



HAL
open science

Modélisation et prédiction des franchissements de barrières basées sur l'utilité espérée et le renforcement de l'apprentissage : application à la conduite automobile

Abir Chaali-Djelassi

► To cite this version:

Abir Chaali-Djelassi. Modélisation et prédiction des franchissements de barrières basées sur l'utilité espérée et le renforcement de l'apprentissage : application à la conduite automobile. Automatique / Robotique. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2007. Français. NNT : 2007VALE0009 . tel-03001761

HAL Id: tel-03001761

<https://uphf.hal.science/tel-03001761>

Submitted on 12 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

présentée à

l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

pour l'obtention du

Doctorat

*Spécialité Automatique et Informatique des Systèmes Industriels et Humains
Mention Automatique Industrielle et Humaine*

présentée par

Abir CHAALI-DJELASSI

Ingénieur électrique de l'École Supérieure des Sciences Techniques
de Tunis (Tunisie)

**Modélisation et prédiction des Franchissements de Barrière basées
sur l'Utilité Espérée et le Renforcement de l'Apprentissage.
Application à la conduite automobile**

Thèse soutenue le 02 mai 2007 devant le Jury composé de :

M. Pietro-Carlo CACCIABUE	JRC	(Examineur)
M. Eric NIEL	LAI/INSA	(Rapporteur)
M. Daniel NOYES	ENIT	(Rapporteur)
M. Philippe POLET	LAMIH/UVHC	(Co-directeur)
M. Christian TAHON	LAMIH/UVHC	(Examineur)
M. Frédéric VANDERHAEGEN	LAMIH/UVHC	(Directeur)
M. Peter WIERINGA	TU DELFT	(Examineur)

Laboratoire d'Automatique de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines.

CNRS UMR 8530-UVHC



Numéro d'ordre : 07/14

Année 2007

THÈSE

présentée à

l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

pour l'obtention du

Doctorat

*Spécialité Automatique et Informatique des Systèmes Industriels et Humains
Mention Automatique Industrielle et Humaine*

présentée par

Abir CHAALI-DJELASSI

Ingénieur électrique de l'École Supérieure des Sciences Techniques
de Tunis (Tunisie)

**Modélisation et prédiction des Franchissements de Barrière basées
sur l'Utilité Espérée et le Renforcement de l'Apprentissage.
Application à la conduite automobile**

Thèse soutenue le 02 mai 2007 devant le Jury composé de :

M. Pietro-Carlo CACCIABUE	JRC	(Examineur)
M. Eric NIEL	LAI/INSA	(Rapporteur)
M. Daniel NOYES	ENIT	(Rapporteur)
M. Philippe POLET	LAMIH/UVHC	(Co-directeur)
M. Christian TAHON	LAMIH/UVHC	(Examineur)
M. Frédéric VANDERHAEGEN	LAMIH/UVHC	(Directeur)
M. Peter WIERINGA	TU DELFT	(Examineur)

Laboratoire d'Automatique de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines.

CNRS UMR 8530-UVHC

AVANT-PROPOS

Le travail de ce mémoire a été réalisé au Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH) de l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (UVHC), au sein du groupe de recherche Systèmes Homme-Machine, dirigée par monsieur Frédéric Vanderhaegen, professeur à l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. Je tiens à lui témoigner toute ma gratitude pour avoir dirigé mes travaux.

Je suis très reconnaissante envers le professeur Patrik Millot Vice-président de l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis pour m'avoir initié dans le domaine de la recherche.

Je remercie messieurs Pietro-Carlo Cacciabue, professeur et directeur du secteur Facteurs Humains au Centre Commun de Recherche (Joint Reserch Center) à Ispra (Italie), Eric Niel, professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (France), Daniel Noyes, professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (France) et Peter Wieringa, professeur à l'Université Technologique de Delft (TU-DELFT, Pays-Bas) pour m'avoir fait l'honneur de d'examiner ce mémoire et d'en être les rapporteurs.

Je remercie également monsieur Christian Tahon, professeur à l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à monsieur Philippe Polet, maître de conférence à l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis pour son encadrement, sa patience et son aide précieuse.

Bien évidemment je remercie mes collègues Françoise Anceaux, Sébastien Chalmé, Marie-pierre Pacaux-Lemoine, Jérôme Floris, Hervé Morvan et Frédéric Robache. Sans eux la campagne expérimentale sur laquelle se sont basés les travaux de ma thèse ne serait pas.

Je tiens à remercier messieurs Olivier Delepine, Stephen Quéva et Stéphane Zieba, doctorants à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis avec qui j'ai partagé deux bureaux du LAMIH. Ils se sont montrés toujours prêts à m'aider.

Je voudrais également remercier messieurs René Mandiau, Mourad Abed, Houcine Ezzedine, Jean-Cristophe Popieul et Patrice Caulier pour leurs gestes d'amitié et d'encouragement.

Je remercie aussi madame Yamina Bouhanik, doctorante à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis pour son aide et son encouragement.

A mon tendre époux Slim DJELASSI

A mon bébé Mikel

A mes parents Mabrouk et Aziza CHAALI

A Dorra, Imed, Mouhib, Mayssa, Roudaina, Saïda, Mahdi, Mohamed Aziz, Maher,
Mohamed Ridha et Hamdi.

A l'âme de mon ami qui aurait du soutenir sa thèse bien avant moi.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE :	5
CHAPITRE I : L'ERREUR HUMAINE DANS LA SURETE DE FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES HOMME-MACHINE	9
I. Introduction	9
II. La sûreté de fonctionnement dans les systèmes Homme-machine	10
1. Définition du système Homme-machine	10
2. Définition et éléments de la sûreté de fonctionnement	10
2.1 Définition de la sûreté de fonctionnement	10
2.2 Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité, Sécurité	11
2.3 Analyse du risque dans les systèmes Homme-machine	11
2.4 Les Méthodes d'évaluation de la sûreté de fonctionnement	12
III. L'erreur humaine	13
1. Définition de l'erreur humaine	13
2. Classification de l'erreur humaine	15
3. Méthodes d'analyse et d'évaluation de l'erreur humaine	16
3.1 Démarche générale de l'analyse de l'erreur humaine	16
3.2 Méthodes d'analyse et d'évaluation de l'erreur humaine	17
IV. Moyens pour assurer la sûreté de fonctionnement des systèmes Homme-machine	18
1. Les défenses basées sur le principe de la redondance	19
2. Les défenses basées sur la coopération Homme-machine	20
3. Les défenses basées sur la mise en place de barrières	21
3.1 Définition des barrières	21
3.2 Conception des barrières	22
3.3 Placement des barrières	23
a. Les défenses en série :	23
b. Les défenses en profondeur	24
4. Les franchissements de barrière	26
4.1 Définition des violations	26
4.2 Le franchissement de barrière : le résultat d'une analyse en ligne du risque	27
4.3 Démarche générale APRECIH	28
4.4 Identification des modes d'écart	29
4.5 Le modèle BCD	30
4.6 Exemple de l'analyse multicritère basée sur les Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels :	31
4.7 Conclusion	31
CHAPITRE II : ETUDE DES FRANCHISSEMENTS DE BARRIERE ET DE LA PRISE DE DECISION	33
I. Introduction	33
II. Méthodes de prédiction des franchissements de barrière	33
1. Présentation des deux méthodes de prédiction	34
2. Définition des critères	36
3. Prédiction des franchissements de barrière par Raisonnement à Partir de Cas distribué	37
3.1 Le Raisonnement à Partir de Cas	37
3.2 Le Raisonnement à Partir de Cas distribué	38
3.3 Résultats de la prédiction	39
4. Prédiction des franchissements de barrière par réseau de neurone	41
4.1 Le réseau de neurones	41
4.2 Prédiction des franchissements de barrière	42

4.3	Résultats de la prédiction	43
4.4	Discussion	43
III.	La prise de décision	44
1.	La prise de décision dans les systèmes Homme-machine	44
1.1	Définition	44
1.2	Actions et états du monde	45
1.3	La probabilité subjective	47
2.	Différents types de prise de décision	48
3.	La théorie de l'utilité espérée	48
3.1	Définition de l'utilité espérée	48
3.2	La théorie du jeu	49
4.	Les éléments influençant la prise de décision	50
4.1	Les préférences	50
4.2	La décision sous risque	51
5.	La décision multicritère	52
6.	Discussion	53
7.	Conclusion : le franchissement de barrière, un cas particulier de la prise de décision	54

CHAPITRE III : PREDICTION DES FRANCHISSEMENTS DE BARRIERES BASEE SUR L'UTILITE ESPEREE ET LE RENFORCEMENT DE L'APPRENTISSAGE 57

I.	Introduction	57
II.	Modèle générique de la prise de décision d'un franchissement de barrière	58
1.	Démarche de l'analyse de la prise de décision	58
2.	Modèle linéaire générique de la prise de décision d'un franchissement de barrière	58
2.1	Construire l'arbre décisionnel correspondant au franchissement de barrière :	58
2.2	L'affectation des probabilités :	60
2.3	L'attribution des conséquences :	60
2.4	Evaluation des conséquences d'un franchissement de barrière	61
2.5	Calcul de l'utilité espérée	62
	Exemple de calcul de l'utilité espérée	62
2.6	Le modèle générique de l'utilité espérée du franchissement de barrière	63
III.	Modèle linéaire spécifique de la prise de décision d'un franchissement de barrière	64
1.	Affectation des poids aux B, C et D	64
1.1	Pondération des attributs B, C et D en fonction de l'incertitude	64
1.2	Intégration des poids dans le modèle spécifique	65
1.3	Intégration des erreurs sur les poids dans le modèle spécifique de la décision	66
2.	Modèle linéaire spécifique de la prise de décision liée au franchissement de barrière	67
IV.	Prédiction des franchissements de barrière basée sur l'utilité espérée et le Renforcement de l'Apprentissage	68
1.	Le renforcement de l'apprentissage	69
1.1	L'apprentissage pour un système artificiel	69
1.2	Modèle de l'apprentissage par renforcement	69
2.	Description du Contrôle Itératif de l'Apprentissage	72
3.	Méthode de prédiction des franchissements de barrière	73
3.1	Hypothèses	74
3.2	Etapes de la méthode de-prédiction des franchissements de barrière	74
3.3	Renforcement et Correction de $u(FB_i \setminus RB)$	77
4.	Conclusion	79

CHAPITRE IV : APPLICATION DE LA PREDICTION DES FRANCHISSEMENTS DE BARRIERE DANS LE CADRE DE LA CONDUITE AUTOMOBILE 81

I.	Introduction	81
-----------	---------------------	-----------

II.	Application de la méthode de prédiction à la conduite automobile	81
1.	Les barrières étudiées	82
1.1	La situation de Stop	82
1.2	La situation de priorité à droite	83
1.3	La situation de ligne continue	84
2.	Le protocole expérimental:	84
2.1	Le simulateur de conduite :	84
2.2	Le parcours :	85
2.3	Les scénarios	86
2.4	Description de l'accident :	86
2.5	Déroulement de l'expérimentation	87
3.	Définition des critères propres à la conduite automobile :	88
3.1	La Sécurité (S)	88
3.2	Le Degré De Liberté (DDL)	89
3.3	Le Confort (C)	91
3.4	Le gain de Temps (GT)	91
3.5	La charge de travail (WL)	91
4.	Données expérimentales et premiers résultats	93
4.1	Description des sujets et de leurs comportements	93
4.2	Prise en compte des critères	93
III.	Prédiction des franchissements de barrières basée sur le modèle linéaire générique	94
1.	Détermination du seuil de sensibilité Δu	95
2.	Prédiction des franchissements de la barrière de Stop	95
3.	Prédiction des franchissements de la barrière de priorité à droite	96
4.	Prédiction des franchissements de la barrière de ligne continue	96
IV.	Prédiction des franchissements de barrières basée sur le modèle linéaire spécifique	98
1.	Identification des éléments du modèle linéaire spécifique	98
1.1	Identification des poids α_i , β_i et γ_i	98
1.2	Identification des erreurs sur les poids ε_{α_i} , ε_{β_i} et ε_{γ_i}	99
1.3	Le calcul de $u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})$:	100
2.	Prédiction des franchissements de la barrière Stop	101
3.	Prédiction des franchissements de la barrière priorité à droite	104
4.	Prédictions des franchissements de la barrière de ligne continue	105
5.	Discussion	106
5.1	Sensibilité des taux de prédiction correcte aux éléments du modèle linéaire générique	107
5.2	Sensibilité des taux de prédiction correcte aux éléments du modèle linéaire spécifique	107
6.	Conclusion :	109
CHAPITRE V : PERSPECTIVES		111
I.	Les perspectives à court terme	111
1.	Vers la conception d'un guide des méthodes de prédiction des franchissement de barrière	111
2.	Vers une évaluation des probabilités subjectives	112
3.	Vers une évaluation des probabilités objectives	113
3.1	Présentation de la méthode THERP	114
3.2	Exemple de calcul des probabilités de réussite et d'échec d'une procédure prescrite avec THERP	115
3.3	Exemple de calcul des probabilités de réussite et d'échec d'une procédure détournée avec THERP	117
II.	Les perspectives à long terme	119
1.	Vers une analyse de risque plus complète	119
2.	Vers une prédiction en ligne des franchissements de barrière	120
Conclusion Générale		124
Références		126
Annexe 1		137

Annexe 2	144
----------	-----

Introduction Générale :

Les travaux de ce mémoire s'inscrivent dans le thème du groupe de recherche Systèmes Homme-Machine du Laboratoire d'Automatique de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH) à Valenciennes. Ils s'intègrent dans trois projets qui sont :

- UGTMS (Urban Guided Transport Management System) qui est un projet européen du Cinquième Programme Cadre de Recherche et Développement (PCRD) de la Commission Européenne. Son objectif est de fournir aux systèmes de transport guidés urbains (métros, tramways et systèmes de rails légers) un Système de Gestion commun.
- ST2 (Pôle Sciences et Technologies pour la Sécurité dans les Transports) dont les objectifs sont :
 - enrichir les connaissances scientifiques pour analyser et quantifier les risques afin de les prévenir, les gérer et en minimiser les conséquences, en prenant en compte la complexité grandissante des systèmes de transport,
 - définir des paradigmes techniques et les intégrer dans le système de transport dès la conception,
 - développer la complémentarité entre aspects humains et aspects techniques afin d'optimiser la sécurité globale du système de transport dans la relation Homme-machine, via une nouvelle pluridisciplinarité entre sciences humaines, sciences pour l'ingénieur et sciences de l'information et de la communication.
- MODURBAN: Modular Urban Guided Rail System. C'est un projet européen du cinquième PCRD. Il rassemble les principaux fournisseurs et exploitants des transports guidés urbains. Son objectif est de :
 - concevoir, développer et tester une architecture fondamentale innovatrice et commune du système urbain de transport et ses interfaces clés (cela couvre le Contrôle de Commande, l'économie d'énergie et des accès des sous-systèmes),
 - préparer une voie pour les générations suivantes de systèmes de transports communs urbains et guidés.

La sûreté de fonctionnement dans les systèmes Homme-machine est devenue un domaine incontournable pour les industries et les transports. Son rôle est justifié par sa corrélation avec l'impact des événements risqués sur les systèmes, les opérateurs humains, les usagers et l'environnement.

La sûreté de fonctionnement est une analyse bidimensionnelle qui doit prendre en compte non seulement les défaillances techniques engendrées par les composantes techniques du système Homme-machine mais aussi les défaillances causées par sa composante humaine. Ces défaillances humaines sont dans certains domaines à l'origine de 65 à 80 % des accidents [AMALBERTI, 01].

De nombreuses études se sont intéressées aux erreurs humaines et ont permis de les définir et de les analyser. Cependant, lorsqu'on se base sur la classification des erreurs humaines de

REASON [REASON, 90], nous pouvons constater que la majorité de ces analyses n'ont pas pris en compte les erreurs volontaires (violations). Ces violations sont peu intégrées dans les études de sûreté de fonctionnement des systèmes Homme-machine.

Pour limiter les occurrences et/ou les conséquences des erreurs humaines, les concepteurs munissent les systèmes Homme-machine de barrières qui peuvent ne pas être respectées par les opérateurs humains. Les violations de ces barrières, appelées franchissements de barrière, peuvent présenter des conséquences néfastes sur le système Homme-machine et son environnement.

Afin de mieux concevoir les barrières, il est nécessaire d'intégrer les franchissements de barrière dans la phase de conception des systèmes Homme-machine. Cette intégration nécessite la modélisation et la prédiction des franchissements de barrière.

Ce mémoire propose deux modèles linéaires des franchissements de barrière : un modèle linéaire générique et un modèle linéaire spécifique.

Le modèle générique intègre :

- les critères définis par l'exploitant tels que la sécurité ou par l'opérateur humain tels que la charge de travail,
- les attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels associés aux critères,
- un seuil de sensibilité Δu .

Le modèle spécifique est un modèle qui intègre en plus des éléments du modèle générique :

- les poids α , β et γ associés aux attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels,
- les erreurs ε_α , ε_β et ε_γ sur les poids.

Ces deux modèles linéaires permettent le calcul de l'utilité espérée du franchissement de barrière. Cette utilité espérée nous permet de conclure sur la nature du comportement de l'opérateur humain et, par conséquent, de prédire les franchissements de barrières.

Le paramétrage des éléments des deux modèles linéaires (générique et spécifique) nous permet d'affiner la valeur de l'utilité espérée du franchissement de barrière. Ce paramétrage est assuré par la correction ou le renforcement des valeurs des erreurs ε_α , ε_β et ε_γ sur les poids.

Le plan que nous suivrons dans ce mémoire se décompose en cinq chapitres. Dans le premier chapitre, nous aborderons la nécessité de la prise en compte des erreurs humaines dans l'étude de la sûreté de fonctionnement des systèmes Homme-machine. En effet, après avoir défini les systèmes Homme-machine, les éléments de la sûreté de fonctionnement et l'analyse du risque, nous nous intéressons aux erreurs humaines. A ce titre, nous présenterons leurs définitions, leur classification en erreurs non intentionnelles et erreurs intentionnelles (les violations). Puis nous aborderons les différentes méthodes qui les analysent. Ensuite, nous présentons différents moyens pour améliorer la sûreté de fonctionnement d'un système Homme-machine. Ces moyens sont la redondance, la coopération Homme-machine et la mise en place de barrières. La dernière partie de ce chapitre portera sur l'analyse des franchissements de barrières qui sont des violations intentionnelles des barrières. Cette analyse est illustrée par la méthode APRECIH [VANDERHAEGEN & al, 98], [VANDERHAEGEN,

01] et ses deux résultantes qui sont l'identification des modes d'écart et le modèle Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels.

La première partie du second chapitre est consacrée à la prédiction des franchissements de barrière. Elle présente deux méthodes récentes établies dans l'équipe Système Homme-Machine du LAMIH. Ces deux méthodes sont fondées sur le modèle Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels. La première méthode est basée sur le Raisonnement à Partir de Cas distribué pour prédire le nombre de franchissements par famille de barrière [POLET, 03]. La deuxième méthode est basée sur le réseau de neurones pour prédire le franchissements de familles de barrière [ZHANG, 04].

La deuxième partie de ce chapitre est dédiée à l'analyse de la prise de décision dans les systèmes Homme-machine. Elle en présente les différents éléments : les actions, les conséquences et les probabilités subjectives ainsi que les éléments qui peuvent l'influencer tels que les préférences. La théorie de la prise de décision est illustrée par la théorie de l'utilité espérée et la théorie du jeu. La dernière partie de ce chapitre est dédiée à la décision multicritère.

Afin de prédire les franchissements de barrières, le troisième chapitre présente deux modèles linéaires de la prise de décision relative au franchissement ou au respect de barrière. Le premier est un modèle générique qui intègre (1) les critères, (2) les attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels associés aux critères et (3) le seuil de sensibilité Δu .

Le modèle spécifique intègre, en plus des éléments du modèle générique, les poids α , β et γ associés aux attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels et les erreurs ε_α , ε_β et ε_γ sur les poids. Ces deux modèles permettent de prédire les franchissements de barrière.

La deuxième partie de ce chapitre présente la nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière. Cette méthode profite des caractéristiques du renforcement de l'apprentissage pour corriger ou renforcer les valeurs des erreurs sur les poids et, par conséquent, affiner la valeur de l'utilité espérée du franchissement de barrière.

Dans le quatrième chapitre, nous appliquons la méthode de prédiction dans le cadre de la conduite automobile : un domaine propice à l'observation des franchissements de barrières. La première partie de ce chapitre présente le simulateur de conduite, le protocole expérimental et les scénarios de l'expérimentation. Cette partie est également consacrée à la définition des différents critères retenus pour la conduite automobile. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée aux résultats de la prédiction des franchissements de barrière et à l'étude de la sensibilité de la méthode aux différents éléments des deux modèles linéaires (générique et spécifique).

Le cinquième chapitre conclut les travaux de ce mémoire et présente leurs perspectives. Ces perspectives peuvent être à court ou à long terme. Parmi les perspectives à court terme, nous retrouvons d'abord, la proposition d'un guide des méthodes de prédiction des franchissements de barrière. Ensuite, l'amélioration des deux modèles linéaires générique et spécifique par l'intégration des probabilités subjectives et objectives dans le calcul de l'utilité espérée du franchissement de barrière. L'évaluation des probabilités subjectives est obtenue par les opérateurs humains ou par jugement d'experts et le calcul des probabilités objectives est obtenu avec la méthode THERP. La démarche du calcul des probabilités objectives est illustrée par un exemple dans le cadre de la conduite du RER 'A' (Rames Expressément Régionales 'A'). L'obtention des probabilités objectives nous permet de proposer une démarche complète de l'analyse du risque dans les systèmes Homme-machine qui intègre les

erreurs humaines intentionnelles et non intentionnelles ainsi que leurs conséquences et probabilités d'échec.

La conception de barrières intelligentes concerne nos perspectives à plus long terme. L'objectif serait de prédire en ligne les franchissements de barrière potentiels et d'agir pour les éviter ou minimiser leurs conséquences. La prédiction en ligne de ces franchissements de barrière peut se baser sur une combinaison des trois méthodes de prédiction basées sur le Raisonnement à Partir de Cas distribué, le réseau de neurones et l'utilité espérée du franchissement de barrière.

Chapitre I : L'erreur humaine dans la sûreté de fonctionnement des systèmes Homme-machine

1. Introduction

La sûreté de fonctionnement est un domaine incontournable pour les industries et les transports, en raison de sa corrélation avec la notion de qualité, les problèmes liés à l'association Homme-machine et l'impact sur l'environnement. Les premières études de sûreté de fonctionnement sont apparues essentiellement dans les transports ferroviaires pour le développement des recueils statistiques des pièces mécaniques. Ensuite, le développement des transports aériens a conduit à évaluer la sécurité opérationnelle des vols par l'introduction des objectifs chiffrés en termes de probabilité d'occurrence d'accident par heure de fonctionnement (1 accident pour 100 000 h de vol en 1939). Puis, les premiers indicateurs chiffrés tels que le Temps Moyen de Fonctionnement Entre Défaillance ont fait leur apparition (dans les années 1950) en vue de quantifier la fiabilité des composants.

L'essentiel des méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement (utilisées encore aujourd'hui) a été établi pendant les années 1960. Parmi ces méthodes nous retrouvons l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets, les arbres des causes, la méthode des combinaisons de pannes, la méthode du diagramme du succès et la méthode THERP (Technique for Human Error Rate Prediction).

Les dernières décennies ont été marquées par la prise en compte de l'informatique industrielle et des facteurs humains dans les études de sûreté de fonctionnement. Cette prise en compte résulte de l'apparition de nouveaux outils tels que les chaînes de Markov, les réseaux de Petri, les simulations, l'utilisation de logiciels de calcul de fiabilité, les modélisations et simulations des accidents, Malheureusement, ces dernières décennies ont aussi été marquées par des catastrophes majeures telles que Bhopal (Inde, 1984), l'explosion de la navette Challenger (USA, 1986) et Tchernobyl (URSS, 1986).

Il n'existe désormais pratiquement aucun domaine d'activité industrielle où la sûreté de fonctionnement n'est pas prise en compte (même partiellement) dans tout le cycle de vie du système Homme-machine (conception, fabrication, exploitation, maintenance et mise au rebut).

La sûreté de fonctionnement dans les systèmes Homme-machine est une étude bidimensionnelle. En effet, elle doit prendre en compte non seulement les défaillances techniques engendrées par la (ou les) composante(s) technique(s) du système Homme-machine, mais, surtout les défaillances humaines causées par sa composante humaine. Ces défaillances sont, dans certains domaines, la source majeure des accidents [AMALBERTI, 01].

Afin de mieux expliquer la nécessité de prendre en compte les erreurs humaines dans la sûreté de fonctionnement, nous commencerons, dans ce chapitre, par définir le système Homme-machine, la sûreté de fonctionnement et l'analyse de risque qui lui est associée. Ensuite, nous nous intéresserons à l'erreur humaine en abordant les méthodes de son analyse et les moyens (les barrières) qui limitent leurs occurrences et/ou leurs conséquences. Enfin, dans la dernière partie de ce chapitre, nous présenterons une modélisation des erreurs

volontaires des opérateurs humains qui repose sur le modèle Bénéfices Coûts et Déficits potentiels (modèle BCD).

