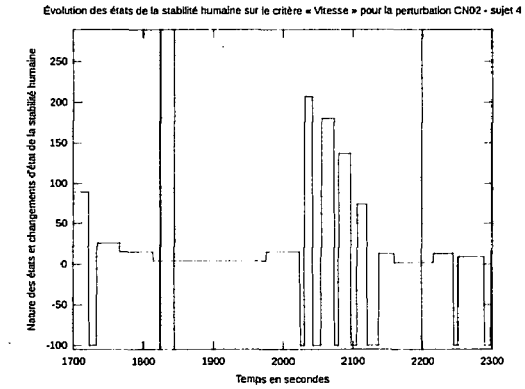
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN0-2 - sujet 1



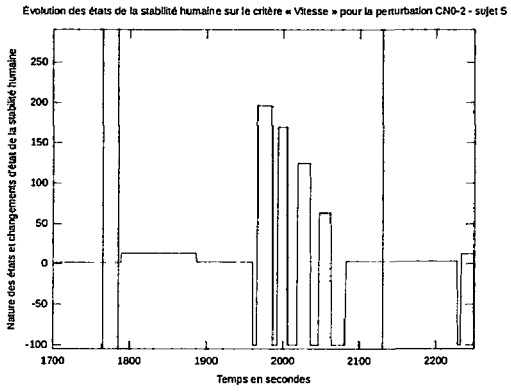
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN0-2 - sujet 2



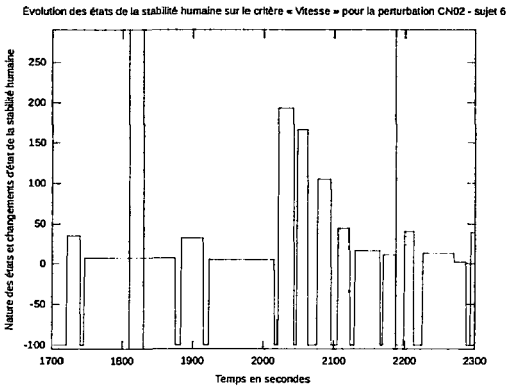
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN0-2 - sujet 3



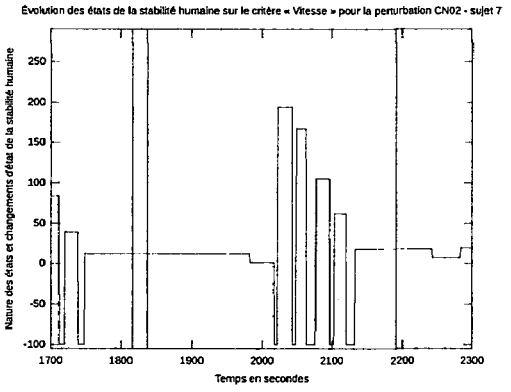
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN0-2 - sujet 4



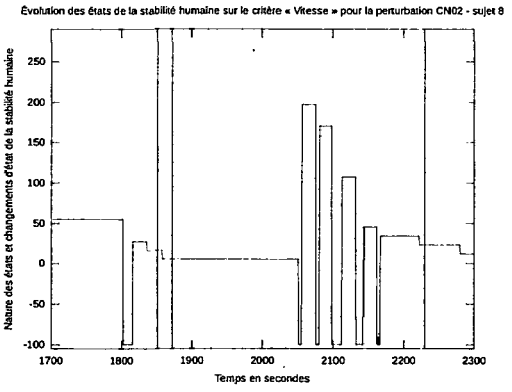
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN0-2 - sujet 5



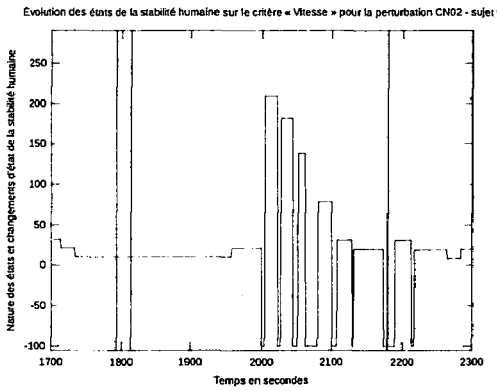
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN0-2 - sujet 6



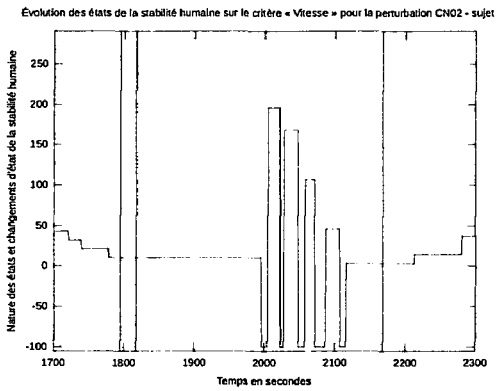
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN0-2 - sujet 7



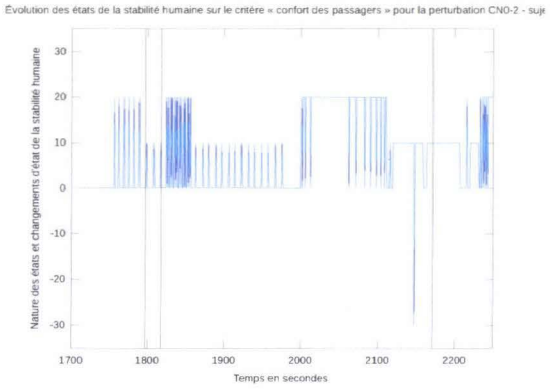
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN0-2 - sujet 8