II. La sûreté de fonctionnement dans les systèmes Homme-machine

1. Définition du système Homme-machine

Un système Homme-machine est un système complexe particulier. En effet, c'est une organisation composée d'Hommes et de systèmes techniques reliés entre eux par des moyens de communication et travaillant pour atteindre un but commun, en fonction des contraintes de l'environnement [SPERANDIO, 88]. Le rôle de l'opérateur humain y est souvent remis en question du fait de l'évolution importante des technologies et des objectifs de la sécurité du système Homme-machine. La définition du rôle de l'opérateur humain dans le système Homme-machine est fortement liée au degré d'automatisation du système technique.

Le système Homme-machine est un système qui évolue constamment mettant en jeu à la fois les compétences techniques et humaines. Les interactions entre l'opérateur humain et le système technique influencent les paramètres de la sûreté de fonctionnement et toute analyse de risque doit tenir compte de l'ensemble du système Homme-machine. Ceci impose une analyse fonctionnelle et structurelle du système afin de définir l'organisation de l'ensemble des composantes du système Homme-machine. L'aspect structurel concerne l'organisation spatiale des composants et l'aspect fonctionnel concerne les processus mis en jeu.

L'occurrence d'un événement redouté dans un système Homme-machine peut avoir des conséquences négatives sur le système, les opérateurs humains ou l'environnement. Il est donc nécessaire d'établir une étude de sûreté fonctionnement dans les systèmes Homme-machine et de définir les éléments de cette étude.

2. Définition et éléments de la sûreté de fonctionnement

2.1 Définition de la sûreté de fonctionnement

Les mots *sûreté* et *sécurité* ont la même racine étymologique (du latin *securus* : sûr). La sécurité, en particulier en France, implique actuellement les aspects réglementaires de la sécurité des personnes. Le terme sûreté est plutôt utilisé par les techniciens pour la conception ou l'exploitation de biens et de services pour qualifier la fiabilité et la disponibilité du fonctionnement des installations [ZWINGELSTEIN, 99].

La sûreté de fonctionnement est aussi appelée la science des défaillances. La défaillance est définie comme un événement particulier qui conduit à la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise (Cf. Figure 1).

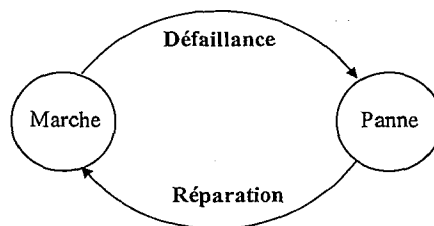


Figure 1 : L'état de marche et l'état de panne

Un système Homme-machine est défaillant si ses capacités fonctionnelles sont interrompues (panne ou arrêt volontaire par action d'un système interne de protection ou une procédure manuelle équivalente). Dans le cas d'une dégradation sans perte totale de la fonction, on considère qu'il s'agit d'une défaillance si la performance du système Homme-machine tombe au-dessous d'un seuil défini.

La sûreté de fonctionnement se caractérise à la fois par les études structurelles statiques et dynamiques des systèmes Homme-machine. Elle peut correspondre à un point de vue prévisionnel mais aussi opérationnel et expérimental (essais, accidents) tout en tenant compte des probabilités et des conséquences induites par les défaillances techniques et humaines.

La sûreté de fonctionnement est aussi appelée la FMDS. Elle repose sur l'étude de la *Fiabilité*, la *Maintenabilité*, la *Disponibilité* et la *Sécurité* (FMDS). Nous définissons dans le paragraphe suivant ces différents aspects.

2.2 Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité, Sécurité

La sûreté de fonctionnement permet d'évaluer la confiance qu'on peut avoir dans les services assurés par le système Homme-machine. Cette confiance peut être définie selon les quatre aspects suivants [VILLEMEUR, 88]:

- *la Fiabilité* qui est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données et pendant une durée donnée ;
- *la Disponibilité* qui est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant donné ;
- *la Maintenabilité* qui est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise ;
- *la Sécurité* qui est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.

Après avoir défini la sûreté de fonctionnement dans les systèmes Homme-machine, il semble important de présenter les méthodes qui l'ont évalué. Puisque la notion de la sûreté de fonctionnement est étroitement liée à la notion du risque, nous nous intéresserons d'abord à l'étude du risque dans les systèmes Homme-machine.

2.3 Analyse du risque dans les systèmes Homme-machine

Le risque est généralement défini comme la combinaison d'un niveau de gravité de la conséquence d'un événement indésirable et d'un degré de certitude sur l'occurrence de cet événement [Nf, 91] et [Nf, 97]. Il est donc une combinaison de deux aspects importants qui sont [GOGUELIN, 88] :

1. *L'aspect redouté du risque* : le risque renvoie à la notion de danger, de péril, d'inconvénient auquel un objet ou un individu est exposé. Il s'agit de la *conséquence* redoutée d'un événement ou d'une action.
2. *L'aspect incertain du risque* : le risque est associé à son caractère éventuel pouvant être le fruit du hasard. Le risque appartient au domaine du possible, du *probable*.

L'analyse des risques est une analyse qui se rattache aux événements non sécuritaires. Du fait de la composition du système Homme-machine, l'analyse du risque qui lui est associée se doit de tenir compte (1) des défaillances techniques et (2) des défaillances humaines (Cf. Figure 2).

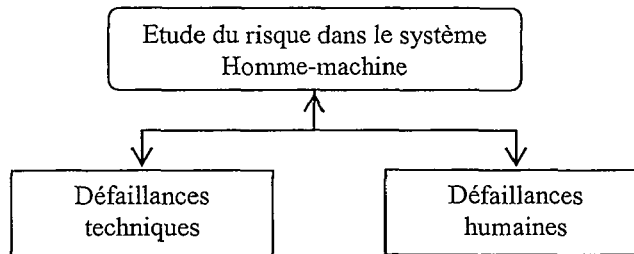


Figure 2 : Etude du risque dans les systèmes Homme-Machine

L'étude de la sûreté de fonctionnement des systèmes Homme-machine concerne à la fois, leur conception (évaluation a priori du risque) et leur exploitation (évaluation a posteriori du risque). Dans sa démarche, elle vise à évaluer un ensemble de moyens de prévention, d'évitement, de confinement ou de correction pour accroître la sécurité du système global. Nous nous intéressons de plus près aux méthodes qui illustrent ou quantifient cette démarche. Ces méthodes sont résumées ci-dessous.

2.4 Les Méthodes d'évaluation de la sûreté de fonctionnement

Plusieurs méthodes illustrent les étapes d'identification et de quantification de la démarche d'analyse de la sûreté de fonctionnement [VILLEMEUR, 88] et [FADIER, 90].

- *L'Analyse Préliminaire des Dangers (APD)* a pour objectif d'identifier les dangers d'un système industriel et d'évaluer leur gravité.
- *L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)* qui est une méthode d'analyse systématique de chaque composant du système concerné par l'étude. Elle a pour but d'identifier les modes de défaillances dont les effets négatifs sont observables au travers de la diminution de la fiabilité, de la disponibilité ou de la sécurité du système.
- *L'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)* qui est une extension de l'AMDE. Elle se compose d'une AMDE et d'une analyse de criticité qui permet d'évaluer les gravités des différents modes de défaillance.
- *La méthode du Diagramme de Succès (MDS)* est utilisée pour évaluer les possibilités voire les probabilités de défaillance d'un système. Un diagramme de succès est une présentation des dépendances de fiabilité entre les différents composants d'un système.
- *La méthode de l'arbre des Causes (MAC)* est également connue sous les noms d'*Arbres des Défauts* ou d'*Arbres des Défaillances*. Elle se base sur une représentation graphique de combinaisons logiques de causes conduisant à l'événement redouté ou événement sommet (Top event), correspondant au sommet de l'arbre.

- *La Méthode de l'Espace des Etats (MEE)* permet de tenir compte de l'évolution temporelle des composants. De ce fait, elle est par excellence dédiée aux systèmes à composants réparables.

Ces méthodes sont des méthodes qui évaluent et prédisent la sécurité. Elles s'appuient sur des analyses de risque fondées sur des probabilités d'occurrence d'un événement ou état indésirable pondérées par les quantifications des conséquences de chaque événement ou état. Elles se basent sur une décomposition structurale du système en composants élémentaires afin d'identifier les différentes défaillances et d'étudier leurs combinaisons.

Avec l'avancement du développement technique, les outils ou les systèmes techniques sont de plus en plus sûrs. L'une des priorités de la sûreté de fonctionnement des systèmes Homme-machine est alors de supprimer les erreurs humaines, ou, de façon plus réaliste, de les réduire au maximum.

Nous nous limiterons, dans ce mémoire, à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement liée à la composante humaine du système Homme-machine. Pour ce faire, nous présenterons dans les paragraphes qui suivent la définition de l'erreur humaine, sa classification ainsi que les moyens qui permettent d'en réduire l'occurrence et/ou les conséquences qui sont les barrières. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à l'analyse des violations de ces barrières.

III. L'erreur humaine

Le taux d'erreur humaine dans les systèmes Homme-machine peut atteindre 5 à 10 erreurs par heure [AMALBERTI, 01]. Heureusement, la plupart de ces erreurs sont détectées et récupérées par l'opérateur humain. Certaines erreurs peuvent alors être utiles à l'opérateur humain dans la mesure où elles l'aident à augmenter ses compétences en améliorant ses connaissances qu'il a du système qu'il contrôle [SHERIDAN, 85]. Cependant, de nombreuses études ont montré que, pour des systèmes complexes tels que les systèmes de transport ou les centrales nucléaires, l'erreur humaine est à l'origine de 65 % à 80 % des accidents [AMALBERTI, 01].

1. Définition de l'erreur humaine

Il existe de nombreuses définitions de l'erreur humaine [ISD, 94], [SALVENDY, 97]. Nous présentons dans la suite quelques-unes de ces définitions. Avant tout, étant donné que le terme « erreur » a une connotation négative blâmant la personne qui l'a commise, il a été recommandé d'utiliser plutôt les notions d'« acte erroné » [HOLLNAGEL, 98] ou d'« acte risqué » [USN, 98, 00]. Néanmoins, le terme général d'« erreur » sera utilisé dans ce mémoire.

D'après RASMUSSEN [RASMUSSEN, 97], la signification de l'erreur humaine a considérablement évolué au cours des années : ce qui est considéré comme une erreur humaine est souvent arbitraire car les liens entre l'origine de l'erreur, c'est-à-dire le comportement, et les conséquences ne sont pas évidents.

Une erreur peut être considérée comme un écart par rapport aux exigences du système. Selon RIGBY [RIGBY, 70], une action humaine doit être évaluée comme une erreur si les exigences établies du système ne sont pas satisfaites.

Une erreur peut être considérée aussi comme une action issue d'un ensemble d'actions humaines et qui dépasse une certaine limite d'acceptabilité [SWAIN, 90], [SALVENDY, 87, 97].

Les définitions précédentes semblent considérer l'erreur humaine comme une action. Mais, ISAAC et al [ISAAC & al, 03] considèrent que l'erreur humaine peut être non seulement une action (erreur de *commission*) mais aussi une *inaction* (erreur d'*omission*). En effet, une erreur d'*omission* est relative à l'absence d'une action réponse à une tâche prescrite. Elle est définie comme une défaillance de l'opérateur humain [SWAIN, 83], [HOLLNAGEL, 98], [USN, 98, 00]. Une erreur de *commission* est définie comme une action erronée qui peut avoir comme conséquence la dégradation de l'état du système Homme-machine [NUREG, 00].

La définition de l'erreur humaine qui nous semble être simple et complète à la fois, et que nous retenons, est la définition qui se base sur la différence entre la tâche prescrite et l'activité de l'opérateur humain. En effet, dans cette définition, l'erreur humaine est souvent définie comme étant l'écart ou la différence constatée ou mesurée entre la tâche prescrite et l'activité de l'opérateur humain. Elle peut être définie aussi comme étant l'écart entre le résultat obtenu et celui voulu (Cf. Figure 3).

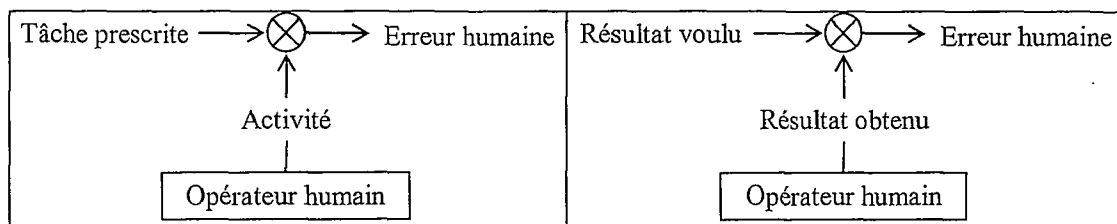


Figure 3 : Définition de l'erreur humaine

Avec :

- la *tâche prescrite* présente ce que l'opérateur humain est censé faire. C'est une donnée appréhendée à partir des conditions techniques et organisationnelles, des procédures d'exploitation ou des modes opératoires caractérisant la situation analysée du travail.
- *L'activité* est ce que l'opérateur humain fait réellement. Son analyse permet de mettre en évidence les éléments mis en jeu pour exécuter la tâche prescrite [LEPLAT, 85].

Cependant l'obtention du résultat voulu n'implique pas que l'opérateur humain n'a pas commis d'erreur. En effet, il peut assurer le résultat voulu tout en opérant différemment de la tâche prescrite. De la même manière, l'opérateur peut suivre la procédure prescrite dans son activité et ne pas assurer le résultat voulu.

Les définitions de l'erreur humaine ne sont pas suffisantes pour l'englober. En effet, ces définitions ne prennent pas en compte le cas où l'opérateur humain décide intentionnellement de ne pas respecter une procédure prescrite. Ce type d'erreur appelé violation a bien été distingué dans la classification de l'erreur humaine objet du paragraphe suivant.

2. Classification de l'erreur humaine

La classification de l'erreur humaine la plus citée est celle de REASON [REASON, 90]. Cette classification est basée sur le modèle '*Skill, Rule and Knowledge Based Behaviour*' appelé aussi '*échelle double*' de RASMUSSEN [RASMUSSEN, 83]. RASMUSSEN [RASMUSSEN, 83, 86]. Elle distingue trois types de comportements de l'opérateur humain :

- Le premier type de comportement est basé sur les *habiletés* (*Skill Based Behaviour*). Les actions de l'opérateur humain sont exécutées de façon automatique en réponse à des signaux perçus sur l'état du système sans étape d'interprétation.
- Le deuxième type de comportement est basé sur des règles acquises par l'*expérience* (*Rule Based Behaviour*). L'opérateur humain adopte ce comportement quand il est face à des situations connues. Il applique une procédure prédéfinie, mémorisée dans sa mémoire à long terme et correspondant au modèle fonctionnel qu'il s'est forgé par apprentissage sur le procédé piloté [MILOT, 88].
- Le troisième type de comportement est basé sur la *connaissance* du dispositif (*Knowledge Based Behaviour*). Ce comportement correspond à des situations inhabituelles ou inconnues. Il s'agit alors pour l'opérateur humain de créer ou d'inventer le mode opératoire à suivre en parcourant toutes les étapes indiquées par l'échelle.

Dans la taxonomie de l'erreur humaine, REASON [REASON, 90] distingue quatre types d'erreurs (Cf. Figure 4) : les ratés, les lapsus, les fautes et les violations. Les ratés et les lapsus sont des erreurs d'exécution que l'on peut rattacher au niveau des habiletés. Les fautes sont dues à des défaillances dans la sélection de tâches ; elles correspondent au niveau des règles et des connaissances. Nous détaillerons les violations dans la quatrième partie de ce chapitre.

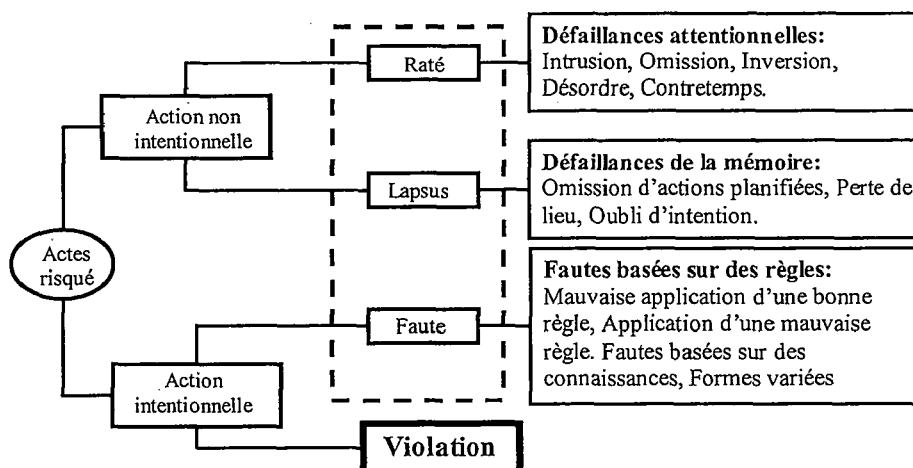


Figure 4 : Différents types de l'erreur humaine [REASON, 90]

Après avoir défini et classé les erreurs humaines et afin de les maîtriser et réduire leurs conséquences et/ou occurrences, il est nécessaire de connaître les méthodes qui se sont

intéressées à leur évaluation et leur analyse. En effet, l'analyse des erreurs humaines permet de comprendre leurs causes et les phénomènes qui favorisent leur occurrence. Elle permet ainsi d'améliorer les processus de conception du système Homme-machine par l'identification de défenses qui auront pour rôle la lutte contre ces erreurs. Mais avant de résumer ces méthodes, il est nécessaire de décrire la démarche générale de l'analyse de l'erreur humaine. Cette démarche est détaillée dans le paragraphe suivant.

3. Méthodes d'analyse et d'évaluation de l'erreur humaine

3.1 Démarche générale de l'analyse de l'erreur humaine

La décomposition fonctionnelle du système Homme-machine à concevoir dépend, en premier lieu, des objectifs et des contraintes que celui-ci doit satisfaire. L'analyse des tâches permet de prescrire la contribution des opérateurs humains dans la réalisation des fonctions ainsi que les conditions d'exécution normale de leurs tâches prescrites. Elle permet de déterminer le référentiel pour l'identification des erreurs potentielles ainsi que leurs modes de contrôle pour revenir à une situation normale. Ensuite, une analyse quantitative permet de calculer la probabilité d'occurrence de ces erreurs. Une analyse des conséquences peut être réalisée pour évaluer le risque de l'erreur humaine et identifier des défenses internes ou externes pour le limiter (Cf. Figure 5). Plusieurs méthodes se sont intéressées à cette analyse. Elles sont présentées dans le paragraphe suivant.

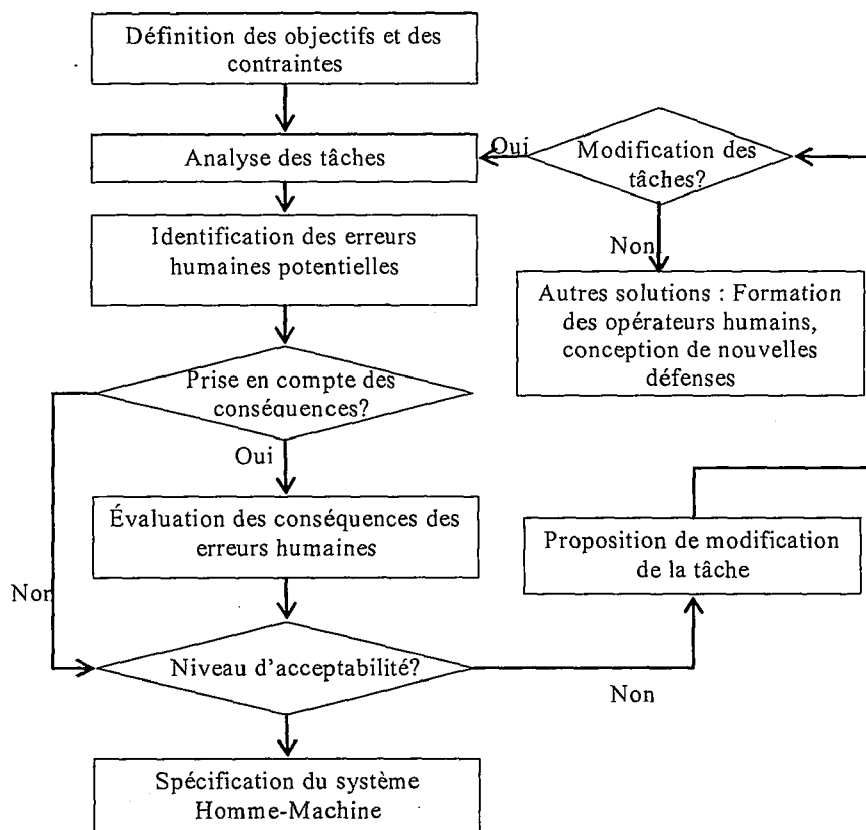


Figure 5 : Prise en compte de l'erreur humaine dans la conception d'un système Homme-Machine, adaptée de [GERDES, 97]

3.2 Méthodes d'analyse et d'évaluation de l'erreur humaine

Dans ce chapitre, nous ne cherchons pas à détailler toutes les méthodes mais à en présenter quelques-unes afin de comprendre les différentes démarches possibles de l'analyse et de l'évaluation de l'erreur humaine.

Les méthodes d'évaluation de l'erreur humaine peuvent être groupées en cinq classes distinctes (Cf. Tableau 1) : les méthodes basées sur un modèle de dysfonctionnement, les méthodes basées sur l'évaluation d'événements redoutés, les méthodes basées sur un modèle de taxonomie, les méthodes basées sur un calcul probabiliste de l'erreur et les méthodes basées sur un modèle de simulation.

Exemple	Principe	Objectif
MAFERGO, PRISMA, BASIS, RECUPERARE	Modèle de dysfonctionnement	Analyse de la fiabilité opérationnelle et analyse d'incidents a posteriori / conception
AMDE(C), MAC	Evaluation d'événements redoutés	Analyse des défaillances a priori / conception
GEMS, CREAM	Modèle de taxonomie de l'erreur	Analyse cognitive de l'erreur
TESEO, THERP	Probabilité d'occurrence d'erreur	Analyse quantitative de l'erreur à priori
DYLAM, HITLINE	Modèle de simulation	Analyse des comportements dynamiques

Tableau 1 : Approches d'analyse de l'erreur humaine, adaptées de [VANDERHAEGEN, 03]

L'analyse qualitative ou quantitative de la contribution des facteurs humains dans la genèse de dysfonctionnements des systèmes Homme-machine est prise en compte dans les méthodes d'évaluation prospective de l'erreur humaine comme : MAFERGO (Méthodologie d'Analyse de la Fiabilité et ERGOnomie opérationnelle) [FADIER, 97], PRISMA (Prevention and Recovery Information System for Monitoring and Analysis) [SCHAAF, 97], BASIS (British Airways Safety Information System) [LEARY, 99] ou RECUPERARE (vise à étudier les possibilités de récupération d'incidents modélisés dans une base de données prédéfinies) [BAUMONT, 99]. Ces approches sont basées sur un modèle de dysfonctionnement afin d'analyser les incidents ou accidents et d'en déterminer des parades préventives ou correctives.

Les méthodes classiques d'analyse de défaillances techniques peuvent être adaptées à l'étude des facteurs humains. Par exemple, les méthodes inductives, comme l'AMDEC, peuvent déterminer les conséquences à partir des causes des erreurs humaines alors que des méthodes déductives comme la méthode des Arbres des Causes peuvent déduire les causes à partir des conséquences redoutées de l'erreur humaine [VILLEMEUR, 88] & [POLET, 02]. Les méthodes GEMS (Generic Error-Modeling System) ou CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method) sont des méthodes basées sur des modèles de taxonomie. En effet, la taxonomie intégrée dans GEMS développe les causes des erreurs non intentionnelles (les ratés, les lapsus ou les fautes) et intentionnelles (les violations). La taxonomie utilisée dans CREAM développe les manifestations et les causes des erreurs [HOLLNAGEL, 98]. Les méthodes comme TESEO (Tecnica Empirica Stima Errori Operatori) ou THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) sont basées sur le calcul probabiliste de l'erreur humaine.

Il semble évident que les méthodes d'analyse et de contrôle de l'erreur humaine sont nombreuses. Cependant, ces méthodes présentent des points de faiblesse. En effet :

- elles nécessitent la connaissance des probabilités associées aux erreurs humaines, des probabilités qui sont difficiles à déterminer et sensibles à la nature humaine et donc variables ;
- elles n'assurent pas les mêmes résultats lorsqu'elles sont appliquées par des équipes d'évaluateurs différentes et, pour une même équipe, les résultats issus de méthodes différentes ne sont pas identiques [HUMPHERY, 88], [SWAIN, 89], [REASON, 90], [KIRWAN, 97] ;
- elles sont appliquées exclusivement aux erreurs humaines de façon générale et n'abordent en aucun cas les erreurs intentionnelles des opérateurs humains, c'est-à-dire les violations [POLET, 02].

Les méthodes pour contrôler les erreurs humaines aident le concepteur du système Homme-machine à identifier des défenses contre ces erreurs humaines. Ces défenses comme, par exemple, les barrières ont pour rôle la réduction des actions risquées faites par les opérateurs humains et/ou leurs conséquences. Les violations de ces barrières par les opérateurs sont appelées franchissements de barrières (FB) [POLET, 02].

Avant d'aborder avec plus de détails les barrières et les franchissements de barrières dans la dernière partie de ce chapitre, nous présentons d'abord d'autres moyens pour améliorer la sûreté de fonctionnement dans les systèmes Homme-machine : les systèmes redondants et les systèmes coopératifs.

IV. Moyens pour assurer la sûreté de fonctionnement des systèmes Homme-machine

Afin d'améliorer la sûreté de fonctionnement du système Homme-machine, différentes défenses peuvent être mises en œuvre. Elles visent le traitement des erreurs et la limitation de la propagation des défaillances. Parmi ces défenses, nous retrouvons les défenses basées sur

le principe de la redondance, les défenses basées sur la coopération Homme-machine et les défenses basées sur la mise en place de barrières [VANDERHAEGEN & MILLOT, 01].

1. Les défenses basées sur le principe de la redondance

La redondance est un des moyens qui permettent d'accroître la sûreté de fonctionnement d'un système Homme-machine en améliorant sa disponibilité ou sa fiabilité. Elle utilise plusieurs ressources pour réaliser une même tâche [Park, 97], [Villemeur, 88]. Elle peut soit (1) agir sur le procédé et en modifier le comportement, soit (2) permettre à une ressource donnée de disposer de plusieurs moyens d'acquisition d'une même information [VALOT, 89]. Dans une configuration en parallèle, un système à deux éléments est fiable si au moins un des deux l'est (Cf. Figure 6).

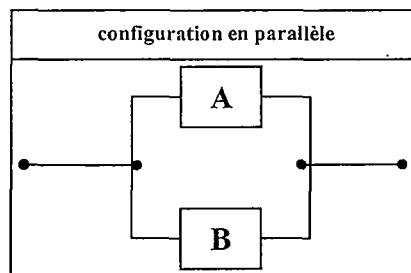


Figure 6 : Fiabilité des éléments en parallèle

Un système redondant est un système qui se base sur des configurations parallèles. C'est un système constitué de n éléments redondants. Il est fiable ou disponible si au moins un de ses éléments est fiable ou disponible. Parmi les configurations redondantes nous pouvons rencontrer des configurations particulières telles :

- les redondances m/n , appelées aussi redondances actives, où le système fonctionne si au moins m composants sur n fonctionnent (cas des réacteurs pour un avion de ligne),
- les redondances passives qui permettent d'activer un composant lorsque son homologue est défaillant (Cf. Tableau 2).

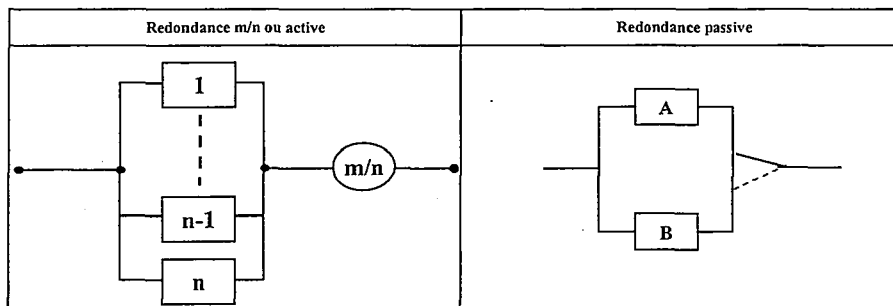


Tableau 2 : Configurations redondantes passives et actives

Les ressources redondantes peuvent ne pas être de même nature. En effet, il est possible qu'une même tâche soit réalisable par le système technique ou par l'opérateur humain. Par exemple, la tâche de conduite de certains trains peut être assurée automatiquement par le train ou manuellement par le conducteur. Ce type de redondance doit pouvoir être interactif, voire coopératif. L'étude de la sûreté de fonctionnement des systèmes Homme-machine nécessite alors l'exploitation d'autres défenses telles que les défenses basées sur la coopération Homme-machine.

2. Les défenses basées sur la coopération Homme-machine

Rappelons, tout d'abord, qu'un système Homme-machine est une organisation composée d'Hommes et de systèmes techniques reliés entre eux par des moyens de communication et travaillant pour atteindre un but commun. L'interaction entre l'opérateur humain et le système technique est considérée, dans la plupart des cas, comme une coopération entre l'Homme et la machine.

Au sens commun, *coopérer* signifie travailler ensemble pour la réalisation d'un projet ou d'une tâche. Le bénéfice tiré de la coopération est double. En effet, si la réalisation d'une tâche qu'un agent peut effectuer tout seul est plus facile grâce au groupe, alors le but de la coopération est la *facilitation* de la réalisation de la tâche. Mais si le travail du groupe permet de réaliser une tâche qu'un agent ne peut pas réaliser seul de manière satisfaisante, alors le but de la coopération est l'*augmentation* des capacités individuelles pour satisfaire le but de la tâche. Facilitation et augmentation se trouvent dans les deux conditions identifiées par FERBER [FERBER, 95] dans sa définition de la coopération. Dans le cadre de cette coopération Homme-machine, une tâche n'est plus attribuée à une seule entité mais peut être partagée entre l'Homme et la machine, appelé aussi agents. SCHMIDT [SCHMIDT, 91] propose trois formes de coopération : la forme *augmentative*, la forme *intégrative* et la forme *confrontative* (Cf. Figure 7). Ces trois formes sont aussi liées aux notions de facilitation et d'augmentation.

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

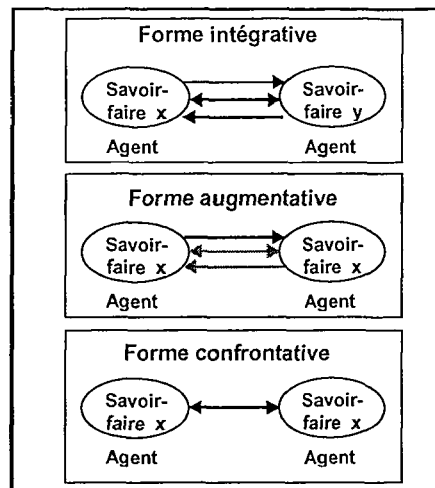


Figure 7 : Formes de coopération et savoir-faire [LEMOINE, 98]

La décomposition de la tâche prescrite peut la faciliter et, par conséquent, peut augmenter la fiabilité de l'opérateur humain qui est chargé de l'exécuter.

La coopération entre les agents a pour but l'amélioration de leurs performances pour optimiser l'échange d'information, l'aide à la décision, le partage des tâches, la prévention des erreurs humaines ou leurs récupération. Les outils d'aide à la décision peuvent illustrer l'intérêt de la coopération dans la sûreté de fonctionnement des systèmes Homme-machine. En effet, un outil d'aide à la décision peut prendre en compte les besoins de l'Homme et lui apporter de l'aide. Il peut ainsi présenter une aide préventive ou régulatrice des erreurs humaines [JOUGLET, 00] :

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

Les défenses conçues pour les systèmes Homme-machine, qu'elles soient basées sur le principe de la redondance ou de la coopération, sont des défenses qui améliorent la sûreté de fonctionnement. D'une part, elles augmentent la fiabilité et la disponibilité du système et, d'autre part, elles préviennent et corrigent les erreurs humaines.

Le contrôle de l'occurrence et des conséquences des erreurs humaines peut également être assuré par les défenses basées sur les barrières.

3. Les défenses basées sur la mise en place de barrières

3.1 Définition des barrières

Selon HOLLNAGEL [HOLLNAGEL, 99], une barrière est définie comme un obstacle, une obstruction ou une gêne qui peut soit (1) prévenir l'exécution d'une action ou l'apparition d'un événement redouté, soit (2) prévenir ou diminuer l'impact des conséquences. Ces

barrières peuvent être matérielles, fonctionnelles, symboliques ou immatérielles [HOLLNAGEL, 99].

- a. *Les barrières matérielles* : ce sont des barrières physiques qui luttent contre les actions risquées des opérateurs humains. Elles n'ont pas besoin d'être perçues ou interprétées par l'opérateur humain pour qu'elles accomplissent leur fonction. Par exemple, les grilles métalliques qui limitent l'accès à des zones de hautes tensions.
- b. *Les barrières fonctionnelles* : ce sont des barrières qui gênent l'exécution de l'action en établissant, par exemple, une dépendance logique ou temporelle pour les activer. Ces barrières nécessitent la présence de préconditions qui doivent être vérifiées avant d'obtenir un résultat, mais qui n'ont pas besoin d'être perçues par l'opérateur. Par exemple, le système de commande automatique de conduite dans le domaine ferroviaire.
- c. *Les barrières symboliques* : ce sont des barrières qui nécessitent une interprétation pour qu'un opérateur humain puisse réagir ou répondre aux messages qu'elles contiennent. Par exemple, les panneaux et les affiches représentant un casque sur les chantiers.
- d. *Les barrières immatérielles* : ce sont des barrières qui ne sont pas nécessairement présentes ou représentées dans la situation de travail, mais demandent d'être connues par l'opérateur pour être activées. Par exemple, les procédures opérationnelles.

L'analyse de risque peut aboutir à la conception d'un nombre de barrières. Il s'ensuit donc que ces barrières peuvent être mises en place par le concepteur, l'exploitant ou les utilisateurs du système Homme-machine [VANDERHAEGEN, 03b].

3.2 Conception des barrières

Les barrières sont liées à la sécurité du système Homme-machine depuis sa conception jusqu'à son utilisation. Elles sont mises en place par différents acteurs pouvant réaliser des analyses de risque. Cette analyse peut être soit une analyse a priori lorsqu'elle est établie par les concepteurs ou l'exploitant du système Homme-machine, soit une analyse a posteriori lorsqu'elle est établie par les utilisateurs du système Homme-machine.

Les barrières définies par le concepteur : suite aux études de risque mais également en respectant des normes et des règles de sécurité, le concepteur équipe l'outil de production de barrières afin d'établir des défenses. C'est ainsi qu'on trouve une multitude de barrières matérielles mises en place volontairement pour des raisons de sécurité. Par exemple, les armoires électriques, les isolations, les grilles de protections qui limitent l'accès à des zones dangereuses de l'outil. Les barrières fonctionnelles sont également prévues dès la conception : les capteurs de présence, les mécanismes d'inter-verrouillage, l'éloignement entre le panneau des commandes et la partie activée de l'outil sont des mesures qui, par leur déclenchement logique et/ou temporel, inhibent ou réduisent l'exposition au danger. Les affichages et les étiquetages placés sur l'outil sont des barrières symboliques, de même que les signalisations visuelles et sonores ou les systèmes automatisés de supervision. Les

barrières immatérielles sont introduites par l'intermédiaire de formation des futurs utilisateurs et au travers des manuels de l'utilisateur.

Les barrières définies par l'employeur : l'outil est ensuite installé chez l'exploitant, dans un environnement de travail existant. Des barrières matérielles telles que les issues de secours ou les moyens individuels de protection sont ajoutées lors de l'aménagement des postes de travail et des ateliers. L'employeur apporte aussi de nouvelles barrières fonctionnelles en limitant l'accès à certaines parties du système Homme-machine par des systèmes de verrouillage ou en dotant le site de détecteurs divers comme les détecteurs d'incendie. Les barrières symboliques sont complétées par la diffusion de consignes d'exploitation et de sécurité, par le marquage au sol de zones dangereuses, etc.... Les barrières immatérielles propres à l'entreprise sont définies lors des formations internes, de la rédaction de procédures, du règlement intérieur, etc...

Les barrières définies par les équipes d'opérateurs humains (collectif de travail) : les conditions de travail amènent l'équipe d'opérateurs humains à créer des barrières de sécurité afin de se prémunir contre des incidents ou des accidents. Ainsi, de nouvelles barrières matérielles peuvent être ajoutées comme la condamnation de certaines zones ou la consignation de certains équipements. Les barrières fonctionnelles s'appliquent lors de la répartition des rôles de chacun des membres de l'équipe. L'équipe apporte ses propres barrières symboliques, notamment au travers d'actes communicatifs : communication vocale, gestuelle, utilisation de signaux sonores, etc.. Par ailleurs, les consignes lors des relèves de postes ainsi que les rapports en fin de poste peuvent constituer des barrières immatérielles attirant l'attention sur des événements critiques que l'équipe a rencontrés.

Les barrières personnalisées des individus : elles se traduisent, par exemple, par l'agencement du poste de travail (barrières matérielles), par la mise en place de limites géographiques personnelles (barrières fonctionnelles), par des affichages sauvages par post-it (barrières symboliques) ou par la production de notes personnelles comprenant des moyens mnémotechniques d'interprétation de consigne de sécurité (barrières immatérielles).

Les barrières sont des défenses qui peuvent donc être conçues par plusieurs intervenants dans le but d'assurer la sécurité du système Homme-machine et de son environnement. Cependant, il ne suffit pas de définir les barrières. Il faut aussi savoir comment elles doivent être mises en place. En effet, la disposition des barrières peut améliorer leur efficacité. A ce titre, deux dispositions peuvent être retenues. Ces dispositions sont les défenses en séries et les défenses en profondeur. Elles sont abordées dans les paragraphes suivants

3.3 Placement des barrières

a. Les défenses en série :

Le placement en série des barrières est une solution pour renforcer les défenses du système Homme-machine contre les événements risqués. Le principe de cette disposition est de dupliquer les barrières afin de lutter contre des événements risqués. Lorsque ces événements sont conjugués, ils peuvent conduire à un accident (Cf. Figure 8).

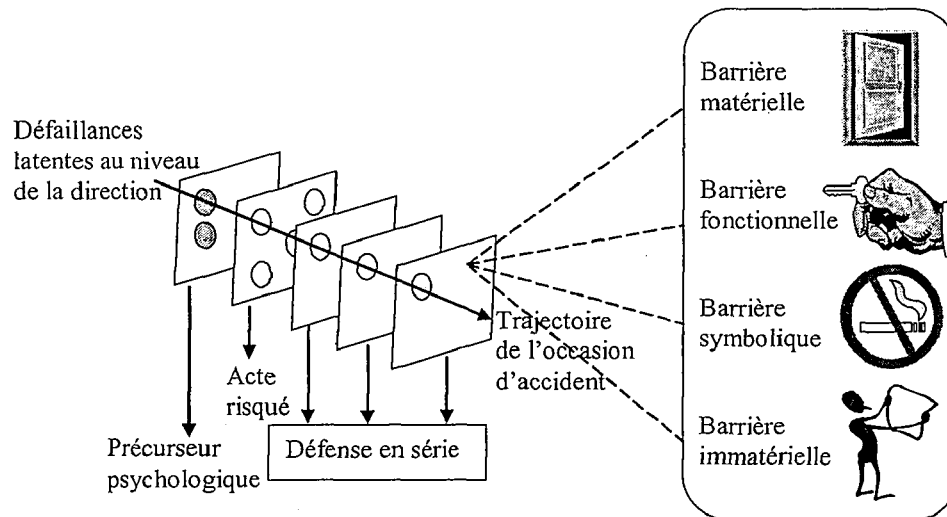


Figure 8 : Défense en série et différents types de barrières [REASON, 90] & [HOLLNAGEL, 99]

La disposition en série des barrières ne peut pas résoudre toutes les situations aboutissant à l'occurrence des événements risqués. En effet, dans certains cas, il s'avère plus efficace d'anticiper ou de contrôler ces événements risqués. Cette démarche est assurée par la disposition en profondeur des barrières.

b. Les défenses en profondeur

La défense en profondeur consiste à envisager toutes les défaillances et à prévoir des niveaux de défense pour les parer, pendant l'exploitation et l'entretien du système Homme-machine. Ces niveaux correspondent à la conception, le contrôle et l'action des événements risqués (Cf. Tableau 3). Le premier niveau ressort de la **prévention** : éviter la défaillance. Le second est du domaine du **contrôle** : anticiper la défaillance ou la détecter immédiatement et la corriger ou l'annuler. Le troisième détermine les moyens d'action pour **limiter les conséquences** de la défaillance comme c'est le cas dans les installations nucléaires par exemple [ZHANG, 00, 01].

Trois niveaux principaux	Activités
Le premier niveau : La prévention	assurée par : -la préparation soigneuse des exploitations des sites et des documents associés - l'évaluation des risques potentiels - le contrôle de la compatibilité entre les actions prévues et la configuration du système - la préparation des surveillances et des essais des équipements - le choix des systèmes pour limiter les conséquences possibles - le choix des types de redondance à appliquer - la désignation de personnel qualifié en nombre suffisant - l'approbation des documents préparés - le processus de requalification
Le deuxième niveau : La surveillance	assurée par : -le contrôle périodique des activités en essai, les inspections visuelles, les patrouilles d'inspection, les points de contrôle -la comparaison entre les résultats obtenus et prévus, la détection des non-conformités -l'échange d'informations dès que quelque chose d'inattendu survient
Le troisième niveau : la limitation des conséquences possibles des incidents ou des non-conformités	assurée par : -la définition à l'avance des modes d'échec prévus -l'utilisation de matériels ou de systèmes automatiques ou manuels, également définis à l'avance

Tableau 3 : Les niveaux de la défense en profondeur dans les systèmes Homme-machine : la cas du nucléaire [ZHANG, 00, 01]

Le concept de défense en profondeur a été développé principalement dans le domaine du nucléaire. Par la suite, il a été élargi et exploité pour tout le cycle de vie du système Homme-machine (conception, développement, fabrication, installation, mise en service, maintenance, retrait, etc...) [VALANCOGNE & al, 02].

L'étude de sûreté de fonctionnement dans les systèmes Homme-machine a pour objectif de minimiser l'occurrence des événements risqués. Dans sa démarche, elle peut s'appuyer sur le principe de la redondance, de la coopération Homme-machine ou la mise en place de barrières. Ces barrières peuvent être dupliquées pour renforcer leur lutte contre les erreurs humaines sous leur forme la plus générale c'est-à-dire les erreurs non intentionnelles. Or, les opérateurs humains peuvent avoir leurs propres analyses de leur activité et décider de ne pas respecter volontairement les barrières. Afin d'établir une étude de sûreté de fonctionnement plus complète des systèmes Homme-machine, il s'avère nécessaire de prendre en compte toutes les formes des erreurs humaines et, par conséquent, les violations intentionnelles des barrières. Cette prise en compte des violations peut se manifester par leur définition et leur analyse. La définition des violations des barrières, appelées franchissements de barrières, ainsi que leurs analyses construites autour du modèle Bénéfices, Coûts et Déficits sont détaillées dans les paragraphes suivants.

4. Les franchissements de barrière

4.1 Définition des violations

Dans une étude du comportement de conduite anormale [REASON, 90], la classification des erreurs a été prolongée pour inclure non seulement les ratés, les lapsus, les fautes mais également les violations. Cette évolution de compréhension de dérives comportementales est également abordée par d'autres auteurs [KIRWAN, 98], [PARKER & al, 95].

La violation se distingue des formes d'erreur classiques (ratés, lapsus et fautes) parce qu'il y a intention de ne pas suivre les règles et que l'action et le comportement associé sont intentionnels.

Les violations peuvent être définies comme toutes les déviations délibérées des prescriptions (c'est-à-dire des règles, des procédures, des instructions ou des règlements) [HUDSON & al, 98].

Un écart délibéré dans l'exécution de procédures connues peut s'appeler une violation quand les conséquences associées sont inacceptables [REASON, 97] mais il peut également être considéré comme le résultat d'une bonne initiative quand elles sont satisfaisantes [BESNARD & al, 02], [POLET & al, 03]. Sans procédures et guides d'emploi clairement définis pour l'exploitation d'un système Homme-machine donné, il ne serait pas possible de détecter les violations. La violation est donc un écart volontaire entre la tâche prescrite et la tâche effective.

On distingue quatre catégories de violation classées par le « *Health and Safety Executive* » [HSE, 95] :

- *les violations routinières* : elles sont celles qui deviennent la norme dans le comportement en opposition à la règle prescrite initiale. Cette modification de la référence à suivre peut être motivée par le fait que les opérateurs humains pensent que la règle initiale n'est plus applicable ou qu'elle est trop restrictive. Ces violations routinières deviennent la pratique acceptée qui est alors transmise aux utilisateurs moins expérimentés et aux débutants.
- *Les violations situationnelles* : elles se produisent quand les facteurs dans l'espace de travail ou l'environnement affectent le processus du travail, rendant impossible ou extrêmement difficile l'application des règles de sécurité. Ces facteurs sont par exemple la conception de l'espace de travail, les conditions de travail, les niveaux de compétence du personnel, l'état de l'équipement, les paramètres temporels. Ainsi, lorsque les demandes de production et de sécurité sont en conflit, c'est souvent la production qui est prioritaire. Dans de telles circonstances les violations peuvent être sanctionnées surtout lorsque les objectifs de sécurité ne sont pas atteints [POLET, 02].
- *Les violations exceptionnelles* : elles se produisent rarement et habituellement en situation de crise exceptionnelle, encourageant les individus à violer des procédures de sécurité afin de résoudre le problème. Ces violations, généralement à haut risque, peuvent entraîner des accidents ou des dommages graves.
- *Les violations optimisantes* : elles sont motivées par un désir d'optimiser une situation de travail, par exemple en cherchant les limites d'un système ou simplement par curiosité.

Lors des violations situationnelles et exceptionnelles, la situation de travail est une situation de crise qui rend l'application des règles de sécurité difficile voire impossible. Ces conditions forcent alors l'opérateur humain à violer les barrières. Dans ce mémoire, nous nous intéressons qu'aux violations délibérées et non forcées. Ainsi, les violations qui seront abordées peuvent être des violations routinières ou optimisantes.

Toutefois, quelles soient routinières, situationnelles, exceptionnelles ou optimisantes, ces violations sont le résultat d'une analyse en ligne du risque établie par l'opérateur humain. Elles peuvent être évaluées à partir de la méthode APRECIH.

Avant d'aborder avec plus de détail cette méthode, nous nous intéressons à la cause principale de l'occurrence des franchissements de barrière : l'analyse en ligne du risque établie par l'opérateur humain.

4.2 Le franchissement de barrière : le résultat d'une analyse en ligne du risque

Bien qu'elles soient conçues pour assurer la sécurité du système et des opérateurs humains, les barrières peuvent présenter des défaillances, être détournées ou non respectées par les opérateurs humains. Le non-respect volontaire de ces barrières constitue un franchissement de barrière (FB).

Dans son analyse a priori du risque, le concepteur d'un système Homme-machine définit un domaine de fonctionnement sécuritaire pour le système et pour l'opérateur humain. Les limites fonctionnelles ou géographiques de ce domaine de fonctionnement sont assurées par les barrières (Cf. Figure 9).

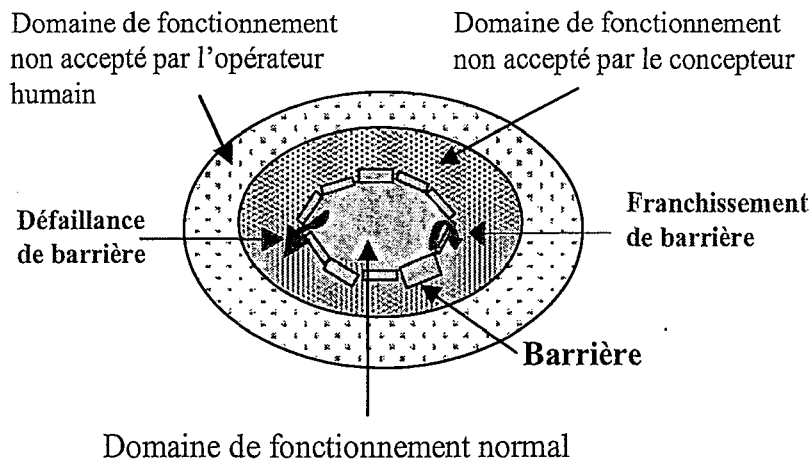


Figure 9 : le franchissement de barrière [POLET, 02]

Mais, dans son évaluation en ligne du risque et pour atteindre des objectifs de production ou de qualité, l'opérateur humain peut franchir ces barrières en migrant ainsi vers un domaine de fonctionnement non accepté par le concepteur (Cf. Figure 10).