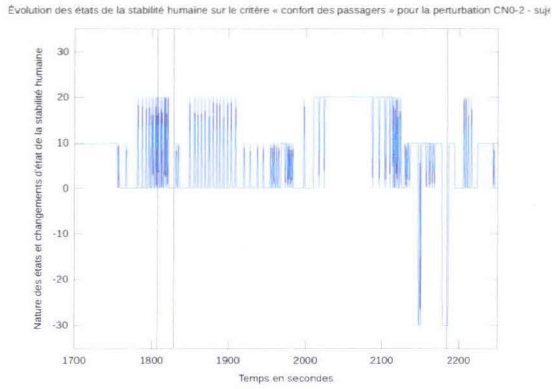
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN0-2 - sujet 9



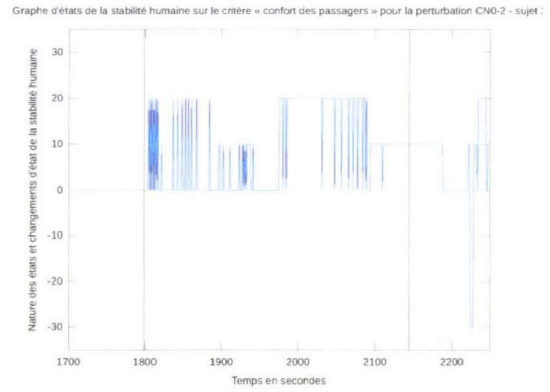
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour la perturbation CN0-2 - sujet 10



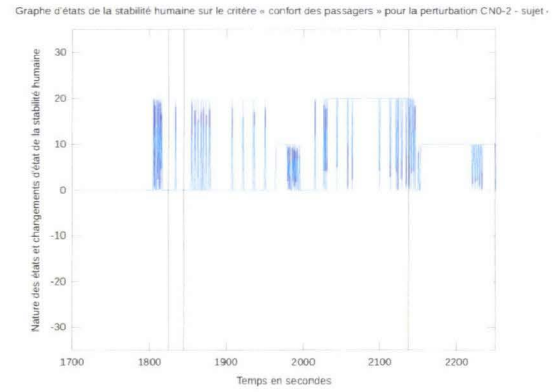
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN0-2 - sujet 1



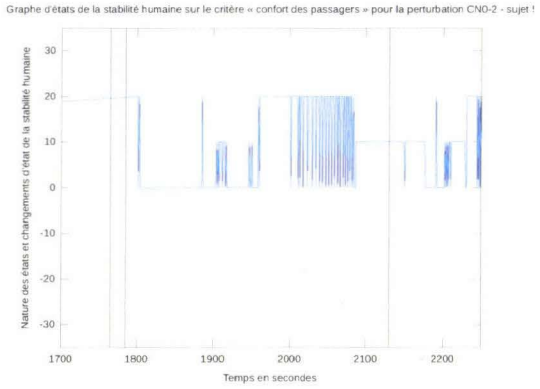
États et changements d'état deF la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN0-2 - sujet 2



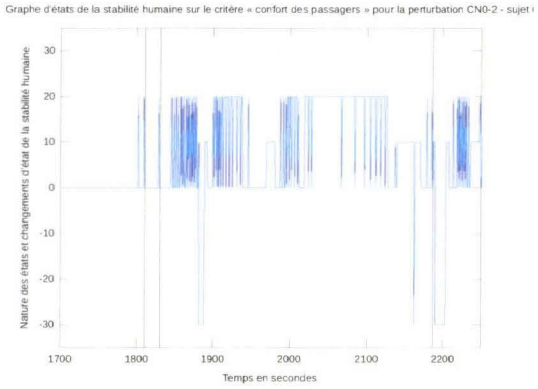
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN0-2 - sujet 3



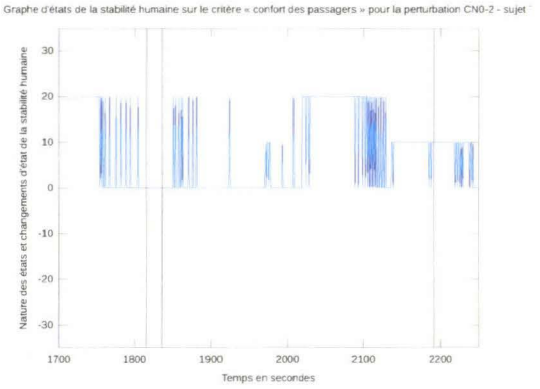
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN0-2 - sujet 4



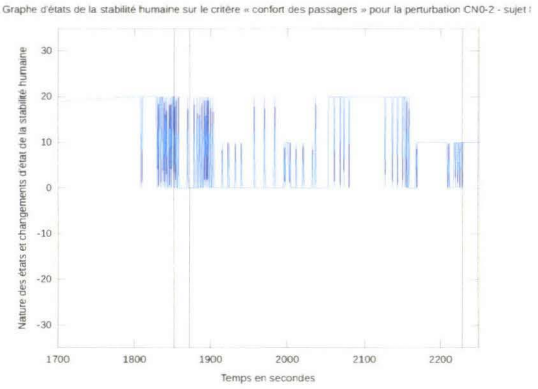
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN0-2 - sujet 5