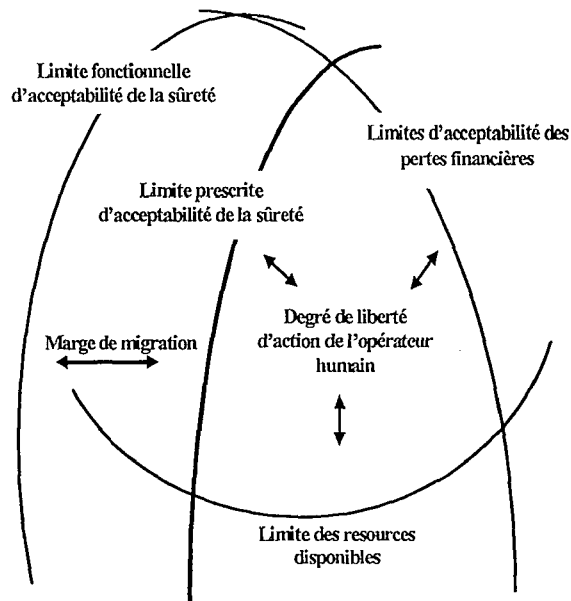


Figure 10 : Migration de l'opérateur humain vers un domaine de fonctionnement risqué adapté par [VANDERHAEGEN, 03]

Afin d'étudier les franchissements de barrière, plusieurs études ont été établies au LAMIH, à partir de la démarche générale APRECIH (Analyse Préliminaire des Conséquences de l'Infiabilité Humaine). Celle-ci permet l'identification et l'analyse des modes d'écart de comportements en évaluant leurs conséquences en terme de Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels (modèle BCD). Elle est présentée dans les paragraphes suivants.

4.3 Démarche générale APRECIH

La méthode non probabiliste APRECIH a été proposée afin de spécifier hors ligne et en ligne une aide à la prévention ou à la récupération d'erreur pendant l'analyse de sécurité du système Homme-machine. Cette méthode étudie les conséquences de l'infiabilité humaine et permet de considérer l'activité humaine en fonction du contexte de la tâche. Elle a été étendue, dans un premier temps, pour effectuer une analyse multicritère du franchissement de barrière relatif à la sécurité. Elle est divisée en quatre étapes principales [VANDERHAEGEN, 01], [VANDERHAEGEN & al, 98] :

- une étape fonctionnelle,
- une étape d'analyse procédurale et contextuelle,
- une étape d'identification des tâches humaines,
- une étape d'analyse des conséquences de l'infiabilité humaine (Cf. Figure 11).

Cette méthode a été appliquée pour la fonction d'aiguillage d'un système ferroviaire et a été utilisée pour analyser une procédure déviée particulière : la violation intentionnelle ou non intentionnelle relative à la sécurité. Elle présente de nombreux avantages et permet de tenir compte de différents contextes, d'une part, et se focalise sur les conséquences de l'infiabilité humaine, d'autre part.

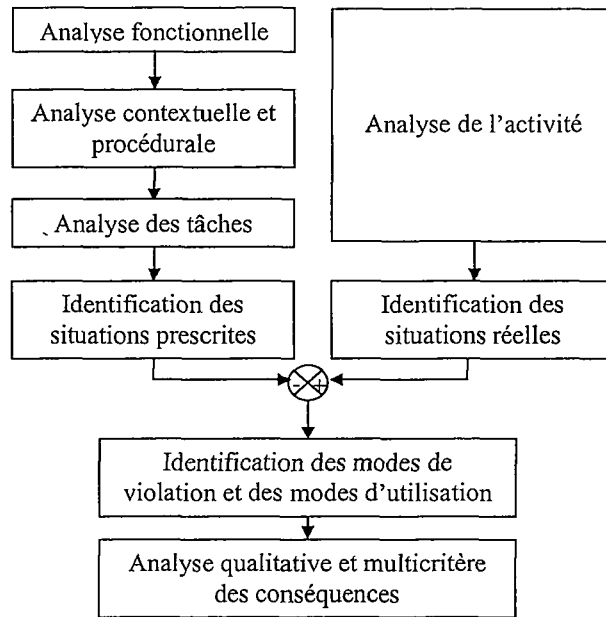


Figure 11 : Démarche d'analyse des franchissements de barrières [VANDERHAEGEN, 01]

La comparaison des deux groupes de situations, c'est-à-dire les situations prescrites et les situations réelles, a permis l'identification de différents modes de dérives comportementales humaines tels que les modes de violations et les modes ajoutés. Ces modes sont expliqués dans le paragraphe ci-dessous.

4.4 Identification des modes d'écart

En prenant l'hypothèse qu'il n'y a pas d'erreur de prescription, les modes d'écart entre le comportement réel des opérateurs humains et celui prescrit par le concepteur sont illustrés dans la Figure 12 [VANDERHAEGEN & al, 00], [POLET, 02].

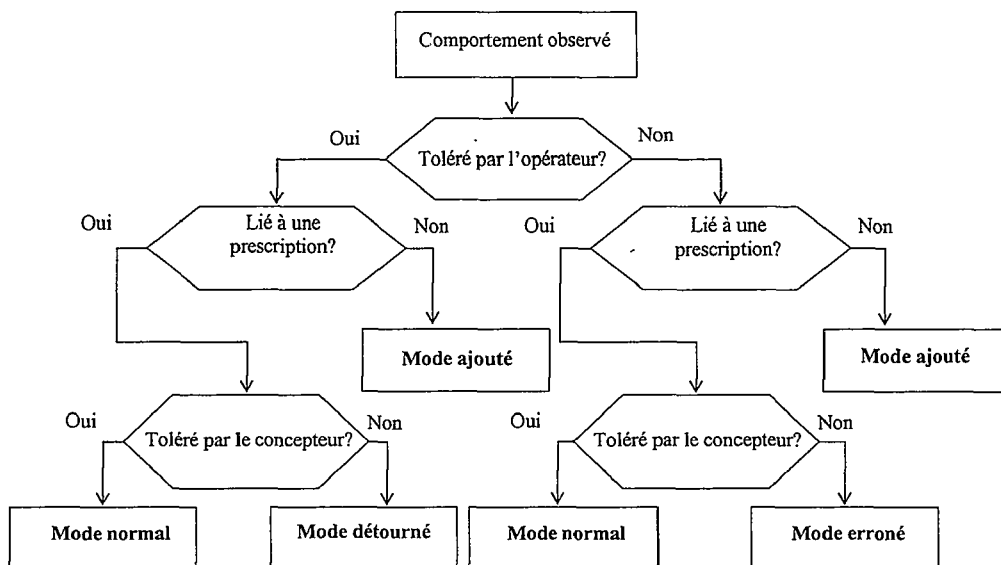


Figure 12 : Identification des modes de fonctionnement [VANDERHAEGEN & al, 00]

Deux modes de fonctionnement sont caractérisés par le concepteur : le mode *normal* qui ne coïncide pas forcément avec la qualité de la mission accomplie mais reste garanti par le concepteur et le mode *nominal* qui est un mode normal dans des conditions optimales de fonctionnement [POLET & al, 00]. Trois modes supplémentaires observables sur le terrain sont identifiables : le mode *incorrect/erroné*, le mode *détourné* et le mode *ajouté*. La Figure 12 permet de déterminer les différents cas selon, par exemple, le point de vue du concepteur et celui de l'utilisateur.

Le mode incorrect/erroné correspond à une prescription mais est inacceptable pour le concepteur et l'opérateur. Le mode ajouté est un mode qui est préalablement analysé par l'utilisateur et non par le concepteur. Il donne lieu à un nouveau comportement dont le but est d'atteindre un objectif supplémentaire [VANDERHAEGEN, 00].

Le mode détourné est un mode de violation pour lequel les prescriptions du concepteur ne sont pas suivies. Les barrières peuvent être supprimées ou déviées de leur fonction principale afin de tirer l'outil vers des performances plus élevées. Certaines de ces barrières définies par le concepteur peuvent ne pas être respectées par les utilisateurs/exploitants : ce comportement est un franchissement de barrière.

Le modèle Bénéfices, Coûts et Déficit potentiels (BCD) explique les franchissements de barrières comme étant le résultat d'un compromis entre les Bénéfices recherchés par l'opérateur humain lorsqu'il franchit une barrière, les Coûts qu'il investit pour atteindre les Bénéfices et les Déficit potentiels auxquels il s'expose en violant la barrière. Nous détaillons ce modèle dans le paragraphe suivant.

4.5 Le modèle BCD

Une comparaison de situations peut s'effectuer à deux niveaux :

- le premier permet de comparer deux situations dépendantes pour un même critère à des instants d'occurrence différents en termes d'amélioration ou de dégradation,
- le second permet de comparer deux situations indépendantes au même instant en termes de Bénéfices ou de Coûts [VANDERHAEGEN & al, 01].

Pour POLET [POLET & al, 00], un franchissement par un opérateur humain d'une barrière prescrite par le concepteur peut être analysé au regard de trois attributs :

- i. les Bénéfices immédiats (B) recherchés par le franchissement de barrière,
- ii. les Coûts immédiats (C) lors du franchissement de barrière qui sont des pertes acceptables par l'opérateur afin d'atteindre les Bénéfices,
- iii. les Déficit potentiels (D) qui sont des pertes qui peuvent être inacceptables par l'opérateur humain et susceptibles d'avoir lieu si le franchissement de barrière n'est pas réussi.

D'une manière générale, les Bénéfices, Coûts et Déficit potentiels sont associés à des critères jugés pertinents et dépendants des tâches de l'opérateur humain.

4.6 Exemple de l'analyse multicritère basée sur les Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels :

Par exemple, l'analyse des observations dans deux imprimeries pendant plusieurs semaines a permis de relever 46 comportements redoutés des opérateurs humains. 70% des ces comportements ont un lien avec les franchissements de barrière tels que le non-respect de procédures (barrières immatérielles), des interventions en marche qui ne sont pas autorisées (barrières immatérielles), des inhibitions de barrières physiques qui permettent à l'opérateur d'accéder à des zones normalement inaccessibles (barrières fonctionnelles) [VANDERHAEGEN & al, 00], [POLET, 02]. Cette analyse basée sur les Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels a permis de déterminer les critères qui motivent les franchissements de barrières (FB) (Cf. Tableau 4).

Bénéfices		Coûts		Déficits potentiels	
Critères	FB	Critères	FB	Critères	FB
Productivité	29	Productivité	2	Productivité	7
Qualité	6	Qualité	2	Qualité	7
Charge de travail	9	Charge de travail	11	Charge de travail	3
Sécurité	0	Sécurité	3	Sécurité	23

Tableau 4 : Analyse multicritère des FB en termes de Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels

Elle a aussi permis de prédire les franchissements de barrière. Cette prédiction est abordée dans le chapitre suivant avec plus de détail.

4.7 Conclusion

Ce premier chapitre a commencé par définir la sûreté de fonctionnement dans les systèmes Homme-machine ainsi que son intérêt pour la maîtrise des risques. Etant donné que ces risques peuvent être engendrés par la composante humaine, ce chapitre s'est intéressé aux erreurs humaines. Ces erreurs sont souvent définies comme étant un écart entre la tâche prescrite et l'activité de l'opérateur humain. Elles peuvent être analysées et évaluées par différentes méthodes. Ces méthodes présentent trois points faibles. En effet :

1. elles nécessitent la connaissance des probabilités associées aux erreurs humaines qui sont difficiles à déterminer et très variables,
2. elles n'assurent pas les mêmes résultats lorsqu'elles sont appliquées à des études différentes,
3. elles sont appliquées exclusivement aux erreurs humaines de façon générale et n'abordent en aucun cas les erreurs intentionnelles des opérateurs humains qui sont les violations.

Un des objectifs de la sûreté de fonctionnement dans les systèmes Homme-machine est la prévention contre les occurrences et/ou les conséquences des erreurs humaines. Les défenses

basées sur le principe de la redondance, les défenses basées sur la coopération Homme-machine et les défenses basées sur la mise en place de barrières sont des moyens pour assurer cette prévention. Les barrières sont des obstacles, obstructions ou gênes qui peuvent soit (1) prévenir l'exécution d'une action ou l'apparition d'un événement redouté, soit (2) prévenir ou diminuer l'impact des conséquences. Elles peuvent être matérielles, fonctionnelles, symboliques, ou immatérielles.

Dans bien des cas, ces barrières peuvent être volontairement franchies par les opérateurs humains. Le franchissement de barrière peut être le résultat d'un compromis entre les Bénéfices recherchés par l'opérateur humain lorsqu'il ne respecte pas la barrière, les Coûts qui accompagnent les Bénéfices et les Déficits potentiels auxquels l'opérateur humain peut s'exposer.

Généralement, les barrières sont conçues dans le but d'assurer la sûreté de fonctionnement des systèmes Homme-machine par l'intermédiaire d'une analyse a priori des risques. Cette analyse peut être différente de celle réalisée par l'opérateur humain lorsqu'il exécute son activité. Cette différence peut donner lieu à l'occurrence des franchissements de barrières.

La prédiction des franchissements de barrière semble être un des moyens efficaces pour intégrer les risques engendrés par les erreurs humaines dans la phase de conception des systèmes Homme-machine. Ainsi, ces violations pourront être prises en compte dans la phase de conception des barrières. Elles pourront donc soit être modifiées, soit renforcées ou supprimées avant la phase de construction et d'utilisation du système Homme-machine.

A partir du modèle BCD, deux méthodes de prédiction des erreurs humaines et, en particulier, des franchissements de barrière ont été établies dans l'équipe Système Homme-Machine du LAMIH. La première méthode se base sur le Raisonnement à Partir de Cas distribué [POLET, CHAALI-DJELASSI & VANDERHAEGEN, 06] et la deuxième méthode se base sur le réseau de neurones [ZHANG, 04]. Ces méthodes sont détaillées dans le chapitre suivant.

Les franchissements de barrières sont caractérisés par leur aspect volontaire. Ils sont donc le résultat d'une décision. Cette prise de décision peut être une décision multicritère. En effet, les Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels sont des évaluations attribuées à un ensemble de critères définis par le cahier des charges de la tâche prescrite ou liés directement à l'opérateur humain tel que la charge de travail. Il s'avère donc nécessaire de s'intéresser dans la suite de ce mémoire à la prise de décision.

Les deux méthodes de prédiction des franchissements de barrière ainsi que l'analyse de la prise de décision seront abordées avec plus de détails dans le chapitre suivant.

Chapitre II : Etude des franchissements de barrière et de la prise de décision

I. Introduction

Afin d'introduire ce deuxième chapitre, nous commençons par rappeler deux idées majeures :

1. l'étude de la sûreté de fonctionnement dans un système Homme-machine doit prendre en compte les erreurs humaines. La meilleure solution pour maîtriser ces erreurs serait de pouvoir les intégrer dans la phase de conception des systèmes Homme-machine afin de mieux concevoir les barrières. Un des moyens de l'intégration de ces erreurs humaines dans la phase de conception est leur prédiction. Comme l'opérateur humain peut agir sur les barrières en les franchissant, il est donc important de prédire les franchissements de barrière.
2. Le franchissement de barrière est une violation intentionnelle commise par l'opérateur humain. Il résulte d'une prise de décision.

Pour étudier l'intégration de l'erreur humaine dans la phase de conception du système Homme-machine, nous nous intéresserons, dans la première partie de ce chapitre, à deux méthodes développées au LAMIH qui ont pour but la prédiction des franchissements de barrière à partir du modèle Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels (modèle BCD). Nous présenterons les démarches de ces méthodes ainsi que leurs cadres d'applications et leurs résultats.

La deuxième partie de ce chapitre traitera de l'analyse de la décision prise par l'opérateur humain. Elle présentera quelques modèles de la prise de décision tels que la théorie du jeu et de l'utilité espérée. L'analyse de la prise de décision associée à un franchissement de barrière nous permettra de présenter une nouvelle méthode de prédiction des erreurs humaines qui sera détaillée dans le chapitre suivant. Mais d'abord, nous présenterons ces deux méthodes de prédiction.

II. Méthodes de prédiction des franchissements de barrière

La prédiction des franchissements de barrière semble être nécessaire, en effet :

1. les franchissements de barrière sont des événements qui continuent à être observés dans les systèmes Homme-machine. Par exemple, en France plus de 20 millions d'infractions au code de la route ont été observées en 2003 [MIF, 06],
2. l'occurrence de ces franchissements de barrière, qui a lieu le plus souvent pendant la phase d'exploitation des systèmes Homme-machine, peut se montrer coûteuse :

- soit pour le concepteur parce qu'il peut être conduit à revoir la conception du système Homme-machine en rajoutant ou modifiant des barrières,
 - soit pour l'exploitant parce qu'il doit apporter des modifications au système pour limiter ou stopper ces franchissements de barrières,
 - soit pour l'opérateur humain parce qu'il s'expose à des risques en violant les barrières,
 - soit pour l'environnement parce que le franchissement de certaines barrières peut engendrer des dégâts importants tels que les accidents nucléaires,
3. la spécification continue du rôle de l'opérateur humain dans le système Homme-machine peut nous permettre de mieux comprendre ses décisions et donc de pouvoir prédire ses actions telles que les violations.

1. Présentation des deux méthodes de prédiction

Dans le cadre de la prédiction des erreurs humaines, deux méthodes récentes ont été développées dans l'équipe Système Homme-Machine du Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH) à Valenciennes (France). Ces deux méthodes se sont basées dans leur démarche sur le modèle Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels.

Nous présentons dans ce qui suit d'abord la méthode de prédiction des franchissements de barrière basée sur le Raisonnement à Partir de Cas distribué puis la méthode basée sur le réseau de neurones.

Ces deux méthodes ont intégré les mêmes attributs du modèle BCD et les mêmes critères d'analyse de l'activité de l'opérateur humain.

Les objectifs principaux des études expérimentales au travers desquelles les deux méthodes de prédiction ont été appliquées sont de mesurer l'influence du franchissement ou du retrait de barrières sur les critères et de pouvoir les prédire.

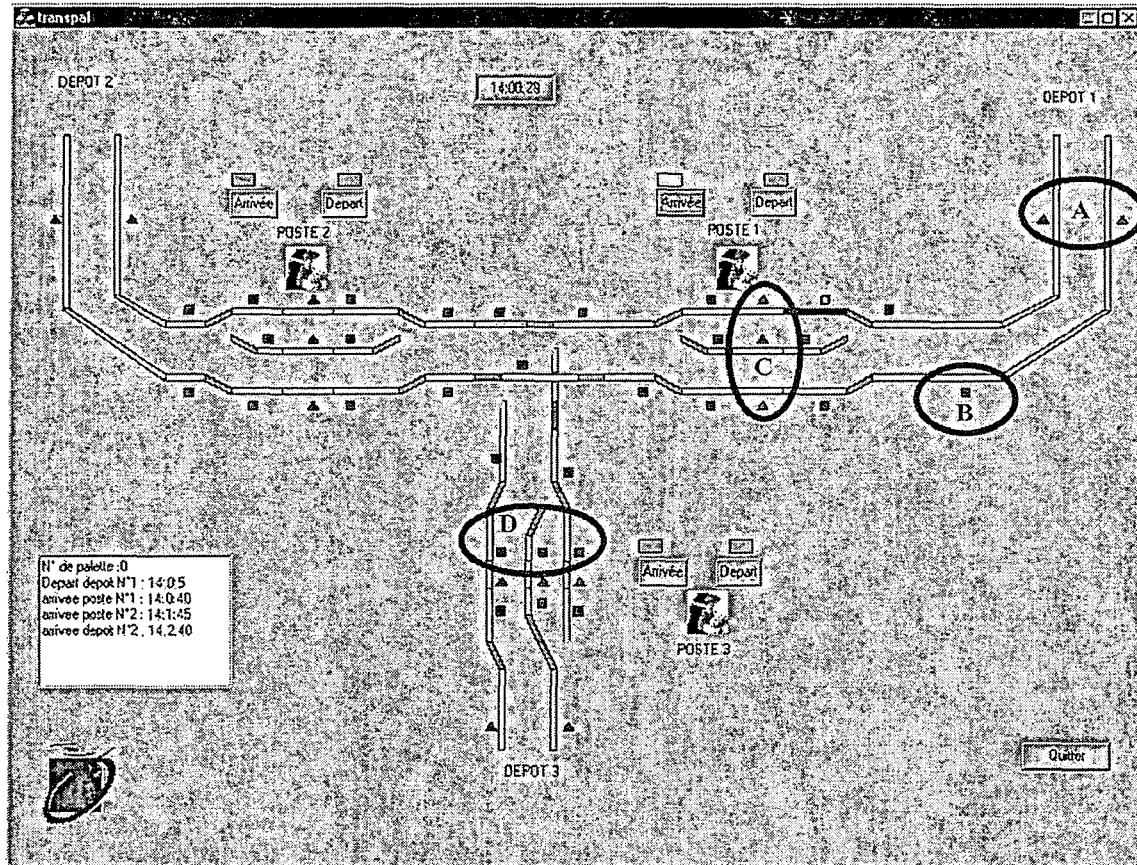
Les critères sont estimés à la fois objectivement par des indicateurs de mesure et subjectivement par les opérateurs humains.

La plate-forme expérimentale développée sur laquelle s'est basée, en partie, l'application des deux méthodes est appelée TRANSPAL (Cf. Figure 13). Elle simule un procédé virtuel de contrôle d'un trafic ferroviaire dans lequel les trains se déplacent entre trois dépôts et peuvent s'arrêter à trois stations. Arrivés à ces stations, les trains doivent s'arrêter pour permettre aux passagers de sortir du train ou de monter à bord.

Le rôle des sujets ayant participé aux expérimentations était de :

- gérer le déplacement des trains en respectant le planning et les horaires annoncés,
- superviser et gérer les aiguillages au moyen de l'interface (famille de barrières 'B'),

- gérer les feux de signalisation situés à l'entrée et sortie des dépôts, avant les aiguillages ou à l'entrée et sortie de chaque station (famille de barrières 'A' et 'C'),
- gérer les messages d'annonce pour avertir les passagers de l'arrivée ou du départ de chaque train (famille de barrières 'D').



A : Feux de dépôts, B : Feux d'aiguillage, C : Feux de quai, D : Feux de zone de station

Figure 13 : Plateforme expérimentale TRANSPAL.

Le protocole expérimental présentait trois phases : une phase d'entraînement, une phase d'expérimentation avec toutes les barrières et une phase avec retrait de barrières (Cf. Figure 14).

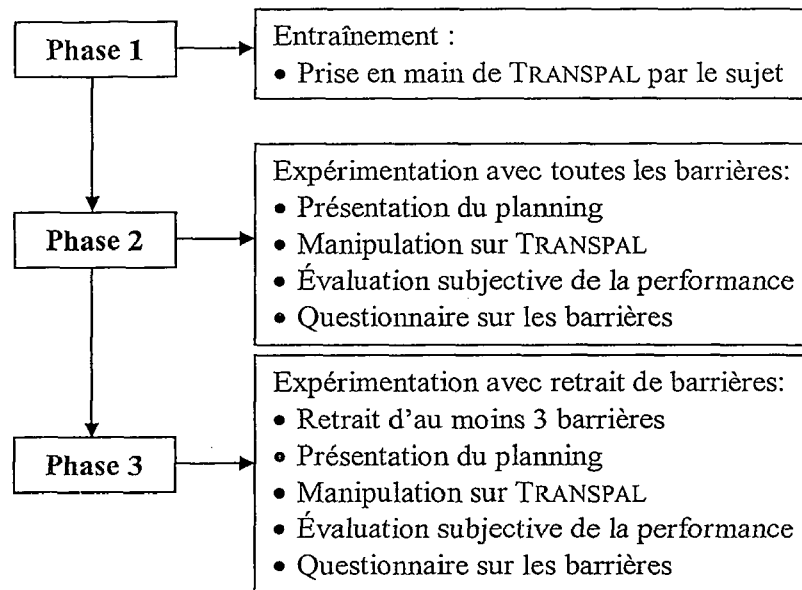


Figure 14 : les trois phases dans la première campagne expérimentale

Son objectif était l'étude de la faisabilité de l'analyse et de la prédiction des franchissements de barrière à travers (1) l'identification des critères qui motivent les franchissements de barrières et (2) l'évaluation des Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels associés à ces critères. Les données retenues pour comparer les deux dernières phases expérimentales sont des données subjectives et objectives. Les données subjectives sont obtenues à partir des questionnaires auxquels les sujets ont répondu. Les données objectives sont calculées par l'outil TRANSPAL qui enregistre les actions de l'opérateur et évalue la situation selon les quatre critères productivité, qualité, sécurité et charge de travail définis ci-après.

2. Définition des critères

Les quatre critères qui ont été associés à la tâche de supervision du trafic ferroviaire simulé sont les suivants :

1. Le critère de **sécurité**. Deux catégories d'incidents sont redoutées : ceux liés à l'intégrité des trains (c'est-à-dire collisions et déraillements) et ceux menaçant la sécurité des voyageurs. Quand le train atteint une voie précédant une station, l'opérateur humain doit annoncer son arrivée aux voyageurs présents dans la station en question. Quand le train va quitter la station, l'opérateur humain doit également en faire l'annonce.
2. Le critère de **productivité**. L'opérateur humain doit suivre l'itinéraire défini pour chaque train et respecter l'ordre des stations que les trains doivent desservir.
3. Le critère de **qualité**. Ce critère correspond au respect des horaires. Un planning est donné pour chaque train. Sur ce planning sont indiqués : le numéro de dépôt et l'heure de départ, les horaires de passage aux stations ainsi que l'heure et le dépôt d'arrivée.

4. Le critère de **charge de travail**. Il est évalué à partir du nombre d'interactions de l'opérateur humain avec l'interface et est mesuré par un compteur. En effet, toute intervention humaine se manifeste par des actions sur l'interface (clicks souris).

3. Prédiction des franchissements de barrière par Raisonnement à Partir de Cas distribué

L'hypothèse de départ de cette méthode est qu'il est possible d'expliquer le comportement erroné de l'opérateur humain, en occurrence le franchissement de barrière, par une analyse multicritère des attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels. Cette explication permet ensuite de prédire le nombre de barrières susceptibles d'être franchies.

Cette méthode [POLET, 02] se base sur le modèle BCD et a pour but d'analyser, d'une part, l'influence du franchissement ou retrait de barrières sur la performance et la sécurité du système Homme-machine et, d'autre part, d'identifier les critères de décision de l'opérateur pris en compte pour franchir ou retirer des barrières. Cette identification des critères peut être utilisée dans la prédiction des franchissements de barrières par famille (A, B, C et D) par Raisonnement à Partir de Cas distribué. Ce raisonnement est abordé dans le paragraphe suivant.

3.1 Le Raisonnement à Partir de Cas

Le Raisonnement à Partir de Cas (RàPC) [BICHINDARITZ, 1994] est un raisonnement qui s'appuie sur une base de donnée déjà enregistrée dans la zone de mémoire pour résoudre de nouveaux problèmes.

Il consiste à chercher un cas similaire au problème traité. Ce cas similaire est un cas parmi ceux déjà enregistrés. La solution associée au problème traité est la solution employée pour le cas le plus proche du cas traité (Cf. Figure 15). Bien évidemment, le cas similaire n'est pas toujours identique au problème traité. La recherche du cas le plus proche est donc régie par la valeur d'une fonction de similarité entre le cas traité et les cas enregistrés. Le cas le plus proche est alors adapté.

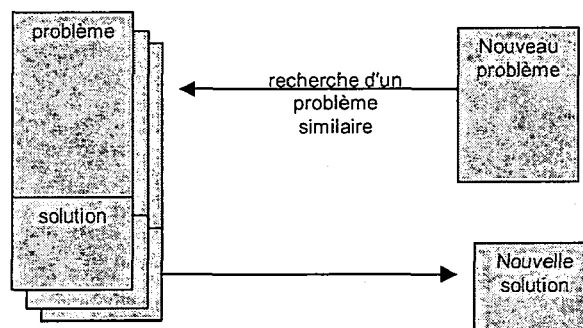


Figure 15 : Principe du raisonnement à partir de cas

3.2 Le Raisonnement à Partir de Cas distribué

Le Raisonnement à Partir de Cas trouve tout son intérêt quand on désire résoudre des problèmes issus d'un domaine pour lequel les connaissances sont incomplètes et/ou non formalisées. Il ne peut s'appliquer que pour des problèmes pour lesquels des solutions à des problèmes similaires sont connues. Le Raisonnement à Partir de Cas constitue, par conséquent, un outil de capitalisation et d'apprentissage des connaissances. Néanmoins, différents facteurs vont influencer la pertinence des résultats obtenus tels que [POLET & al, 06] :

- le choix des descripteurs qui consiste à recenser l'ensemble des descripteurs pertinents (Information) du problème traité et à éliminer l'ensemble des descripteurs non pertinents (Bruit),
- le choix des fonctions évaluant la similarité entre les descripteurs et les cas,
- le nombre de cas.

L'approche distribuée a été apportée au Raisonnement à Partir de Cas afin de repousser certaines de ses limites, notamment quand le nombre de cas est faible. Elle a pour objectif de diminuer l'impact des facteurs Information/Bruit ainsi que la taille de la base de cas.

Son principe consiste à décomposer un problème – par conséquent, un cas – en sous-problèmes. La solution globale du problème se construit à partir des solutions partielles. Le problème est alors distribué et les sous-problèmes sont attribués à différents agents. Le système multi-agents doit alors s'organiser afin de construire collectivement une solution. Il est à noter que cette approche a déjà été exploitée dans de nombreuses applications de grande taille [MANDIAU & al, 02], notamment dans le cadre des transports urbains [LAÏCHOUR, 02].

La décomposition des problèmes (cas) offre la possibilité de ne prendre en compte que les descripteurs pertinents par la résolution du sous-problème. Elle est déterminée par l'utilisateur du Raisonnement à Partir de Cas.

La solution globale du problème pourra provenir de solutions partielles provenant de cas différents. Cet aspect est très appréciable quand la base contient peu de cas. En effet, si la base contient n cas décomposés en m sous-cas, il y a théoriquement n^m solutions envisageables.

L'architecture d'un RàPC distribué comporte deux types d'agents (Cf. Figure 16) : un agent maître décomposant les problèmes soumis et un ensemble d'agents (agents RàPC) de résolution de chaque sous-problème. Il y a autant d'agent RàPC que de sous-cas pour un cas.

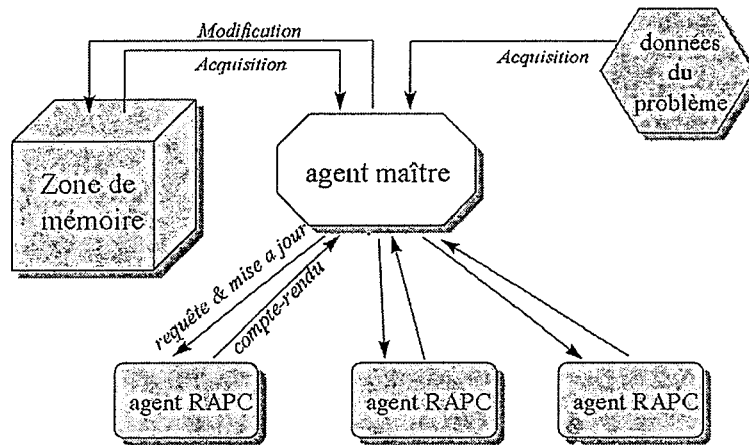


Figure 16 : Architecture distribuée de résolution

L'agent maître connaît les agents participants à la résolution. Il peut, par conséquent, contrôler une zone de mémoire qui retrace l'état courant de la résolution. Il peut, suite à une résolution partielle, mettre à jour les données de la zone de mémoire et celle des agents. Ainsi, de nouvelles résolutions de sous-problèmes sont ajoutées. Certains agents pourront donc à ce moment commencer l'extension de ces solutions [POLET & al, 06].

3.3 Résultats de la prédiction

L'expérimentation s'est déroulée dans le cadre d'un projet VAN GOHG. Les 20 sujets ayant participé à cette expérimentation étaient des universitaires français et hollandais. Les franchissements observés des familles de barrières par les sujets sont résumés dans la figure suivante (Cf. Figure 17).

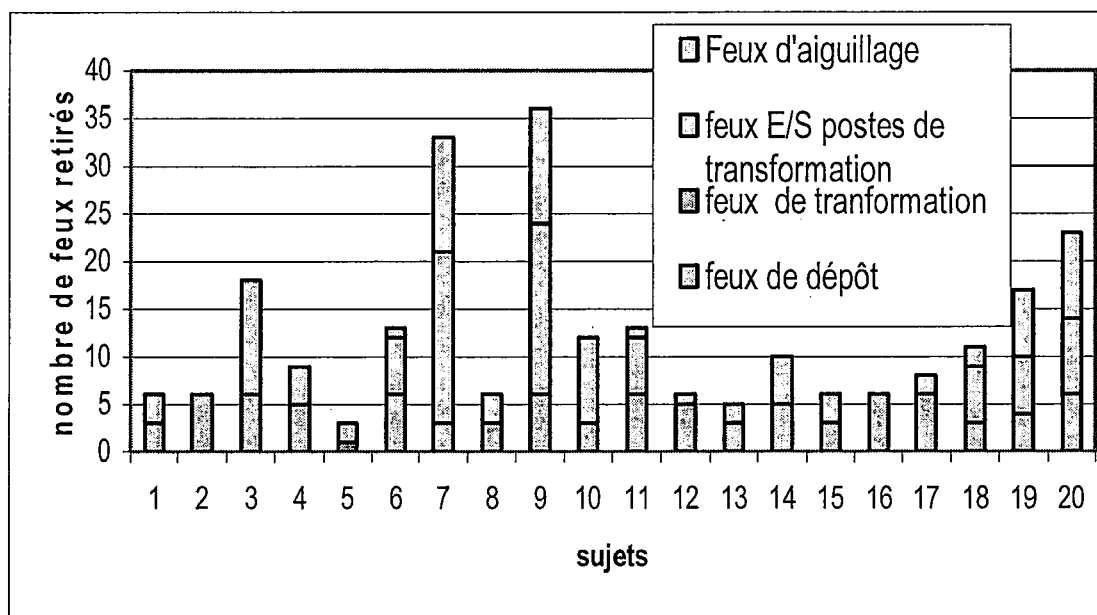


Figure 17 : Répartition des franchissements de barrières

Les réponses aux questionnaires de 15 sujets ont constitué la base de cas initiale du Raisonnement à Partir de Cas distribué. Un cas peut être représenté par un vecteur dont les éléments sont, d'une part, les réponses au questionnaire sur les 4 familles de barrières et, d'autre part, le nombre de barrières franchies pour chaque famille. Les réponses aux questionnaires sont les évaluations des Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels associés aux quatre critères sécurité, productivité, qualité et charge de travail.

L'outil a été utilisé pour prédire les comportements des cinq autres sujets. Les résultats de la prédiction des franchissements de barrières par Raisonnement à Partir de Cas distribué des cinq sujets sont présentés dans le tableau suivant (Cf. Tableau 5).

Opérateur 16		Famille de barrière C	Famille de barrière D	Famille de barrière B	Famille de barrière A
	Observation	6	0	0	0
	Prédiction	0	0	0	1
	Cas référence	5	3	5	12
Opérateur 17		Famille de barrière C	Famille de barrière D	Famille de barrière B	Famille de barrière A
	Observation	6	0	0	2
	Prédiction	6	0	0	2
	Cas référence	6	13	13	13
Opérateur 18		Famille de barrière C	Famille de barrière D	Famille de barrière B	Famille de barrière A
	Observation	3	0	6	2
	Prédiction	3	0	6	2
	Cas référence	13	13	6	13
Opérateur 19		Famille de barrière C	Famille de barrière D	Famille de barrière B	Famille de barrière A
	Observation	4	0	6	7
	Prédiction	3	0	6	1
	Cas référence	13	13	6	6
Opérateur 20		Famille de barrière C	Famille de barrière D	Famille de barrière B	Famille de barrière A
	Observation	6	0	8	9
	Prédiction	3	0	18	9
	Cas référence	15	13	7	10
	Max	6	9	18	12

Tableau 5 : Prédiction des franchissements de barrières par Raisonnement à Partir de Cas distribué appliquée à cinq sujets [POLET, CHAALI-DJELASSI & VANDERHAEGEN, 06]

La prédiction des franchissements de barrières par Raisonnement à Partir de Cas distribué a permis d'obtenir 70 % de réponses exactes et 20% de réponses approximatives dans le sens où elles donnent une indication sur l'occurrence du franchissement de barrière.

La méthode de prédiction des franchissements de barrière basée sur le Raisonnement à Partir de Cas distribué semble présenter des résultats encourageants. Le modèle BCD semble être une explication appropriée aux franchissements de barrière. Ce modèle a été appliqué à une deuxième méthode de prédiction des franchissements de barrière basée sur le réseau de neurones. Cette méthode, sa démarche, son cadre d'application ainsi que ses résultats sont détaillés dans les paragraphes suivants.

4. Prédiction des franchissements de barrière par réseau de neurone

Cette méthode se base sur le modèle BCD et ses attributs [ZHANG, 04]. Elle a pour but la prédiction des franchissements de familles de barrières (A, B, C et D). Les évaluations subjectives des critères (en termes de Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels) constituent les données d'entrée du réseau de neurones.

4.1 Le réseau de neurones

Cette approche vise la prédiction du comportement humain face à des familles barrières [ZHANG, 04], [VANDERHAEGEN & al. 02]. Elle s'inspire des travaux de KOHONEN [KOHONEN 01] basés sur les cartes auto-organisatrices (Self-Organizing Map, SOM). Ce type de réseau de neurones permet de représenter graphiquement le résultat d'une classification des éléments étudiés.

Un neurone (Cf. Figure 18) est un module de base qui à partir de p entrées (x_i) pondérées par des poids (w_i) génère une sortie (y). Les neurones sont interconnectés pour former un réseau.

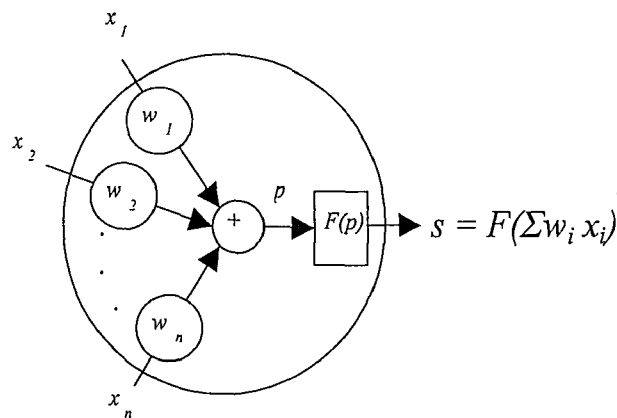


Figure 18 : Structure d'un neurone.

Le réseau retenu possède deux couches de neurones. La couche d'entrées est constituée d'autant de neurones que de paramètres décrivant une barrière. Chaque neurone de la couche d'entrée est connecté aux neurones de la carte.

Un réseau de neurones permet de copier partiellement le traitement de l'information effectué par des opérateurs humains. Il est composé d'une série de neurones interconnectés. Son objectif est de déterminer si le comportement de l'opérateur humain correspondra à un franchissement ou non de barrière.

Un neurone intègre en général une sommation p des entrées x_i pondérées par des poids w_i et une transformation de cette pondération par une fonction $F(p)$. Les entrées x_i d'un neurone peuvent être externes à un réseau de neurones ou être les sorties d'un de ces derniers.

Différentes connexions peuvent alors être déterminées à partir des flux de transfert de l'information dans un réseau donné. Par exemple, dans une connexion récurrente, le calcul de la sortie d'un neurone est un processus en boucle fermée alors que dans une connexion directe, il est en boucle ouverte.

4.2 Prédiction des franchissements de barrière

Cette méthode de prédiction des franchissements de barrière s'est fondée sur les travaux de KOHONEN basés sur les cartes auto-organisatrices. Ils ont été appliqués pour valider la démarche générale de la prédiction.

Une carte auto-organisatrice est le résultat d'un réseau récurrent de k neurones à n entrées et k sorties. Elle permet d'établir une cartographie des distributions de données en propageant par calcul de similarité la sortie d'un neurone sur les neurones voisins.

Les valeurs initiales des poids w_i sont fixées arbitrairement mais sont remises à jour successivement afin de déterminer le modèle reproduisant le plus fidèlement possible le comportement des données d'entrée.

La prédiction des franchissements de barrières par réseau de neurones présente deux phases : une phase d'apprentissage et une phase de prédiction. Au cours de la phase d'apprentissage le réseau de neurones intègre les vecteurs d'entrée et les classe. Les éléments des vecteurs d'entrées sont :

- d'une part, les évaluations des Bénéfices, des Coûts et des Déficits potentiels associés par l'opérateur humain aux quatre critères sécurité, productivité, qualité et charge de travail,
- d'autre part, le comportement observé de l'opérateur humain c'est-à-dire franchissement ou non de la barrière.

La classification de la totalité de ces vecteurs constitue la carte organisée.

Pour la prédiction, seules les évaluations des Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels constituent un vecteur d'entrée. Le réseau de neurones recherche sur la carte la zone dans laquelle il faut placer ce vecteur. A cette zone, lors de la phase d'apprentissage est associé un comportement (franchissement ou non de barrière). C'est ce comportement qui est le résultat de la prédiction (Cf. Figure 19).

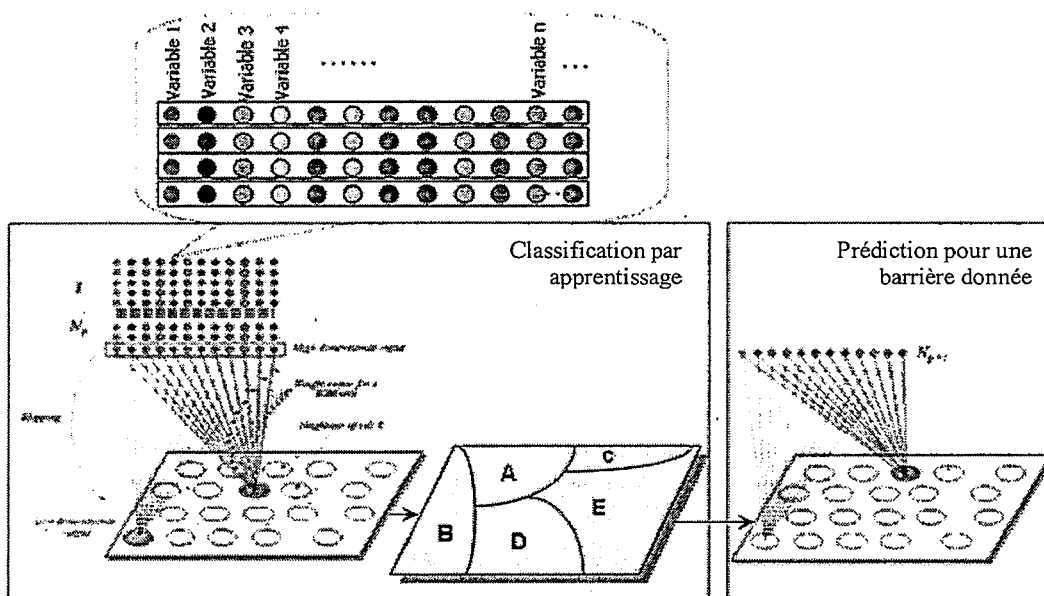


Figure 19 : Illustration graphique de la méthode de prédiction basée sur le réseau de neurones

4.3 Résultats de la prédiction

Le protocole expérimental a été réalisé avec vingt experts ferroviaires européens dans le cadre du projet européen Urban Guided Transport Management System (UGTMS).

Tout comme pour la première méthode de prédiction des franchissements de barrière, cette méthode a été appliquée au contrôle d'un trafic ferroviaire par l'intermédiaire de la plateforme TRANSPAL. Elle a présenté des résultats encourageant du point de vue de la prédiction des franchissements de familles de barrières. Ce taux dépasse, dans sa phase de stabilisation, les 80% de réussite (Cf. Figure 20).

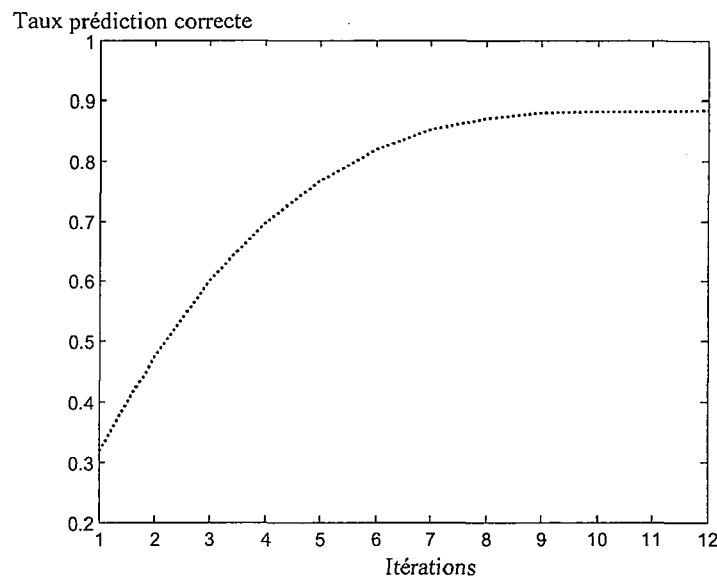


Figure 20 : Taux de prédiction correcte des franchissements de feux d'entrée de dépôts

Avec :

Une itération n° k consiste à utiliser les données de k sujets parmi les vingt sujets pour prédire le comportement des (20-k) autres sujets. En effet, les entrées du réseau de neurones sont les évaluations des Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels associés par les 20 sujets aux critères ainsi que les comportements observés des k sujets (franchissement ou respect de barrière). Les comportements des (20-k) autres sujets constituent la sortie du réseau de neurone. Ce sont les comportements prédits.

4.4 Discussion

Les deux méthodes proposées présentent des résultats encourageants et ont exploité le modèle Bénéfices Coûts et Déficits potentiels pour un domaine d'application commun qui est celui de la plateforme TRANSPAL. Cependant la première méthode s'est basée sur le Raisonnement à Partir de Cas distribué et la deuxième s'est basée sur le réseau de neurones. Elles ont surtout permis :

1. d'expliquer et d'analyser les franchissements de barrières en les présentant comme le résultat d'un compromis entre les Bénéfices, les Coûts et les Déficits potentiels,
2. de renforcer l'hypothèse selon laquelle les comportements volontairement erronés des opérateurs humains (franchissements de barrière) peuvent être prédits,
3. de prédire les franchissements de familles de barrières.

Cependant, ces deux méthodes ne prédisent pas des barrières identifiées mais des familles de barrières. Par exemple, elles ne prédisent pas si le feu n° k, parmi les N feux d'aiguillage, sera franchi ou non, mais plutôt si la famille des feux d'aiguillage (donc les N feux rassemblés) sera franchie ou non. Néanmoins, la méthode de prédiction par Raisonnement à Partir de Cas distribué permet de prédire un taux des franchissements de barrière par famille de barrière.

De plus, l'explication des franchissements de barrières peut être améliorée. En effet, il est possible de formaliser la relation qui existe entre les Bénéfices, les Coûts et les Déficits potentiels d'une part et les franchissements de barrières d'autre part.

Enfin, non seulement la prédiction des franchissements de barrières nécessite une phase d'apprentissage pour constituer une base de données, mais aussi la structure de cette base de donnée doit être cohérente avec la structure des données de prédiction pour établir une recherche de similarité.

A ce stade, nous avons abordé le franchissement de barrière comme étant le résultat d'un compromis entre les Bénéfices, les Coûts et les Déficits potentiels. Cependant, nous n'avons pas abordé le processus décisionnel qui aboutit à la violation de la barrière. Afin de mieux comprendre ce processus décisionnel, nous nous intéressons dans ce qui suit de ce chapitre à la prise de décision. Ensuite, nous nous intéresserons à l'utilité espérée et à la théorie du jeu. Puis nous aborderons les facteurs qui peuvent influencer la décision tels que les préférences, le risque et les critères d'évaluation.

III. La prise de décision

1. La prise de décision dans les systèmes Homme-machine

1.1 Définition

La prise de décision peut être définie comme le processus de sélection appropriée d'un choix (ou d'une action) parmi deux ou plusieurs choix (ou actions) possibles. Elle a été originellement développée afin de guider, d'expliquer ou de décrire un comportement de choix économique mais elle a été largement appliquée à d'autres types de problèmes tels que les décisions liées aux prescriptions ou interventions médicales [HOWARD, MATHESON, 83].

La décision dans les systèmes Homme-machine peut être prise soit [SHERIDAN & FERRELL, 81] :

- par l'opérateur humain seul, c'est-à-dire sans aucune aide. Dans ce cas, la prise de décision dépend fortement des connaissances de cet opérateur humain. Par exemple, les décisions rattachées au choix de l'itinéraire prises par un conducteur automobile

dépendent des connaissances qu'a ce conducteur du trajet à réaliser : trajet le plus court, le plus rapide, le moins coûteux, etc....,

- par un opérateur humain assisté par des aides technologiques. C'est le cas, par exemple, des décisions rattachées aux choix de l'itinéraire prises par un conducteur assisté d'un GPS,
- automatiquement. Dans ce cas, elle peut être fournie par des calculateurs ou par systèmes intelligents. C'est le cas, par exemple, des systèmes de freinage assisté (ABS).

La prise de décision dans les systèmes Homme-machine est fortement liée à son degré d'automatisation. Quelle soit prise (1) par un opérateur humain seul, (2) par un opérateur humain assisté par un système d'aide à la décision ou (3) automatiquement, une décision est considérée comme la sélection d'une action parmi plusieurs actions possibles. Cette action peut avoir des conséquences qui sont susceptibles de modifier l'état du système Homme-machine et/ou de son environnement. Ces actions, ainsi que leurs conséquences, sont abordées avec plus de détails dans les paragraphes suivants.

1.2 Actions et états du monde

Généralement, les opérateurs humains essaient de se référer dans leurs actions aux tâches prescrites. De là, les théories ou les modèles descriptifs ont fréquemment été des adaptations des théories ou des modèles normatifs. Les divergences entre le comportement prédit et le comportement observé ont souvent été attribuées à l'incompréhension, les erreurs, etc...

Les tâches entraînant une seule décision sont souvent caractérisées de la manière suivante [ROY, 85] :

1. la décision en soi est une sélection d'un choix d'une action a_i parmi un ensemble d'actions possibles A ,
2. Il existe, lorsqu'une action a_i est choisie, un jeu de circonstances B_j , souvent appelé *l'état du monde* ou *l'état de la nature*.

L'état du monde B_j et l'action a_i déterminent le résultat ou les conséquences C_{ij} qui affectent le décideur, le système Homme-machine ou l'environnement dans lequel il se trouve. Une telle caractérisation peut être présentée par une matrice (Cf. Figure 21).