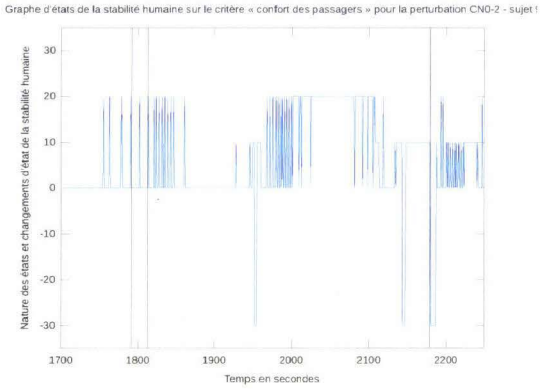
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN0-2 - sujet 6



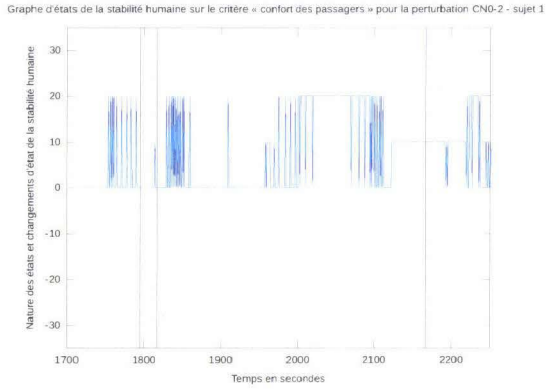
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN0-2 - sujet 7



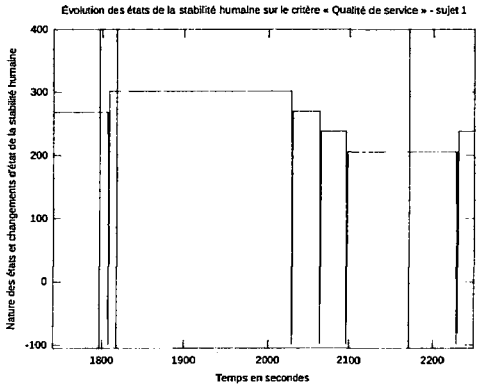
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN0-2 - sujet 8



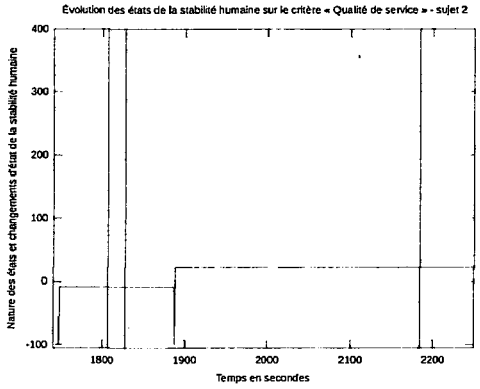
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN0-2 - sujet 9



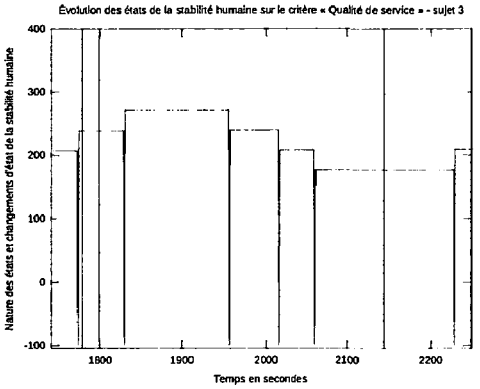
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour la perturbation CN0-2 - sujet 10



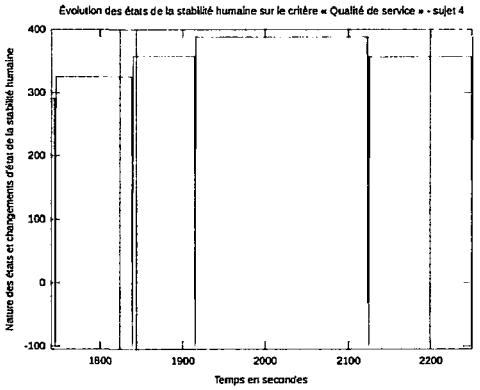
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service pour la perturbation CN0-2 - sujet 1



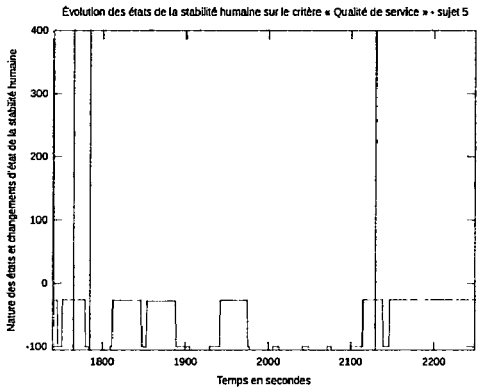
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service pour la perturbation CN0-2 - sujet 2