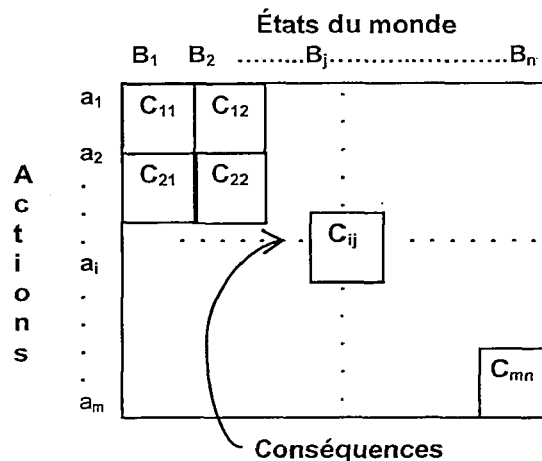


Figure 21 : Une prise de décision caractérisée par ses actions, ses conséquences et ses états du monde [SHERIDAN & FERRELL, 81]

Les décisions sont d'ordinaire liées à l'étendue des connaissances du décideur sur l'état réel du monde (B_j). L'exemple qui suit illustre cette démarche décisionnelle.

Soit un décideur qui doit choisir entre participer à un jeu ou pas. Les actions qui correspondent à la prise de décision, dans cet exemple sont a_1 = 'Jouer' et a_2 = 'Ne pas jouer'.

Le jeu consiste à investir trois euros pour acheter une grille sur laquelle sont notés treize nombres. Le joueur doit cocher un nombre. Si ce nombre est tiré alors, le joueur gagnera cent euros, mais si le nombre n'est pas tiré alors il ne gagnera rien, ce qui se traduit par : à chacune des deux actions a_1 et a_2 correspondent deux états du monde B_1 = 'Grille gagnante' et B_2 = 'Grille perdante'.

Les quatre conséquences qui peuvent affecter le joueur sont les suivantes :

- C_{11} correspond à 'Jouer' et 'Gagner', dans ce cas le joueur gagnera la somme de 100 euros, mais il aura investi trois euros. Donc son gain net est égal à 97 euros (100 - 3) ce qui implique que $C_{11} = 97$ euros.
- C_{12} correspond à 'Jouer' et 'Ne pas Gagner', dans ce cas le joueur ne gagnera rien mais aura investi les trois euros ce qui implique que $C_{12} = -3$ euros.
- C_{21} correspond à 'Ne pas jouer' et 'Gagner', dans ce cas le joueur ne joue pas et par conséquent ne gagnera pas la somme de 100 euros mais aussi n'aura pas investi les trois euros. Par conséquent $C_{21} = 0$ euros.
- C_{22} correspond à 'Ne pas jouer' et 'Ne pas Gagner', dans ce cas le joueur ne joue pas et par conséquent ne perd pas la somme de 100 euros mais aussi n'aura pas investi les trois euros. Par conséquent $C_{22} = 0$ euros.

Ces conséquences peuvent être représentées dans la matrice suivante (Cf. Figure 22).

	$B_1 = \text{'Grille gagnante'}$	$B_2 = \text{'Grille perdante'}$
$a_1 = \text{'Jouer'}$	$C_{11} = 97 \text{ €}$	$C_{12} = -3 \text{ €}$
$a_2 = \text{'Ne pas jouer'}$	$C_{21} = 0 \text{ €}$	$C_{22} = 0 \text{ €}$

Figure 22: Exemple d'Etats du monde et des Conséquences correspondants à la décision de jouer ou non

Nous venons de définir la prise de décision et d'expliquer les conséquences que peut avoir chaque action relative à cette prise de décision dans un état du monde. Or, une prise de décision repose aussi sur les probabilités. En effet, la probabilité que le joueur gagne est égale à 0.077 (1/13) et la probabilité que le joueur perd est égale à 0.923 (12/13). Ces probabilités objectives peuvent ne pas correspondre aux probabilités ressenties par le joueur, celles-ci sont appelées probabilités subjectives [RAUFASTE, HILTON, 99]. Ces probabilités subjectives doivent être prises en compte afin de se rapprocher le plus possible du processus décisionnel de l'opérateur humain. Elles font l'objet du paragraphe suivant.

1.3 La probabilité subjective

L'expression de la probabilité subjective peut comporter une ambiguïté [RAUFASTE, HILTON, 99]. En effet, elle peut désigner une croyance (ensemble des jugements portés par un individu découlant des suppositions auxquelles il se livre librement) ou une estimation qui guide les individus en respectant ou non une logique prédéterminée.

Les êtres humains basent essentiellement leurs raisonnements et décisions sur ce qui est explicitement présent dans leur représentation des problèmes. Conformément à ce principe, RAUFASTE et HILTON ont proposé et testé un modèle permettant de mieux comprendre l'origine des probabilités subjectives, à savoir la **théorie du soutien** [RAUFASTE, HILTON, 99]. Selon celle-ci, une présentation incitant le sujet à imaginer correctement les détails des conséquences d'un risque peut augmenter la probabilité subjective liée à ce risque. Réciproquement, on peut faire baisser la probabilité subjective ressentie par rapport à un risque en ne le décrivant qu'avec des termes abstraits ne facilitant pas sa représentation concrète.

Dans d'autres théories, les probabilités subjectives sont remplacées par : les fonctions de croyance [SHAFFER, 76], les possibilités [DUBOIS & PRADE, 90], les probabilités symboliques ([DARWICHE & GINSBERG, 92] ou encore les probabilités qualitatives ([LEHMANN, 96].

Dans ce mémoire, nous ne retiendrons que l'appellation probabilités subjectives.

L'existence ou l'absence des connaissances sur les conséquences C_{ij} relatives à une action a_i et des probabilités subjectives associées permet de distinguer les décisions à prendre. Ces décisions peuvent être prises soit sans risque, soit sous risque, soit sous incertitude. Ces différents types de prise de décision sont détaillés dans le paragraphe suivant.

2. Différents types de prise de décision

Selon LUCE et RAIFFA [LUCE & RAIFFA, 57], une décision est prise sous la *Certitude*, sous le *Risque* ou sous l'*Incertitude*. En effet,

1. si les conséquences résultant d'une action a_i sont complètement connues, c'est-à-dire lorsque les C_{ij} sont connus, alors, la décision est prise *avec Certitude*. De telles décisions sont souvent appelées '*décision sans risque*'.
2. Si à toute C_{ij} est associée une probabilité d'occurrence $p(C_{ij})$ alors, pour chaque alternative, la probabilité de la conséquence C_{ij} est connue et la décision est prise *sous risque*.
3. S'il n'est pas possible d'associer à chaque conséquence C_{ij} une probabilité d'occurrence (que ce soit parce que les probabilités ne sont pas connues ou parce qu'une description probabiliste n'est pas adaptée) alors, la décision est dite '*prise sous incertitude*' [BLUME, BRANDENBURGER & DEKEL, 91], [DUBOIS & PRADE, 95].

S'il existe un certain nombre de décisions à prendre et si chaque décision est décrite par sa propre matrice et que les a_i , B_j , C_{ij} ou si les $p(C_{ij})$ peuvent être influencées par les choix futurs, alors la tâche est dite *dynamique*. Autrement, elle est dite *statique*.

A ce stade, nous avons abordé la prise de décision et toutes ses caractéristiques à savoir (1) les actions, (2) les états du monde, (3) les conséquences et (4) les probabilités subjectives. Il reste maintenant à savoir comment ces éléments sont intégrés dans un processus décisionnel et comment le décideur est supposé choisir entre plusieurs actions a_i . La réponse peut être illustrée dans la théorie de l'utilité espérée. En effet, cette théorie cherche à traduire le processus mental qui peut être suivi par le décideur. Cette théorie propose un calcul de l'utilité espérée d'une action. Une action est retenue si son utilité espérée est maximale. Comme cette théorie est le plus souvent associée à la théorie des jeux, nous les présenterons toutes les deux dans les paragraphes suivants.

3. La théorie de l'utilité espérée

3.1 Définition de l'utilité espérée

Le modèle de l'utilité espérée est le modèle de décision le plus répandu. En effet, outre le fait qu'il est un des premiers modèles de la prise de décision qui a été proposé, il vérifie de nombreuses propriétés qui l'ont rendu facile à appliquer [FISHBURN, 88], [WAKKER, 89], [DUBOIS, FARGIER & PERNY, 03]

Soit une perspective d'action a_i à laquelle sont associées des conséquences C_{ij} et des probabilités d'occurrence $p(C_{ij})$. La théorie classique de la décision calcule l'utilité espérée de l'action possible a_i , notée $u(a_i)$. Elle est obtenue en sommant les produits des conséquences et de leurs probabilités $p(C_{ij})$. La théorie de l'utilité espérée distingue l'utilité espérée objective calculée objectivement de l'utilité espérée subjective ressentie par le décideur.

La théorie de l'utilité espérée suppose des variations entre gains et pertes relatifs aux utilités espérées subjectives et objectives :

- L'utilité espérée est convexe dans la région des pertes ;
- elle est concave dans la région des gains ;
- elle n'est pas symétrique, car une perte provoque une réaction négative plus forte que celle de la réaction positive provoquée par un gain [SHERIDAN, 85] (Cf. Figure 23).

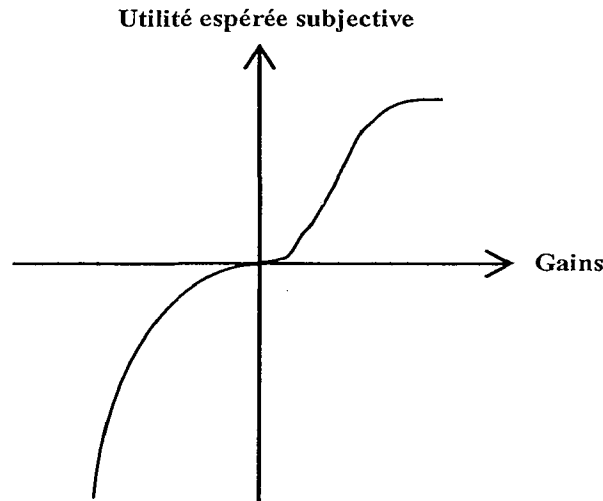


Figure 23 : Propriétés fondamentales de la théorie de l'utilité espérée

Pour mieux comprendre cette forme en S de l'utilité espérée subjective en fonction des gains réels, nous comparons les deux cas suivants :

- Cas 1 : une possibilité de gain chiffrée à 1 000 euros mais qui n'est sûre qu'à 75 %,
- Cas 2 : la certitude d'un gain de 750 euros.

La théorie classique donne une utilité espérée de 750 euros dans les deux cas. Toutefois, la perspective prudente qui sera choisie le plus souvent est le Cas 2.

La théorie qui englobe le mieux la théorie de l'utilité espérée est la théorie du jeu. En effet, cette dernière se base dans sa démarche sur le calcul de l'utilité espérée. Afin de mieux la comprendre, nous lui consacrons le paragraphe suivant.

3.2 La théorie du jeu

La plupart des théories qui se sont intéressées à la prise de décision [FLANAGAN, 01], [HAYWARD & al, 04], [ROBLES-DE-LA-TORRE & HAYWARD, 01], [ROBLES-DE-LA-TORRE, 06] et [VINCENT, 05] s'inspirent généralement de la théorie des jeux. En effet, la théorie des jeux s'applique à l'ensemble des situations de prise de décision. Elle est fondée sur l'utilité espérée et présente un modèle générique qui a longtemps prévalu dans le cadre des études portant sur la décision et relevant des sciences économiques, financières ou sociales. Elle se résume en [LUCE & RAIFFA, 57]:

1. un jeu de définitions et d'axiomes qui, si rencontrés, garantissent l'existence d'une fonction d'utilité espérée,

2. une interprétation de chacun de ces éléments formels en rapport avec les actions réelles et le comportement humain.

Selon l'interprétation, une théorie perspective ou descriptive peut en résulter. En effet, avec une théorie perspective, les conséquences logiques de la théorie prétendent dire comment l'opérateur devrait se comporter pour renforcer ses intérêts propres. Avec une théorie descriptive, les conséquences logiques prétendent être des descriptions du comportement actuel. Dans une théorie perspective nous devons prendre en compte les éléments qui influencent la prise de décision tels que les préférences du décideur.

Avant d'aborder ces deux éléments, nous pouvons retenir qu'une structure simple de l'utilité espérée pour des choix sans risque dans un environnement statique peut être basée sur les suppositions suivantes :

1. *Le jeu de conséquences* : il existe un jeu non vide C de conséquences différentes et bien définies.
2. *Le rapport de préférence*: pour tout x et y dans C , si le décideur préfère x à y alors on note xPy . S'il est indifférent au deux alternatives alors on note xIy [HERRERA-VIEDMA, CHICLANA, HERRERA & ALONSO, 06].
3. *La fonction d'utilité espérée* : il existe une valeur réelle d'une fonction u définie sur C et qui, pour tout x dans C , associe $u(x)$, un nombre réel appelé utilité espérée de x .

$$u : C \rightarrow R$$

$$x \mapsto u(x)$$

4. *Relation entre l'utilité espérée et les préférences* : Si xPy alors $u(x) > u(y)$ et inversement si $u(x) > u(y)$ alors xPy .
Si $u(x) = u(y)$ alors xIy et si xIy alors $u(x) = u(y)$.

4. Les éléments influençant la prise de décision

4.1 Les préférences

La forme la plus simple de la prise de décision consiste à choisir une action a_i parmi un jeu d'actions A , en considérant toutes les conséquences C_{ij} de chaque choix possible et connaissant l'état du monde B_j . L'hypothèse suivante peut alors être retenue : l'opérateur choisit l'action qui présente le maximum des conséquences qu'il préfère. La notion du '*plus préférable*' suggère qu'un nombre, représentant son degré de préférence, peut être attribué à chaque action [PARTHIBAN, GANESH, NARAYANAN & DHANALAKSHMI, 04]. L'action avec le plus grand nombre est par hypothèse l'action choisie. Prendre des décisions sans risque dans de telles circonstances devient alors une question de détermination de l'alternative ayant le degré de préférence le plus haut ou tout simplement une mise en place d'une relation d'ordre des choix préférés.

En effet, les conséquences associées à la prise de décision de choisir une action a_i peuvent être classées dans l'ordre de préférences du décideur.

Les relations de préférence sont facilement interprétées pour une théorie descriptive :

- xPy signifie 'entre x et y choisir x ;
- xIy signifie 'choisir soit x soit y , il n'y a pas de différence'.

Cependant, il existe des problèmes d'interprétation pour une théorie perspective. En effet :

- si la relation de préférence P est définie par le nombre de fois où le choix y est observé, alors combien de fois le choix x doit être observé pour en conclure que xPy ?
- Qu'est-ce qui distingue xIy de xPy si x est préféré à y seulement quelquefois ?
- Est-ce que cette difficulté peut être évitée si l'on considère que xPy réfère à un concept de préférence instantanée ?
- Est-ce que la préférence est évidente comme, par exemple, préférer la réussite à l'échec ?

Ces questions peuvent mettre en évidence la complexité de déterminer les préférences dans le cadre d'une théorie perspective. Il semble évident que les réponses à ces questions dépendent du décideur. La personnalité du décideur peut, en effet, influencer sa décision. Par exemple, le choix d'un itinéraire pour aller d'un point x_1 à un point x_2 peut être :

- « le chemin le plus court même s'il y a possibilité d'un embouteillage » pour un conducteur qui préfère rouler doucement,
- « le chemin le plus rapide même si la distance à parcourir est plus grande » pour un conducteur qui préfère la vitesse.

Le développement **des théories de la personnalité et de la motivation** est une des approches permettant de relier la prise de décision à la personnalité du décideur. ATKINSON [ATKINSON, 57] a réalisé la formulation la plus explicite de l'effet des variables de la personnalité sur les actions risquées. Cette formulation est la conséquence d'une théorie de la motivation qui est plus générale [MCCLELLAND & al, 53] et dans laquelle figurent deux éléments qui jouent des rôles centraux à savoir *le besoin de l'accomplissement* et son concurrent *la crainte de l'échec*.

4.2 La décision sous risque

En plus de la personnalité du décideur, la possibilité de l'occurrence d'un risque peut aussi influencer la prise de décision.

Rappelons qu'une décision est dite sous risque lorsque (1) le jeu des conséquences possibles de chaque alternative choisie est connu et lorsque (2) la probabilité de la conséquence qui va avoir lieu est également connue.

L'action choisie sous certitude est celle qui a la conséquence la plus souhaitée, celle avec la plus grande utilité espérée mais il n'est pas facile de savoir l'action qui sera choisie pour une décision sous risque. En effet, si une personne est pessimiste alors, elle pourrait choisir l'alternative qui minimise les mauvaises conséquences. Par contre, si une personne est optimiste alors, elle pourrait choisir l'alternative qui correspond au gain le plus élevé. L'hypothèse suivante est l'hypothèse retenue généralement : *l'action retenue est celle qui correspond à l'utilité espérée maximale* [Howard & MATHESON, 83].

A ce stade, nous avons commencé par définir la prise de décision, les actions qui lui sont associées et les conséquences qui peuvent en résulter. Ensuite, nous avons abordé les probabilités subjectives et les différents types de prise de décision. Puis nous avons présenté les deux théories majeures qui ont illustré la prise de décision qui sont la théorie de l'utilité espérée et la théorie des jeux. Enfin, nous nous sommes intéressés à deux éléments qui peuvent influencer la prise de décision qui sont les préférences du décideur et le risque sous lequel cette décision peut être prise. Cependant, la prise de décision doit sélectionner le meilleur choix à partir de critères qui lui sont associés. Elle peut alors être une décision multicritère. Afin de mieux comprendre l'objectif de ce type de décision, nous lui consacrons le paragraphe suivant.

5. La décision multicritère

La décision multicritère a été étudiée par plusieurs applications [IGNIZIO, 76], [POMEROL & BARBA-ROMERO, 93], [ROY & BOUYSSOU, 93], [SALMINEN, HOKKANEN & LAHDELMA, 96], [STEUER, 86], [VINCKE, 89]. Elle s'impose de plus en plus de nos jours parce qu'elle permet de traiter des problèmes complexes et de concevoir des systèmes d'aide à la décision. L'objectif de la prise de décision multicritère est de sélectionner le meilleur choix et de retenir les critères correspondants [ROY, 93].

Par exemple : un consommateur doit souvent faire le choix entre plusieurs produits. Sa décision est une décision multicritère. En effet, la sélection d'un produit peut être basée sur plusieurs critères tels que le prix, la qualité, la durée de vie, la consommation d'énergie, la couleur, etc...

La décision du consommateur peut correspondre par exemple, au choix du produit le plus économique et performant.

Différentes méthodes ont été proposées pour traiter la prise de décision multicritère. Elles peuvent être regroupées en deux grandes catégories :

- Les méthodes de transformation d'une décision multicritère en une décision monocritère. Dans ce cas, certains critères sont agrégés en un seul critère et d'autres sont transformés en contraintes. L'avantage de cette approche est surtout la possibilité de bénéficier des résolutions de problèmes déjà existants de la décision monocritère. Par contre, les procédures d'agrégation ou de transformation des critères en contraintes sont délicates à mener [IGNIZIO, 76], [STEUER, 86].
- Les méthodes de sur-classement [BRANS, MARESCHAL & VINCKE 84], [BRANS, MARESCHAL & VINCKE, 86], [POMEROL & BARBA-ROMERO, 93], [ROY & BOUYSSOU, 93], [SALMINEN, HOKKANEN & LAHDELMA, 96], [VINCKE, 89] telles que ELECTRE et PROMETHEE. Ces méthodes ne comparent pas les alternatives mais se basent sur

les préférences des décideurs. Cependant, il n'est pas toujours simple de maîtriser ces préférences.

6. Discussion

Plusieurs théories ont abordé la prise de décision. Elles partagent des points communs qui sont (1) la possibilité de choisir une action parmi plusieurs actions, (2) la prise en compte des conséquences de ces actions et (3) l'association des probabilités à ces conséquences. Elles présentent aussi des centres d'intérêts différents. En effet :

- la théorie de l'utilité espérée se base sur le calcul de l'utilité espérée à partir des conséquences et des probabilités associées aux différents choix possibles,
- la théorie de la personnalité et de la motivation s'intéresse aux motivations personnelles du décideur qui influencent sa décision. Elle se base sur deux éléments principaux qui sont le besoin de l'accomplissement et la crainte de l'échec,
- la théorie du soutien qui est une théorie qui se base sur l'influence des représentations des conséquences sur le choix d'un décideur.

D'une manière générale, ce que l'on peut retenir de cette deuxième partie de chapitre est que la prise de décision :

- est une sélection d'une action a_i parmi un ensemble d'actions possibles A et qu'il existe, lorsqu'une action a_i est choisie, un ensemble de conséquences C_{ij} .
- se base sur la démarche suivante:
 - spécifier les différents choix qui s'offrent au décideur (l'opérateur humain),
 - retenir les conséquences qui découlent des différents choix,
 - retenir les probabilités subjectives associées à ces conséquences,
 - spécifier les préférences ou poids relatifs aux résultats correspondant aux choix,
 - définir les critères sur lesquels repose la prise de décision.

Nous dégageons donc trois éléments essentiels dans la modélisation de la prise de décision qui sont (1) les choix qui se présentent au décideur, (2) les conséquences des choix et (3) les probabilités subjectives associées à ces conséquences. Ces trois éléments nous permettent de construire l'arbre décisionnel suivant (Cf. Figure 24) et d'écrire les équations qui en découlent (Cf. Équation 1 et Équation 2).

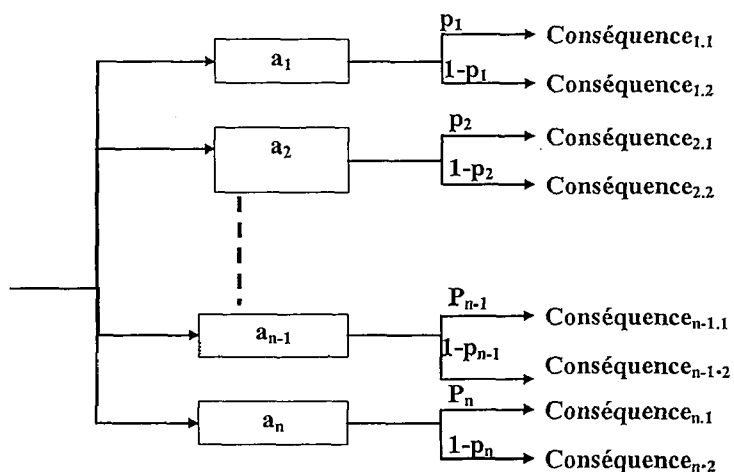


Figure 24 : Arbre décisionnel d'une prise de décision [SONNENBERG, 92]

Avec :

n : le nombre d'actions possibles,

p_i sont respectivement les probabilités subjectives de l'occurrence des conséquences $_{i,1}$ perçues par le décideur.

$(1 - p_i)$ sont respectivement les probabilités subjectives de l'occurrence des conséquences $_{i,2}$ perçues par le décideur.

utilité espérée (a_i) = $p_i \cdot Conséquence_{i,1} + (1 - p_i) \cdot Conséquence_{i,2}$, $\forall i / 1 \leq i \leq n$.

Équation 1

Une décision peut être retenue si elle correspond à l'utilité espérée maximale. Il s'en suit donc que :

utilité espérée (a_{retenu}) = $\text{Max} [\text{utilité espérée } (a_i)]$.

Équation 2

7. Conclusion : le franchissement de barrière, un cas particulier de la prise de décision

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté deux méthodes de prédiction des franchissements de barrières : l'une est basée sur le Raisonnement à Partir de Cas distribué et l'autre sur le réseau de neurones. Ces deux méthodes ont permis de renforcer l'hypothèse selon laquelle les franchissements de barrière peuvent être prédits en tenant compte des Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels associés aux critères retenus. Cependant, ces deux méthodes n'apportent pas une formalisation des franchissements de barrière.

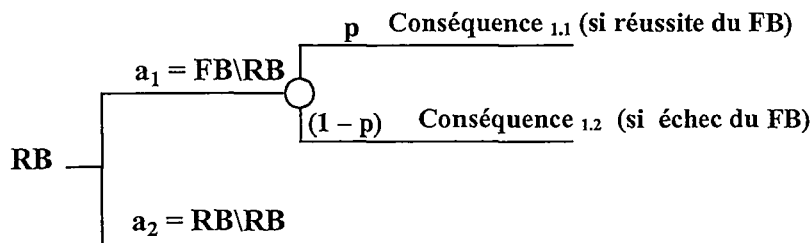
Dans la deuxième partie de ce chapitre et afin de mieux comprendre le processus ou cheminement conduisant au franchissement de barrière, nous avons présenté une analyse de la prise de décision. Cette analyse met en évidence trois éléments essentiels du processus

décisionnel qui sont les choix qui se présentent au décideur, les conséquences des choix et les probabilités subjectives associées à ces conséquences.

Le franchissement de barrière est une violation intentionnelle qui répond à la forme basique de la prise de décision. En effet :

- il est le résultat de la sélection d'un choix d'une action a_i parmi deux actions possibles (respect ou franchissement de barrière),
- il existe, lorsque le franchissement de barrière est choisi, un ensemble de conséquences. On distingue :
 - les Bénéfices et Coûts dans le cas de la réussite du franchissement de barrière ;
 - les Déficits potentiels dans le cas de l'échec du franchissement de barrière.

Cependant, il existe une différence majeure entre une décision dans sa forme générale et une décision associée au franchissement de barrière. En effet, la décision de franchir une barrière est considérée comme un écart à la référence qui est le respect de la barrière. De même, les Bénéfices, les Coûts et les Déficits potentiels associés au franchissement de barrière sont établis par rapport à la référence qui est le respect de la barrière (Cf. Figure 25).



Avec : FB désigne le franchissement de barrière et RB désigne le respect de la barrière.

Figure 25 : Arbre décisionnel associé à un franchissement ou un respect de barrière

Il s'ensuit que :

- utilité espérée (FB\RB) = $(p \cdot \text{Conséquence}_{1,1}) + ((1-p) \cdot \text{Conséquence}_{1,2})$.
- utilité espérée (RB\RB) = 0.
- utilité espérée (a_{retenue}) = $\text{Max} [\text{utilité espérée (FB\RB)}, \text{utilité espérée (RB\RB)}]$.
- p_1 et $(1 - p)$ sont respectivement les probabilités subjectives de l'occurrence des Conséquences_{1,1} et des Conséquences_{1,2} perçues par l'opérateur humain.

En plus de la construction de cet arbre décisionnel, nous pouvons considérer que le franchissement de barrière nécessite d'autres pré-requis tels que :

1. les critères : un critère est un élément de base de la tâche de l'opérateur humain. La situation dans laquelle se trouve l'opérateur humain peut être évaluée selon plusieurs critères,
2. les poids (α , β et γ) attribués par l'opérateur humain respectivement aux Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels,
3. la prise en compte des erreurs ε_α , ε_β et ε_γ sur les poids α , β et γ associés aux Bénéfices, Coûts ou Déficits potentiels afin de les améliorer ou les corriger.

L'utilité espérée qui en résulte est donc une fonction de quatre éléments qui sont les critères, les attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels, les poids α , β et γ et les erreurs ε_α , ε_β et ε_γ sur les poids.

L'étude du processus décisionnel associé au franchissement de barrière peut conduire à leur modélisation. Cette modélisation peut nous permettre d'élaborer une nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière qui se baserait sur l'utilité espérée des franchissements de barrière. Nous détaillerons dans le troisième chapitre cette nouvelle méthode de prédiction.

Chapitre III : Prédiction des franchissements de barrières basée sur l'utilité espérée et le renforcement de l'apprentissage

1. Introduction

Continuellement, les opérateurs humains sont amenés à prendre des décisions afin de réaliser les tâches qui leur sont prescrites. Parfois, ces décisions sont faciles à prendre lorsque le diagnostic de la situation est évident et que les risques encourus sont nuls. Néanmoins, dans bien d'autres cas, la décision à prendre peut être difficile ou nécessiter une étude plus approfondie pour déterminer les gains à atteindre et les pertes possibles. Dans ce cas, le diagnostic de la situation est complexe et les risques encourus peuvent être importants. Dans un tel contexte, l'analyse de la décision à prendre peut offrir un éclairage complémentaire sur la décision de l'opérateur humain et donc de l'action qui en découle.

Dans le cadre de la sûreté de fonctionnement des systèmes Homme-Machine, la prise de décision liée au franchissement de barrière peut être considérée comme le résultat d'un compromis entre (1) les Bénéfices recherchés par l'opérateur humain lorsqu'il franchit la barrière, (2) les Coûts qu'il est prêt à investir pour atteindre les Bénéfices et (3) les Déficits potentiels qui peuvent résulter en cas d'échec de ce franchissement de barrière.

La modélisation de la prise de décision de franchissement de barrière peut nous permettre de comprendre le processus cognitif qui amène l'opérateur humain à adopter ce type de comportement. Cette modélisation de la prise de décision peut aboutir à la prédiction des franchissements de barrières. Une fois intégrée dans la phase de conception des systèmes Homme-Machine, cette prédiction peut améliorer la maîtrise des risques engendrés par la composante humaine à travers une amélioration de la conception ou le placement de barrières dans le système Homme-Machine.

Ce chapitre a pour objet la présentation d'une nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière. Cette méthode se basera sur l'utilité espérée du franchissement de barrière et sur le principe du Renforcement de l'Apprentissage. Nous commencerons par présenter deux modèles linéaires de l'utilité espérée du franchissement de barrière : le premier est un modèle générique et le deuxième est un modèle spécifique. La différence entre le modèle générique et le modèle spécifique réside dans le fait que le modèle générique peut être appliqué à toute prise de décision liée au franchissement de barrière alors que le modèle spécifique intègre plus de détails qui le personnalisent et le rendent applicable à une prise de décision individuelle. Ces éléments de personnalisation sont tels que les poids associés aux Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels et les erreurs qui leurs sont associées.

Ensuite, nous présenterons la nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière basée sur l'utilité espérée du franchissement de barrière et le Renforcement de l'Apprentissage.

II. Modèle générique de la prise de décision d'un franchissement de barrière

1. Démarche de l'analyse de la prise de décision

Rappelons d'abord que la démarche de la prise de décision est basée sur les quatre points suivants :

- spécifier les choix qui s'offrent au décideur,
- décrire l'ensemble des conséquences associées à ces choix,
- associer des probabilités à ces conséquences,
- déduire la décision.

Une décision est retenue si elle correspond à l'utilité espérée maximale.

Cette démarche peut s'appliquer au contexte de franchissement de barrière. Elle peut donc nous permettre de modéliser la prise de décision qui lui est associée.

Les étapes de la démarche d'analyse de la prise de décision sont les suivantes [SONNENBERG, 92] :

- a. délimiter le problème,
- b. structurer le problème (construire un arbre de décision) :
 - définir les choix,
 - recenser les principaux événements et identifier leurs résultats significatifs
- c. affecter des probabilités aux événements aléatoires,
- d. attribuer des conséquences aux résultats,
- e. calculer l'utilité espérée (évaluer l'arbre de décision),
- f. interpréter les résultats et/ou déduire la décision.

Le franchissement de barrière résulte d'une prise de décision. Cette décision consiste à choisir une action parmi deux actions possibles : franchir ou respecter la barrière. Elle nous renvoie à la forme simplifiée de la prise de décision (Cf. Figure 24). Il s'avère donc possible d'appliquer la démarche de construction du modèle de prise de décision pour construire celui lié au franchissement de barrière. Pour ce faire, nous allons suivre la démarche de construction du modèle de décision, détaillée ci-dessus et appliquer chacune de ses étapes au cas particulier du franchissement de barrière.

2. Modèle linéaire générique de la prise de décision d'un franchissement de barrière

2.1 Construire l'arbre décisionnel correspondant au franchissement de barrière :

La construction du modèle générique de la prise de décision nécessite plusieurs étapes. La première étape consiste à délimiter le problème en construisant un arbre de décision. Il faut commencer par tracer un nœud décisionnel représenté dans la Figure 26, par un rectangle

plein. Les branches reflètent les choix spécifiques. Il y a autant de branches issues du nœud décisionnel que d'actions distinctes, possibles et maîtrisées par le décideur [SONNENBERG, 92].

Tout événement qui survient sous l'influence du hasard définit un nœud aléatoire qui est représenté sous la forme d'un cercle. Les branches des nœuds aléatoires doivent être des événements mutuellement exclusifs et complémentaires, c'est-à-dire qu'ils doivent couvrir l'ensemble des résultats possibles pour un événement donné (Cf. Figure 26) [RAUFASTE & HILTON, 99].

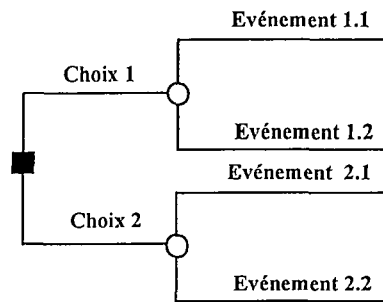


Figure 26 : Construction d'un arbre décisionnel

Le franchissement de barrière est le résultat d'une prise de décision. Il correspond donc à un arbre décisionnel et respecte les conditions de la construction de cet arbre. Cependant, il est important de rappeler que le franchissement de barrière est défini par rapport à la référence qui est le respect de barrière (RB). Cette référence sera désormais associée au nœud décisionnel (représenté par le rectangle plein).

Les choix possibles qui s'offrent au décideur sont soit respecter la barrière soit la franchir. Dans le cas où il décide de respecter la barrière, le choix de l'opérateur est la référence. Nous n'associons aucun nœud aléatoire à la branche associée au respect de la barrière puisqu'il s'agit de la situation de référence utilisée pour déterminer les Bénéfices, les Coûts et les Déficit potentiels en cas de décision de franchissement de barrière. Par contre, dans le cas où le décideur choisit le franchissement de barrière (FB), il existe deux événements possibles qui peuvent résulter de ce choix. Ces deux événements sont (1) la réussite du franchissement de barrière ou (2) l'échec de ce franchissement de barrière. Nous associons donc au franchissement de barrière, un nœud aléatoire et deux branches (Cf. Figure 27).

Afin d'éviter toute confusion et de rappeler la référence RB dans la modélisation de la prise de décision liée au franchissement de barrière :

- nous représenterons désormais la référence RB dans l'arbre décisionnel, cette référence est associée au nœud décisionnel,
- nous noterons $FB \setminus RB$ le franchissement de barrière connaissant la référence qui est le respect de barrière,
- nous noterons $RB \setminus RB$ le respect de barrière connaissant la référence qui est le respect de barrière (Cf. Figure 27).

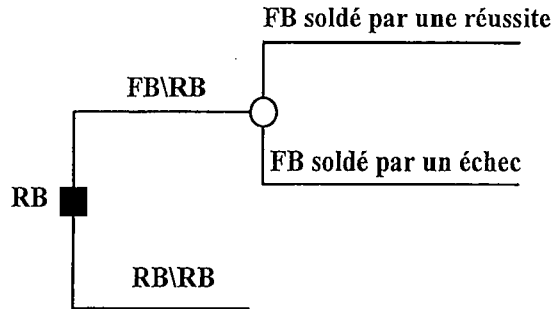


Figure 27 : Construction de l'arbre décisionnel d'un franchissement de barrière

2.2 L'affectation des probabilités :

La deuxième étape consiste à affecter aux événements aléatoires les probabilités d'occurrence associées. Ainsi, les branches qui symbolisent la réussite ou l'échec du franchissement de barrière se voient attribuer respectivement les probabilités p et son complément $(1-p)$. Cette complémentarité des probabilités résulte des deux possibilités de réussite ou d'échec du franchissement de barrière (Cf. Figure 28).

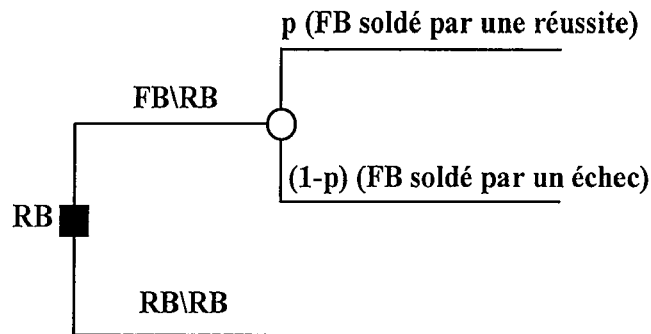


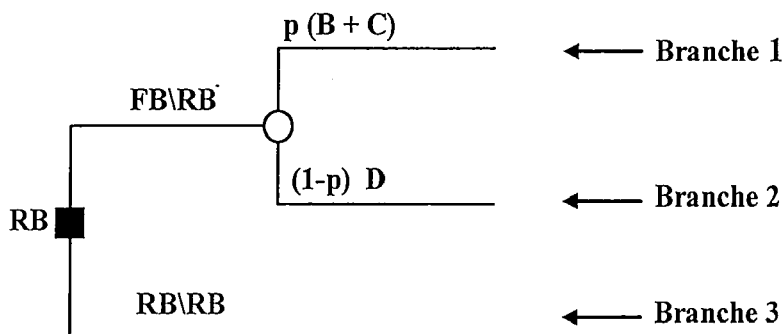
Figure 28 : Affectation des probabilités

2.3 L'attribution des conséquences :

L'étape finale de l'élaboration de l'arbre décisionnel consiste à attribuer les conséquences à ses branches terminales. Dans notre cas, les événements aléatoires sont :

- soit un franchissement de barrière réussi. Les conséquences sont alors les Bénéfices (B) recherchés par le décideur et les Coûts immédiats (C) investis pour atteindre les Bénéfices,
- soit un franchissement de barrière soldé par un échec. Les conséquences sont alors les Déficit potentiels (D) (Cf. Figure 29).

B, C et D sont respectivement les valeurs algébriques des Bénéfices, Coûts et Déficits potentiel avec $B \geq 0$, $C \leq 0$ et $D \leq 0$.



B, C et D sont les valeurs algébriques de Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels

Figure 29 : Attribution des Conséquences

2.4 Evaluation des conséquences d'un franchissement de barrière

Rappelons que le modèle BCD s'appuie sur une analyse multicritère des conséquences du franchissement de barrière. Dans le cadre des deux méthodes de prédiction des franchissements de barrières citées dans le deuxième chapitre (Cf. Paragraphe II), les critères liés au franchissement de barrière étaient la sécurité, la productivité, la qualité et la charge de travail [VANDERHAEGEN & al, 00] et [POLET, 02].

De ce fait, les attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels estimés par l'opérateur humain lors de sa prise de décision peuvent être associés à un ensemble de critères rattachés à sa tâche prescrite ou à son activité telle que la charge de travail.

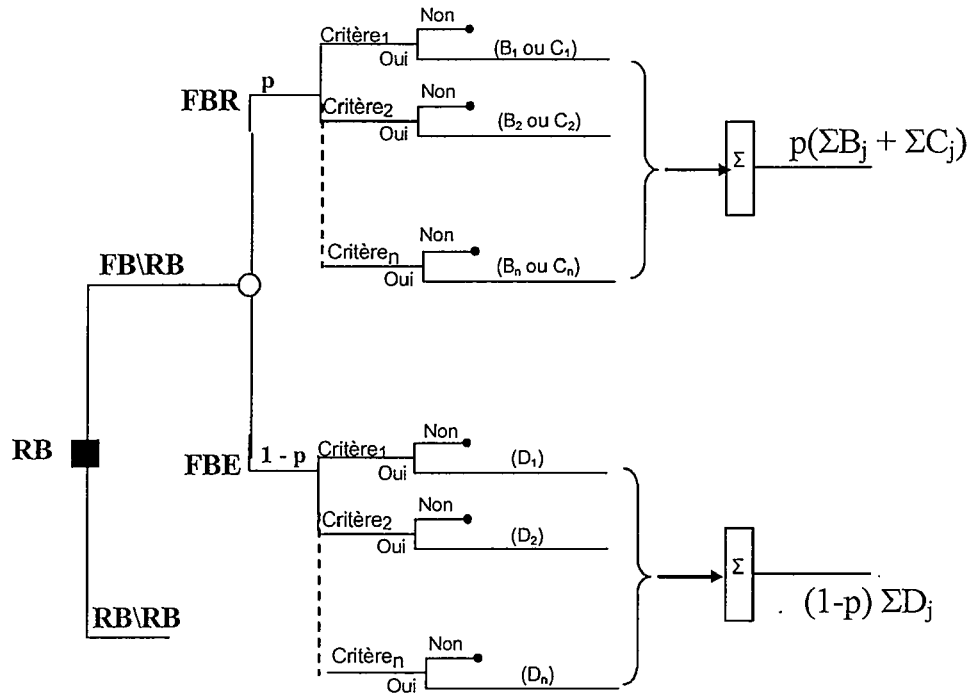
Les trois attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels sont des sommes calculées de la manière suivante :

- $\Sigma B_j = B_1 + B_2 + \dots + B_n$,
- $\Sigma C_j = C_1 + C_2 + \dots + C_n$,
- $\Sigma D_j = D_1 + D_2 + \dots + D_n$,

Avec :

n le nombre total des critères pouvant être rattachés à la tâche prescrite ou à l'activité de l'opérateur humain.

L'approche multicritère du modèle BCD induit une approche multicritère de la décision qui lui est associée. L'arbre décisionnel associé au franchissement de barrière est alors de la forme suivante (Cf. Figure 30) :



Avec : FBR : un Franchissement de Barrière soldé par une Réussite et FBE : un Franchissement de Barrière soldé par un Echec

Figure 30 : Arbres évolutifs de la prise de décision liée à un franchissement de barrière

2.5 Calcul de l'utilité espérée

Le calcul de l'utilité espérée se fait en parcourant l'arbre décisionnel de droite à gauche. En effet, nous devons partir des nœuds terminaux et attribuer à chacun d'entre eux la valeur des conséquences. A chaque nœud aléatoire, on calcule la valeur de chaque branche en multipliant la valeur du nœud par la probabilité de la branche en question. La valeur de chaque nœud aléatoire est égale à la somme des valeurs de chacune de ses branches. Le parcours de l'arbre s'effectue en descendant des plus hautes branches de l'arbre jusqu'à ses racines. Chaque nœud aléatoire distribue à son tour sa valeur à la branche à laquelle il est attaché. La décision retenue est celle qui correspond à l'utilité espérée la plus élevée.

Exemple de calcul de l'utilité espérée

Reprenons l'exemple du jeu, cité dans le deuxième chapitre (Cf. Paragraphe 1.2 Actions et états du monde) et supposons que dans ce cas la référence est de ne pas jouer. Cette supposition nous permet de nous rapprocher du contexte du franchissement de barrière. L'arbre décisionnel qui correspond à la prise de décision de jouer ou non est le suivant (Cf. Figure 31):

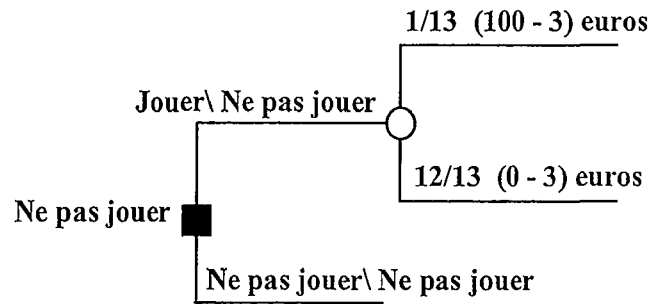


Figure 31 : L'arbre décisionnel de la prise de décision de jouer

Le calcul de l'utilité espérée du choix 'Jouer' $u(\text{Jouer} \setminus \text{Ne pas jouer})$ est le suivant :

- $u(\text{Jouer} \setminus \text{Ne pas jouer}) = [1/13 (100 - 3)] + [12/13 (0 - 3)] = 7.46 - 2.77 = 4.69$
- $u(\text{ne pas jouer} \setminus \text{Ne pas jouer}) = 0$
- Comme l'hypothèse retenue généralement est la suivante : *l'action retenue est celle qui correspond à l'utilité espérée maximale* [Howard & MATHESON, 83] et puisque $u(\text{Jouer} \setminus \text{ne pas jouer}) > u(\text{ne pas jouer} \setminus \text{ne pas jouer})$, alors la Décision = 'Jouer'.

2.6 Le modèle générique de l'utilité espérée du franchissement de barrière

L'arbre décisionnel lié à un franchissement de barrière peut se traduire en un modèle linéaire. Le calcul de l'utilité espérée d'un franchissement de barrière $u(\text{FB} \setminus \text{RB})$ est obtenu par l'Équation 3:

$$u(\text{FB} \setminus \text{RB}) = p (\Sigma B_j + \Sigma C_j) + (1-p) \Sigma D_j$$

Équation 3

$$\text{Sachant que } u(\text{RB} \setminus \text{RB}) = 0$$

Équation 4

Puisque les probabilités p et $(1-p)$ ne sont pas connues a priori, les décisions relatives aux franchissements de barrière sont des prises sous incertitude (Cf. Paragraphe 2 Différents types de prise de décision). Il s'ensuit que l'Équation 3 devient :

$$u(\text{FB} \setminus \text{RB}) = \Sigma B_j + \Sigma C_j + \Sigma D_j$$

Équation 5

avec :

- $u(\text{FB} \setminus \text{RB})$ est l'utilité espérée du franchissement de barrière,
- ΣB_j est la somme des Bénéfices obtenus en cas de la réussite du franchissement de barrière,
- ΣC_j est la somme des Coûts immédiats investis par l'opérateur humain pour atteindre les Bénéfices en cas de la réussite du franchissement de barrière,
- ΣD_j est la somme des Déficits potentiels auxquels l'opérateur humain sera confronté en cas de l'échec du franchissement de barrière,

- p est la probabilité associée à la réussite du franchissement de barrière,
- $(1-p)$ est la probabilité associée à l'échec du franchissement de barrière.

A ce stade nous venons de décrire les étapes à suivre pour obtenir un modèle linéaire générique de la prise de décision. Ce modèle ne traduit pas la subjectivité de la prise de décision. En effet, la valeur de l'utilité espérée du franchissement de barrière peut être influencée par les poids que peut associer le décideur aux conséquences des différentes actions possibles (Cf. page 50). Par exemple, une personne pessimiste peut accorder un poids plus important aux pertes qu'aux gains et vice-versa.

Afin de personnaliser la prise de décision liée au franchissement de barrière, nous présenterons dans les paragraphes suivants, un modèle spécifique de la prise de décision liée au franchissement de barrière. Il intègre, en plus des éléments du modèle générique:

- des poids α , β et γ aux attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels,
- des erreurs ε_α , ε_β et ε_γ sur les poids α , β et γ .

III. Modèle linéaire spécifique de la prise de décision d'un franchissement de barrière

1. Affectation des poids aux B, C et D

La subjectivité de la prise de décision peut se manifester par la surévaluation ou la sous-évaluation des probabilités d'occurrence des événements aléatoires. Elle peut donc être représentée par des poids associés aux conséquences. Dans le cadre du franchissement de barrière ces poids sont associés aux Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels.

L'idée d'associer des poids aux Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels a été testée en premier lieu dans le cadre du trafic ferroviaire et appliquée avec TRANSPAL [VANDERHAEGEN, CHAALI-DJELASSI & ZHANG, 04] et [ZHANG, CHAALI-DJELASSI & VANDERHAEGEN, 04]. Dans ce cadre, il s'agissait d'associer des poids aux attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels en prenant en compte les **incertitudes** des opérateurs humains. Les résultats encourageants de la prise en compte de l'incertitude nous ont permis de renforcer l'idée de pondérer les attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels dans le modèle spécifique de la prise de décision.

Avant d'associer des poids aux attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels dans le modèle spécifique, nous résumons la démarche de la prise en compte des incertitudes. Le paragraphe suivant met en évidence l'influence de la personnalisation des évaluations des attributs sur la prédiction des franchissements de barrière.

1.1 Pondération des attributs B, C et D en fonction de l'incertitude

L'idée d'associer des poids aux Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels pour personnaliser la décision de franchir une barrière a été intégrée dans la méthode de prédiction des franchissements de barrière par réseau de neurones (Cf. page 41). Cette méthode a testé

l'influence de la prise en compte de l'incertitude sur la prédiction des franchissements de barrière exceptionnel [VANDERHAEGEN, CHAALI-DJELASSI & ZHANG, 04] et [ZHANG, CHAALI-DJELASSI & VANDERHAEGEN, 04]. Elle a été appliquée avec TRANSPAL (Cf. Figure 13) et avec des experts ferroviaires travaillant dans le cadre du projet européen Urban Guided Transport Management System (UGTMS).

La démarche de la prise en compte de l'incertitude dans la prise de décision de franchir une barrière consistait à :

- évaluer les attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels par les sujets, cette évaluation est notée (S),
- évaluer le niveau de certitude du sujet lorsqu'il évalue les Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels,
- associer des poids en fonction des incertitudes aux Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels.

Les incertitudes sur les évaluations des attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels dans le réseau de neurones améliorent la prédiction des franchissements de barrière (Cf. Figure 32).