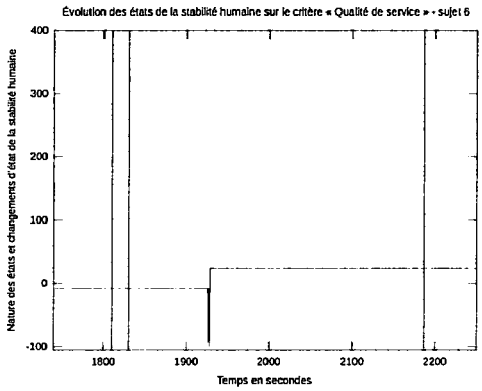
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN0-2 - sujet 3



États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN0-2 - sujet 4

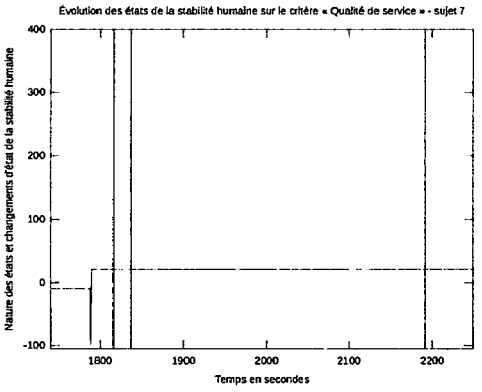


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN0-2 - sujet 5

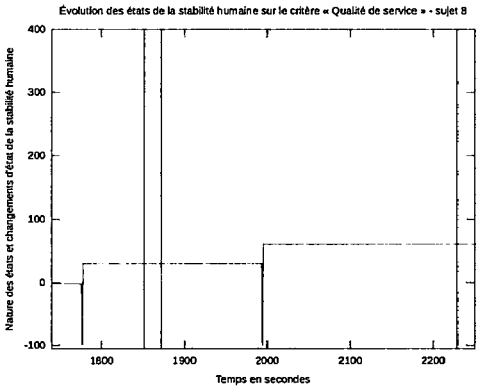


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN0-2 - sujet 6

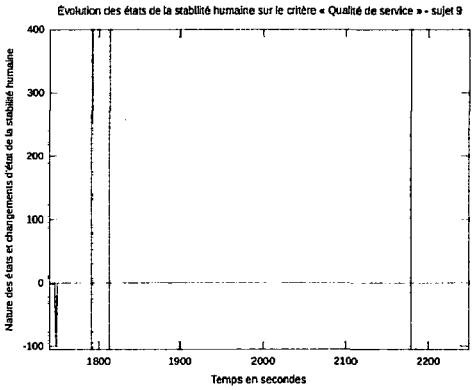
10



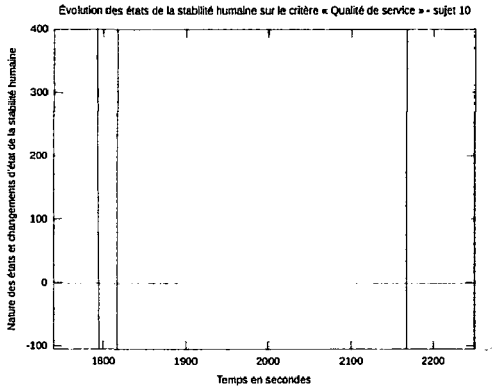
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN0-2 - sujet 7



États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN0-2 - sujet 8

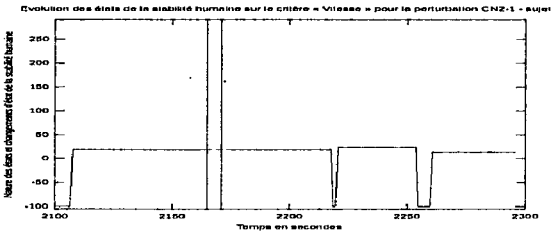


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN0-2 - sujet 9

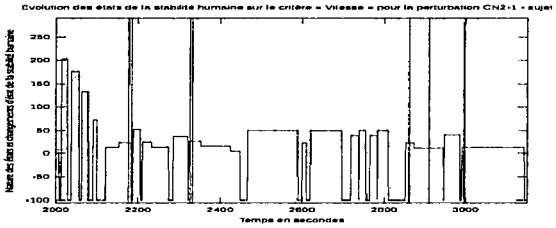


États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour la perturbation CN0-2 - sujet 10

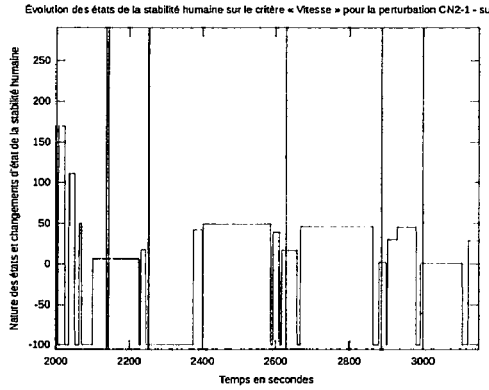
La perturbation CN2-1 et CM



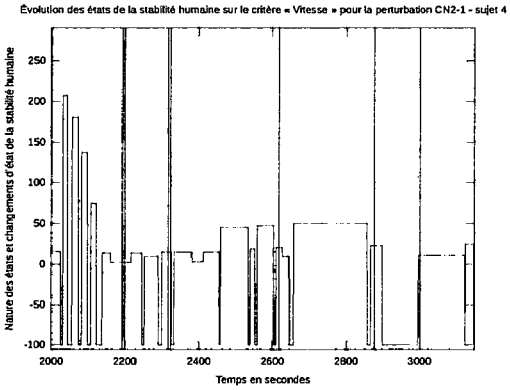
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 1



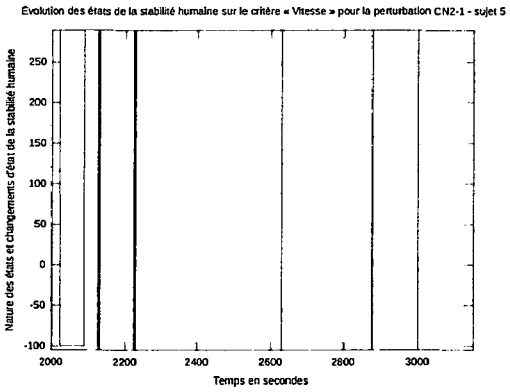
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 2



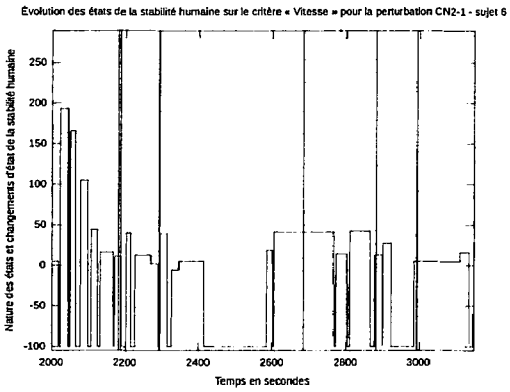
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 3



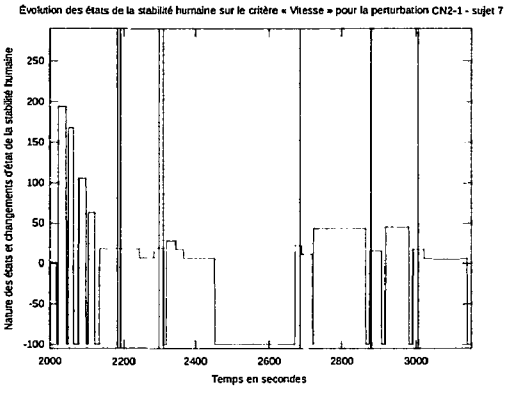
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 4



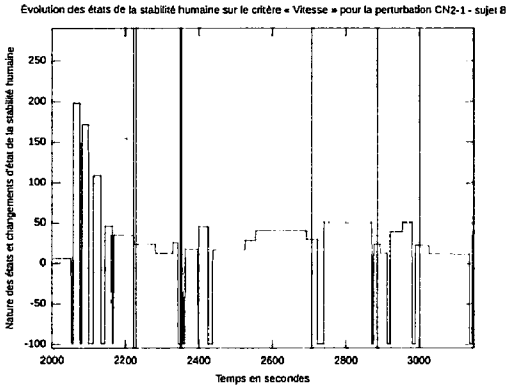
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 5



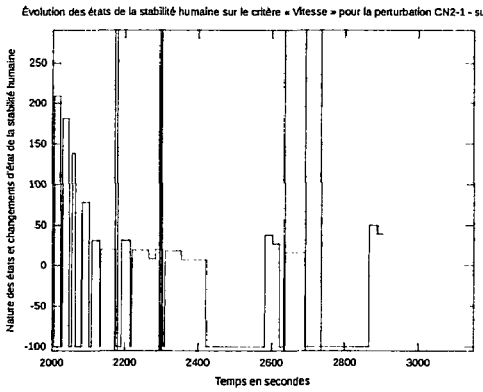
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 6



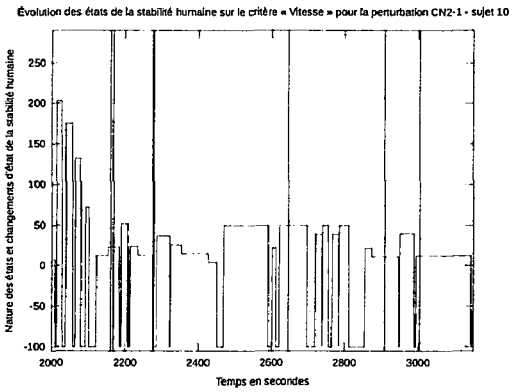
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 7



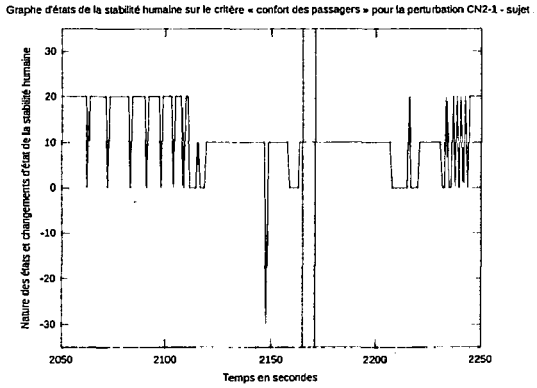
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 8



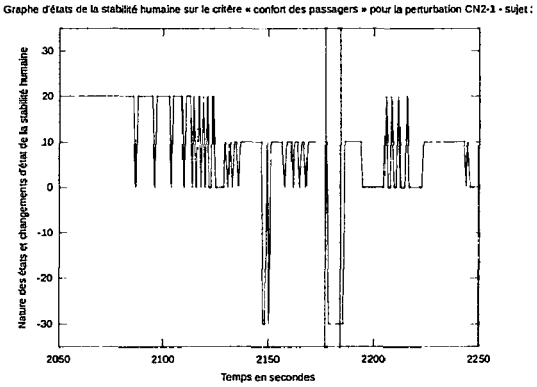
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 9



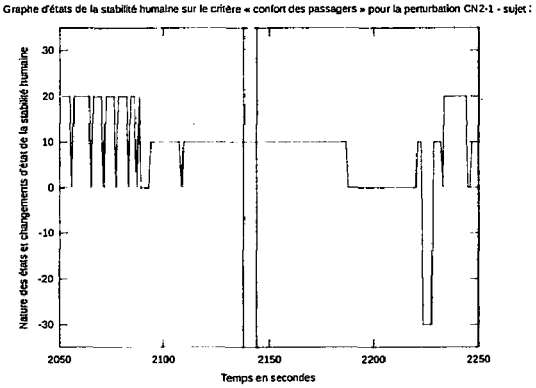
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « vitesse » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 10



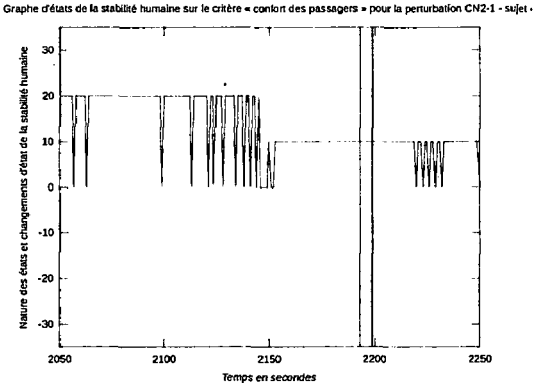
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 1



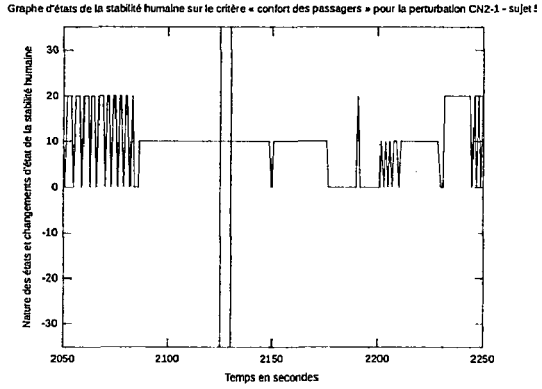
États et changements d'état deF la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 2



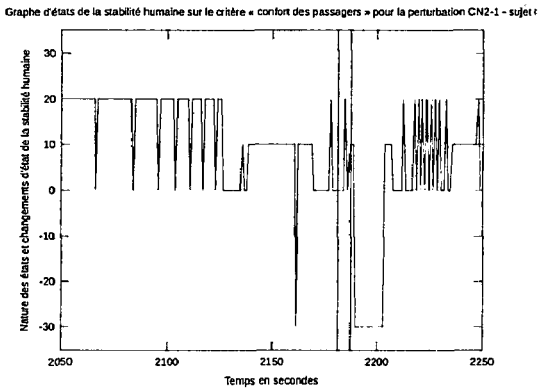
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 3



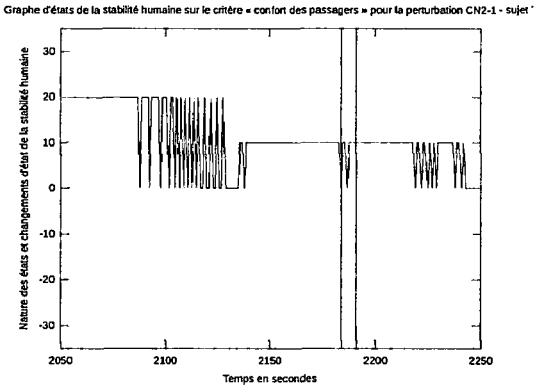
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 4



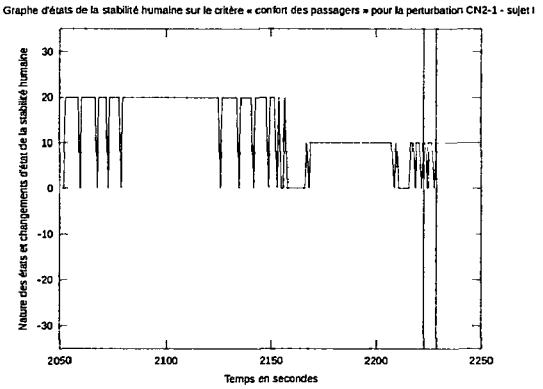
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 5



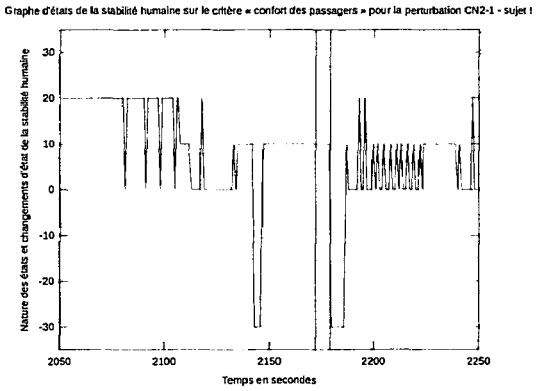
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 6



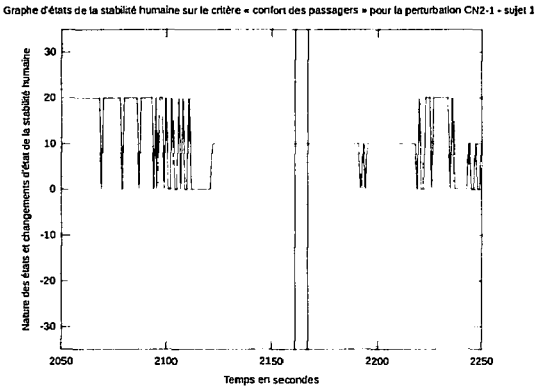
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 7



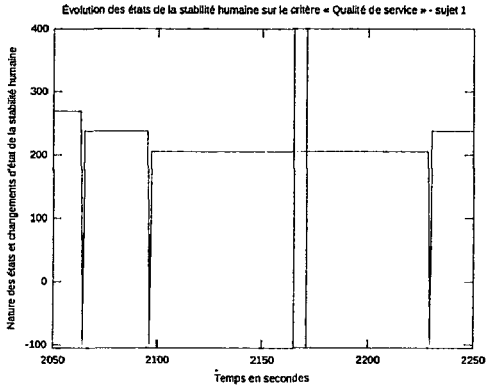
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 8



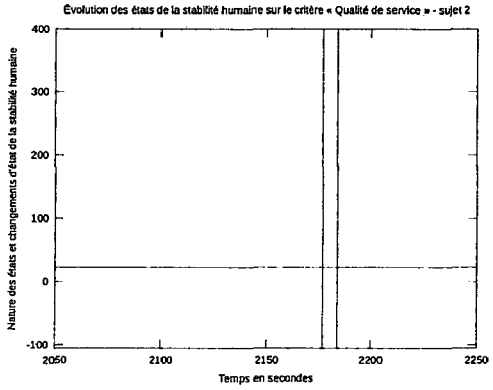
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 9



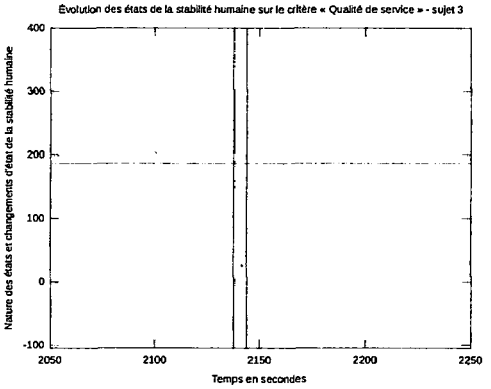
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « confort des passagers » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 10



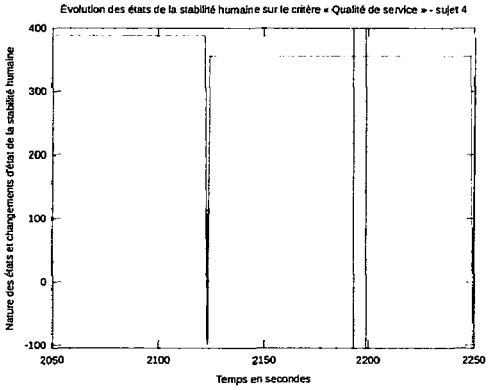
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 1



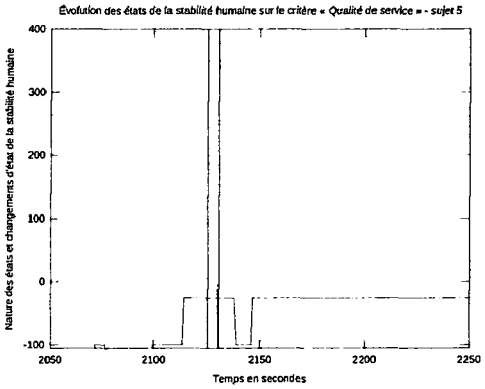
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 2



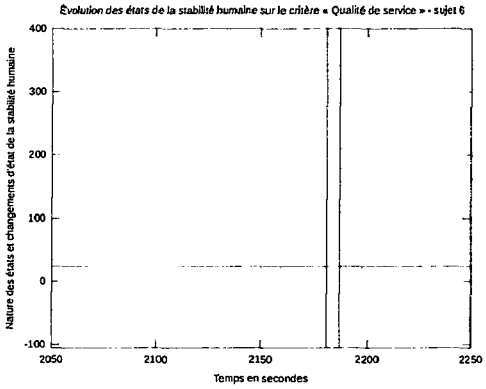
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 3



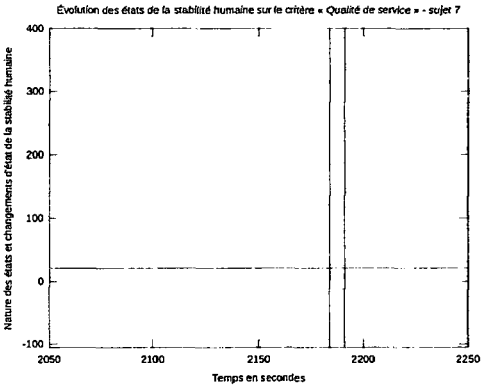
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 4



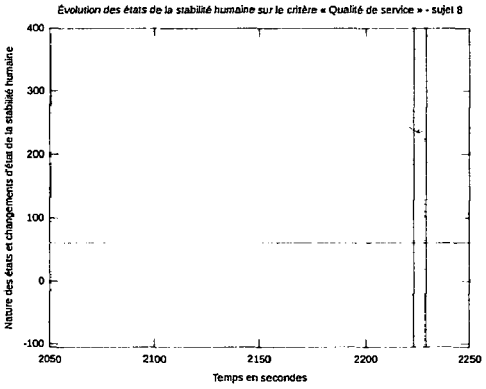
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 5



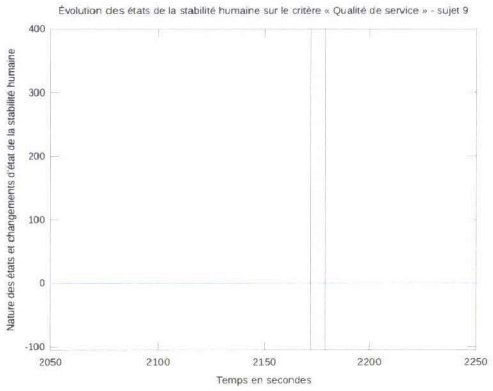
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 6



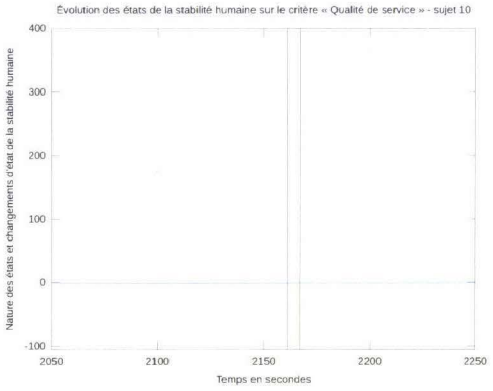
États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 7



États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 8



États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 9



États et changements d'état de la stabilité humaine sur le critère « qualité de service » pour les perturbations CN2-1 et CM - sujet 10

Contribution à la formalisation et à l'identification de la stabilité humaine au regard de la sécurité : application aux transports guidés

Résumé :

Le travail de la thèse propose une contribution originale basée sur le concept de stabilité humaine par l'identification des risques associés dans le cadre de l'évaluation de la sécurité du système. Dans une première partie, les difficultés à prendre en compte les facteurs humains dans les études de sécurité sont mises en évidence et une nouvelle voie de recherche pour l'intégration des facteurs humains basés sur le concept de stabilité est présentée. La deuxième partie propose un état de l'art reposant sur les concepts de stabilité et de résilience. Bien que le concept de stabilité soit habituellement défini autour d'un point d'équilibre durable qui induit un sentiment de contrôle de la sécurité lors du fonctionnement normal, il apparaît que le comportement stable d'un opérateur humain peut entraîner des risques dans certaines situations telles que l'hypovigilance, l'inattention, *etc.*. La troisième partie pose les bases de la stabilité humaine pour l'évaluation des risques. La stabilité humaine est définie comme la capacité de l'opérateur de rester dans un état de fonctionnement stable dans des conditions spécifiées. Ce concept est ensuite formalisé et trois modes de stabilité sont développés (temps, fréquence et séquentiel). La partie suivante vise à appliquer ce concept de stabilité humaine dans le cadre du système **ERTMS/ETCS**. Enfin, des perspectives mettent en évidence cet intérêt de la stabilité humaine par la définition d'indicateurs de risque pour évaluer la sécurité du système.

Mots clés : Stabilité humaine, résilience, sécurité, analyse des risques, transport guidé, système ERTMS/ETCS.

Contribution to the formalization and identification of human stability in terms of security : application to guided transport

Abstract :

The work of the thesis presents an original contribution based on the concept of human stability by identifying the associated risks as part of the safety system assessment. In a first part, the difficulties to take into account human factors in safety studies are highlighted and definitions of new ways for the integration of human factors based on the concept of stability are aimed. The second part presents a state of the art resting on stability and resiliency concepts. Although the stability concept is usually defined around a sustainable equilibrium point that induces a feeling of safety control during normal operation, it appears that the stable behavior of a human operator can lead to risks in certain situations such as hypovigilance, inattention and so on... The third part lays the foundation of human stability for risks assessment. Human stability is defined as the ability of the operator to stay in a stable operating state under specified conditions. This concept is then formalized and three modes of stability are developed (time, frequency and sequential modes). The following part proposes to apply this concept of human stability in the framework of **ERTMS/ETCS**. Then, some perspectives highlight the interest of human stability for the definition of risk indicators to assess system safety.

Keywords : Human stability, resilience, safety, risks analysis, guided transport, ERTMS/ETCS system.