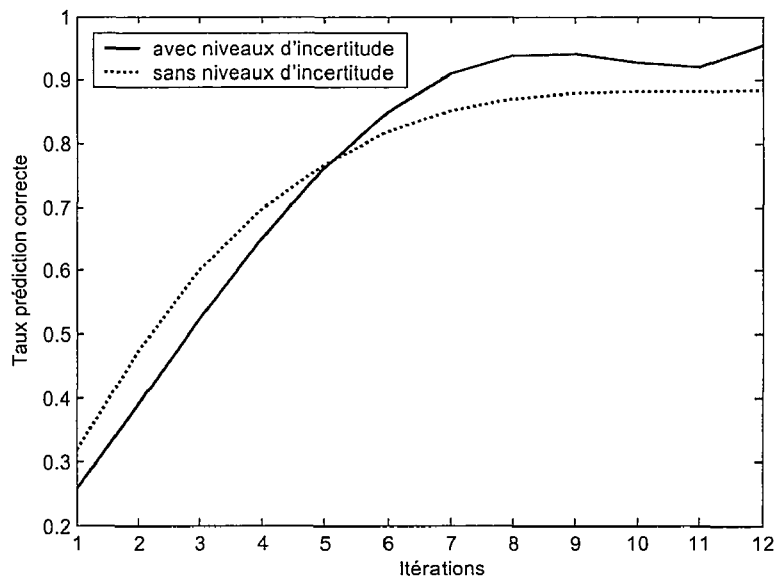
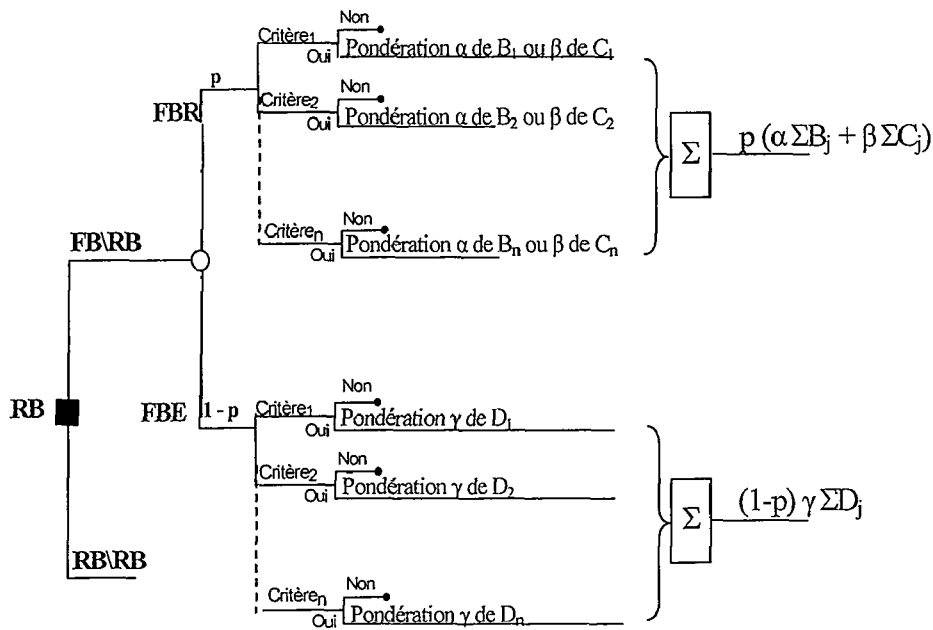


Figure 32 : Taux de prédiction correcte avec et sans incertitude

Ces résultats encourageants renforcent notre idée de pondérer les attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels dans le modèle spécifique.

1.2 Intégration des poids dans le modèle spécifique

Selon que la personne est pessimiste ou non, les poids associés aux Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels peuvent soit maximiser les probabilités d'occurrence des événements risqués soit les minimiser [CHAALI-DJELASSI & al, 05a]. L'arbre décisionnel du franchissement de barrière correspondant est le suivant (Cf. Figure 33).



$1 \leq j \leq n$, n : nombre total des critères.

Figure 33 : Intégration des poids dans le modèle spécifique de la prise de décision

L'intégration des poids permet de déduire le modèle linéaire spécifique suivant de la prise de décision liée au franchissement de barrière (Cf. Équation 6).

$$u(\text{FB}\backslash\text{RB}) = p (\alpha \Sigma B_j + \beta \Sigma C_j) + (1-p) \gamma \Sigma D_j.$$

Équation 6

1.3 Intégration des erreurs sur les poids dans le modèle spécifique de la décision

Rappelons que la prise de décision est un processus qui peut être erroné dans le cas où le décideur ne perçoit pas la totalité de la situation ou les conséquences de ses actions. Il en résulte que des erreurs d'évaluation peuvent avoir lieu [CHAALI-DJELASSI & al, 05a].

Puisque les éléments du modèle de la prise de décision sont attribués par le décideur, ils peuvent présenter des erreurs d'évaluation. Il s'ensuit que les poids associés aux Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels, perçus par l'opérateur humain, peuvent être erronés. Ces erreurs d'évaluation des poids α , β et γ associés aux Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels sont notées respectivement ϵ_α , ϵ_β et ϵ_γ .

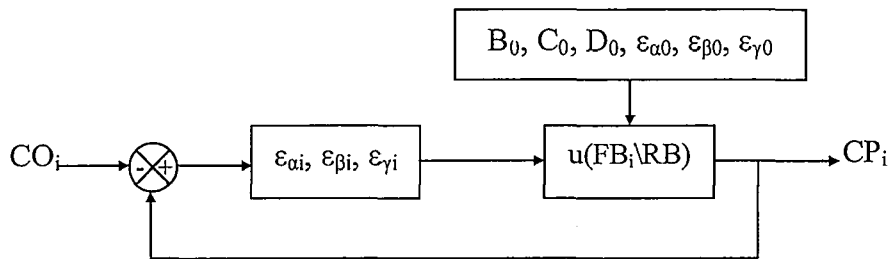
Les erreurs ϵ_α , ϵ_β et ϵ_γ sur les poids α , β et γ peuvent être détectées a posteriori, en comparant :

- les conséquences estimées par l'opérateur humain et celles constatées réellement
ou
- la valeur de l'utilité espérée du franchissement de barrière $u(\text{FB}\backslash\text{RB})$ et le comportement observé.

2. Modèle linéaire spécifique de la prise de décision liée au franchissement de barrière

La correction des erreurs ε_α , ε_β et ε_γ sur les poids α , β et γ peut améliorer voire affiner la valeur de l'utilité espérée du franchissement de barrière. Elle peut être assurée par la répétition :

- du calcul de la valeur de l'utilité espérée du franchissement de barrière $u(\text{FB}_i \setminus \text{RB})$,
- la comparaison entre le comportement prédit (CP_i), qui correspond à la valeur de l'utilité espérée $u(\text{FB}_i \setminus \text{RB})$ avec le comportement observé (CO_i) (Cf. Figure 34).



Avec $1 \leq i \leq N$, N est le nombre de comportements

Figure 34 : Correction des erreurs ε_α , ε_β et ε_γ sur les poids α , β et γ

Dans ce cas, le modèle de l'utilité espérée du franchissement de barrière peut être représenté sous une forme récurrente décrite par l'équation suivante (Cf. Équation 7) :

$$u(\text{FB}_{(i+1)} \setminus \text{RB}) = p [(\alpha_i + \varepsilon_{\alpha_i}) \sum B_j + (\beta_i + \varepsilon_{\beta_i}) \sum C_j] + (1-p) (\gamma_i + \varepsilon_{\gamma_i}) \sum D_j$$

Équation 7

A ce stade, nous avons (1) associé des poids α , β et γ aux attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels et (2) pris en compte les erreurs sur ces poids. Ceci nous permet de personnaliser le modèle de la prise de décision liée au franchissement de barrière.

La démarche de construction du modèle spécifique de la prise de décision liée au franchissement de barrière suit toutes les étapes du modèle générique. Le calcul de l'utilité espérée du franchissement de barrière qui en découle respecte toutes les conditions et équations correspondant au modèle générique. Cependant, les différences entre les deux modèles se situent dans (1) la pondération des conséquences Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels par des poids α , β et γ et (2) la prise en compte des erreurs d'évaluation ε_{α_i} , ε_{β_i} et ε_{γ_i} dans le modèle spécifique.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons abordé, selon deux points de vue différents, la prise de décision liée au franchissement de barrière et nous avons présenté deux modèles linéaires de cette prise de décision.

Le premier modèle est un modèle linéaire générique de la prise de décision, qui :

- intègre les éléments de la prise de décision (probabilités et conséquences),

- donne lieu à un arbre décisionnel,
- permet l'élaboration d'un modèle linéaire (Cf. Équation 5) de la prise de décision,
- permet de calculer l'utilité espérée de la prise de décision d'un franchissement de barrière.

Le deuxième modèle est un modèle linéaire spécifique de la prise de décision, qui :

- respecte la démarche du modèle linéaire générique de la prise de décision
- associe des poids aux conséquences,
- intègre les erreurs sur les poids dans le calcul de l'utilité espérée du franchissement de barrière.

La traduction de la prise de décision d'un franchissement de barrière en un modèle linéaire spécifique nous permet d'établir une valeur de l'utilité espérée de ce franchissement de barrière. La déduction de la décision qui découle de cette utilité espérée vise à prédire si oui ou non il y aura franchissement de barrière.

Les poids affectés aux Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels peuvent être erronés. La détection de ces erreurs sur les poids est assurée par la comparaison entre les comportements prédits qui correspondent aux valeurs des utilités espérées et les comportements observés réellement. Suite à cette comparaison, la méthode consiste à renforcer ou corriger les valeurs des poids. Il s'avère donc nécessaire de répéter cette comparaison plusieurs fois pour affiner la valeur de l'utilité espérée du franchissement de barrière. Le renforcement de l'apprentissage semble être le moyen convenable pour affiner la valeur de l'utilité espérée du franchissement de barrière.

Nous pouvons ainsi introduire une nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière basée sur l'utilité espérée et le renforcement de l'apprentissage. Cette méthode est détaillée dans les paragraphes suivants.

IV. Prédiction des franchissements de barrière basée sur l'utilité espérée et le Renforcement de l'Apprentissage

Les tâches effectuées par l'opérateur humain sont des tâches qui peuvent se répéter. Les résultats d'une action a_i réalisée à un instant t par l'opérateur humain peuvent influencer ses décisions ultérieures et s'observer au travers de l'action a_{i+1} accomplie à l'instant $t+\Delta t$. Il peut donc retenir la même action ($a_i = a_{i+1}$) ou la modifier ($a_i \neq a_{i+1}$). Ce phénomène correspond à un apprentissage renforcé de l'opérateur humain.

C'est pour cela que la nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière que nous proposons se base sur l'utilité espérée du franchissement de barrière et le renforcement de l'apprentissage.

Dans ce qui suit, nous aborderons en premier lieu le renforcement de l'apprentissage en général et le Contrôle Itératif de l'Apprentissage en particulier. Ensuite, nous développerons la nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière.

1. Le renforcement de l'apprentissage

Le concept de l'apprentissage, en général, et de l'apprentissage par renforcement, en particulier, est apparu essentiellement dans le domaine de la biologie où il a été appliqué au début sur des animaux (les souris, le chien de Pavlov, ...). Ensuite des études de psychologie et de pédagogie se sont intéressées à la compréhension et la modélisation de l'apprentissage chez l'Homme. Puis, le concept de l'apprentissage a été intégré dans les domaines de l'automatique et de l'informatique pour améliorer le champ d'action des systèmes artificiels tels que les robots [SUTTON, 88].

Nous n'allons pas présenter en détail l'apprentissage par renforcement puisque des ouvrages très complets l'ont déjà fait [SUTTON & BARTO, 98], mais nous allons rappeler ses grands principes. Nous commencerons, dans ce qui suit, par définir la notion de l'apprentissage pour un système artificiel avant d'aborder l'apprentissage par renforcement.

1.1 L'apprentissage pour un système artificiel

Un système artificiel, par exemple un robot, est un ensemble de constituants matériels ou logiciels formant un tout créé pour atteindre un objectif précis. La problématique de l'apprentissage d'un système artificiel est de lui faire acquérir, par l'exemple ou par l'expérience, un comportement pour atteindre cet objectif.

Un modèle élémentaire utilisé pour décrire un tel système apprenant considère, d'une part, les états qu'il peut atteindre dans son environnement et, d'autre part, les actions qui lui permettent de passer d'un état à un autre. Lorsque les actions à exécuter pour atteindre un but sont connues, le système apprenant peut apprendre de façon supervisée à reproduire et à généraliser ces actions. Dans le cas où les actions ne sont pas connues, il n'est pas possible de planifier à l'avance le comportement du système apprenant, et il faut apprendre par essai-erreur. C'est ainsi que l'on introduit l'apprentissage par renforcement. En effet, dans le cas d'un essai réussi, le système apprenant garde l'action qu'il a essayée et l'ajoute dans sa base de connaissance. Mais dans le cas d'un essai non réussi, le système apprenant supprime cette action de sa base de connaissance ou lui accorde une faible importance. Après une série de cycles essais-erreurs, le système apprenant améliore sa base de connaissance en gardant les bonnes actions et en supprimant les mauvaises.

1.2 Modèle de l'apprentissage par renforcement

a. Principe :

D'après BAXTER [BAXTER, 99], l'apprentissage par renforcement définit un type d'interaction entre le système apprenant et l'environnement. En effet, depuis une situation réelle dans l'environnement s , le système apprenant choisit et exécute une action a_i qui provoque une transition vers l'état s' . Il reçoit en retour un signal de renforcement r négatif de type pénalité si l'action conduit à un échec ou positif de type récompense si l'action est

bénéfique. Un signal de retour nul signifie une incapacité à attribuer une pénalité ou une récompense.

Le système apprenant utilise alors ce signal pour améliorer sa stratégie, c'est-à-dire la séquence de ses actions, afin de maximiser le cumul de ses récompenses futures. Dans ce but, il doit trouver un équilibre entre exploration et exploitation.

L'exploration consiste à tester de nouvelles actions pouvant conduire à des gains supérieurs en prenant le risque d'erreurs d'évaluation de ces gains. L'exploitation consiste à appliquer la meilleure stratégie acquise (celle-ci pouvant ne pas être optimale).

Le double objectif de l'apprentissage par renforcement est donc de conduire de manière optimale un système au cours du temps tout en apprenant cette conduite optimale à travers des expériences [GARCIA, 97].

Les éléments à prendre en compte dans l'apprentissage par renforcement sont multiples [BUFFET, 00] et [BUFFET, 03]. Il pourra s'agir du temps, des états, des actions, des signaux de renforcement et de l'environnement. Ces éléments sont appelés facteurs d'influence.

b. Facteurs d'influence

- Le temps

L'espace temps a des formes différentes. En effet, il peut être soit discret ou continu, soit fini ou infini, soit déterminé ou aléatoire. La plupart des études sur l'apprentissage par renforcement utilisent un espace de temps discret.

- Les états

Les états caractérisent les situations d'un système apprenant et de l'environnement à chaque instant. Ils peuvent se décomposer en trois formes :

- une situation relationnelle du système apprenant par rapport à l'environnement (position, etc.),
- une situation propre à l'environnement (modification du milieu),
- une situation interne au système apprenant (sa mémoire, ses capteurs, etc.).

Les trois formes d'état peuvent être présentes en même temps en fonction du problème traité.

- Les actions

Un système apprenant choisit une action a_t parmi les actions possibles A à chaque instant t , cette action peut être instantanée ou durer jusqu'au prochain instant. A chaque état est associé un ensemble d'actions possibles de l'espace d'action.

- Le signal de renforcement

A chaque instant, l'interaction produit une valeur de renforcement r qui mesure la justesse de la réaction du système apprenant. Le but du système apprenant est de maximiser le cumul de ces renforcements dans le temps. Le choix des règles de délivrance de ce signal conditionne largement le succès de l'apprentissage et le comportement final du système apprenant [TOUZET, 93]. Par exemple, pour qu'un robot

se dirige vers un point, on peut donner à chaque instant une récompense qui est inversement proportionnelle à la distance entre la position du robot et ce point.

- L'environnement

Les principaux qualificatifs qui caractérisent l'environnement et l'interaction système apprenant/environnement [BUFFET, 00] et qui sont utiles pour choisir une méthode d'apprentissage sont les suivants :

- *accessible / inaccessible* : le système apprenant a-t-il accès à l'état complet de l'environnement ou certaines informations restent-elles mal connues ?
- *Épisodique / non épisodique* : on parle d'expérience épisodique si les interactions du système apprenant avec l'environnement peuvent être divisées en « épisodes ». Chaque épisode consiste en une succession d'étapes de perception / action, le résultat de l'action ne dépend que de l'épisode courant.
- *Statique / dynamique* : un environnement est dit dynamique si son état peut changer en fonction du temps pendant la prise de décision du système apprenant. Il est dit statique dans le cas contraire.
- *Discret / continu* : s'il existe un nombre limité de perceptions et d'actions possibles, alors on parle d'environnement discret. L'environnement est continu dans le cas contraire.
- *Déterministe / non déterministe* : le prochain état de l'environnement est-il complètement déterminé par son état courant et l'action sélectionnée par le système apprenant ?

Le cadre mathématique adapté pour la description de l'apprentissage par renforcement dans le cas déterministe est le modèle de processus de décision de Markov. Ce modèle est abordé dans le paragraphe suivant.

c. Processus de décision de Markov :

Un outil utile pour décrire certains comportements dynamiques d'un système apprenant est le processus de décision markovienne (MDP : Markov Decision Process) et ses dérivés. Un processus de décision markovien est un modèle de Markov constitué de [KAEHLING & AL, 96] :

- un ensemble d'états S ,
- un ensemble d'actions A ,
- une fonction de gain / perte $R : S \times S \times A \rightarrow \mathbb{R}$, où $R_{s,s}^a$ est le gain attendu lorsqu'on passe de l'état s à l'état s' en appliquant l'action a ,
- une fonction de transition d'état $T : S \times A \times S \rightarrow [0, 1]$, où $T_{s,s'}^a$ est la probabilité de la transition de l'état s à l'état s' en utilisant l'action a .

La plupart des résultats théoriques sur l'apprentissage par renforcement concernent des systèmes dont le comportement peut être décrit par un processus de décision markovienne. Dans un MDP, le système apprenant connaît les états et actions du système, mais il ne connaît pas nécessairement le fonctionnement de l'environnement (E) ni les situations provoquant des récompenses (R). On distingue en général deux situations d'apprentissage [KAELBLING & AL, 96] :

- *avec modèle* : le système apprenant connaît ou estime E et R,
- *sans modèle* : le système apprenant cherche à apprendre directement une politique, sans utiliser E et R.

Dans le second cas, il faut que le système apprenant expérimente et apprenne par essais-erreurs.

Nos travaux ne supposeront pas la connaissance explicite d'un modèle (fonction de transition E et fonction de gain / récompense R non connues). Ils se baseront plutôt sur des algorithmes.

Afin de construire l'algorithme d'apprentissage par renforcement à intégrer dans la méthode de prédiction des franchissements de barrière, nous nous intéresserons à une forme simple du renforcement de l'apprentissage qui est le Contrôle Itératif de l'Apprentissage (Iterative Learning Control). Nous commencerons, d'abord par définir le Contrôle Itératif de l'Apprentissage, ensuite nous présenterons son algorithme qui sera intégré dans la méthode de prédiction des franchissements de barrière.

2. Description du Contrôle Itératif de l'Apprentissage

Les études récentes du contrôle de l'apprentissage automatique (Iterative Learning Control) se sont intéressées au principe du Contrôle Itératif de l'Apprentissage [LEE, TAN, LIM & DOU, 00], [XU & YAN, 04], [CHI & YAO, 04]. Le Contrôle Itératif de l'Apprentissage, pour les systèmes linéaires et non-linéaires, a été très étudié durant les dix dernières années [ARIMOTO, KAWAMURA et MIYAZAKI, 1984]; [HEINZINGER, FENWICK, PADEN & MIYAZAKI, 1992]; [SAAB, 1994]. Il permet aux systèmes d'améliorer leur performance à travers un simple processus d'apprentissage. Ce processus, dans lequel les erreurs sont détectées et minimisées, commence avec un faible niveau de connaissance des conséquences des actions possibles. L'algorithme du Contrôle Itératif de l'Apprentissage ajuste ses paramètres après un certain nombre d'itérations dans le but de réduire l'erreur entre le signal d'entrée et le signal de sortie. La simplicité et l'efficacité du Contrôle Itératif de l'Apprentissage peut apporter une amélioration considérable aux applications réelles intégrant des tâches répétitives tels que les mouvements de robots [MOORE, 93] et [BIEN & XU, 98].

L'idée de base du Contrôle Itératif de l'Apprentissage est illustrée dans la Figure 35. Tous les signaux sont définis sur un intervalle de temps $[0, T]$. L'indice k indique le nombre d'itérations ou d'essais. Pendant la $k^{\text{ième}}$ itération, une entrée $\lambda_k(t)$ appliquée au système produit la sortie $y_k(t)$. En utilisant l'erreur générée par la différence entre la sortie actuelle du système et la sortie désirée, $e_k(t) = y_d(t) - y_k(t)$, le signal d'entrée pour l'itération suivante $\lambda_{k+1}(t)$ est calculé puis conservé en mémoire jusqu'au prochain temps d'action du système. L'entrée $\lambda_{k+1}(t)$ est générée par l'algorithme du Contrôle Itératif de l'Apprentissage afin de réduire au maximum l'erreur $e_{(k+1)}(t)$.

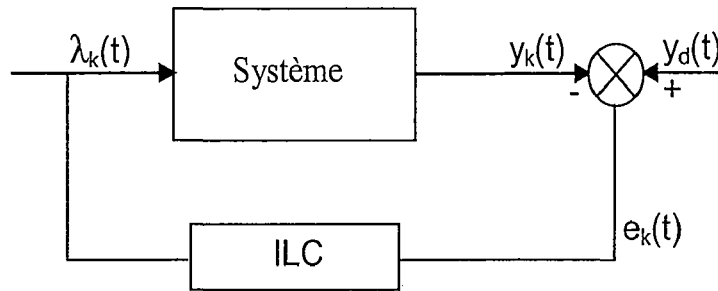


Figure 35 : Principe du Contrôle Itératif de l'Apprentissage

La technique du Contrôle Itératif de l'Apprentissage peut être mieux exprimée si l'on considère la description suivante du système dynamique :

$$F : U \rightarrow Y; \text{ avec } U \text{ et } Y \text{ sont deux vecteurs.}$$

La représentation du système pour les entrées $\lambda(t) \in U$ et sorties $y(t) \in Y$ peut être écrite sous la forme :

$$y(t) = F(\lambda(t)).$$

Le but du Contrôle Itératif de l'Apprentissage peut alors être exprimé par la recherche de l'entrée optimale $\lambda_d(t)$ tel que (Cf. Équation 8) :

$$\min_{\lambda(t)} \|y_d(t) - F(\lambda(t))\| = \|y_d(t) - F(\lambda_d(t))\|$$

Équation 8

Un algorithme de Contrôle Itératif de l'Apprentissage va donc générer un ensemble d'entrées $\{\lambda_k(t)\}_{k \geq 0}$ qui, une fois appliquée au système, produit un ensemble de sorties $\{y_k(t)\}_{k \geq 0}$ tel que :

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \lambda_k(t) = \lambda_d(t) \quad \forall t \in [0, T]$$

Équation 9

3. Méthode de prédiction des franchissements de barrière

La méthode de prédiction des franchissements de barrière implique (1) l'observation des comportements des opérateurs humains réalisant, pour (N-1) fois, les mêmes tâches, (2) l'enregistrement du comportement observé à chaque temps t_i ($1 \leq i \leq N-1$), et (3) la prédiction du comportement humain à t_N . Bien évidemment, en réalisant les tâches prescrites, les opérateurs humains sont confrontés à des situations présentant des barrières susceptibles d'être franchies.

La méthode de prédiction se base sur le principe du Contrôle Itératif de l'Apprentissage pour améliorer le taux de prédiction correcte des franchissements de barrière.

L'algorithme du Contrôle Itératif de l'Apprentissage est détaillé par la suite. Les hypothèses et les différentes étapes de la méthode de prédiction des franchissements de barrière sont décrites ci-dessous.

3.1 Hypothèses

Les hypothèses majeures sur lesquelles repose la nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière sont les suivantes (Cf. Équation 4 et Équation 7):

$$u(\text{FB}_{(i+1)} \setminus \text{RB}) = p [(\alpha_i + \varepsilon_{\alpha i}) \Sigma B_j + (\beta_i + \varepsilon_{\beta i}) \Sigma C_j] + (1-p) (\gamma_i + \varepsilon_{\gamma i}) \Sigma D_j$$

$$u(\text{RB} \setminus \text{RB}) = 0$$

Avec $1 \leq i \leq N$, N est le nombre de comportements prédits

Si $u(\text{FB}_{(i+1)} \setminus \text{RB}) > 0$ alors $\text{CP} = \text{FB}$.

Avec $\text{CP} = \text{Comportement Prédit}$

Cependant, la méthode de prédiction peut être sensible à la valeur de $u(\text{FB} \setminus \text{RB})$. Afin de prendre en compte ce seuil de sensibilité, nous modifions une partie de l'hypothèse. Ainsi l'Équation 4 devient l'Équation 10:

$$\text{si } u(\text{FB}_{(i+1)} \setminus \text{RB}) > \Delta u \text{ alors } \text{CP} = \text{FB}.$$

Équation 10

Avec :

Δu : le seuil de sensibilité de la méthode de prédiction des franchissements de barrière.

Toutefois, si les probabilités p et $(1-p)$ ne sont pas disponibles, alors l'Équation 4 sera de la forme suivante (Cf. Équation 11):

$$u(\text{FB}_{(i+1)} \setminus \text{RB}) = (\alpha_i + \varepsilon_{\alpha i}) \Sigma B_j + (\beta_i + \varepsilon_{\beta i}) \Sigma C_j + (\gamma_i + \varepsilon_{\gamma i}) \Sigma D_j$$

Équation 11

Cette équation traduira une décision de franchissement de barrière prise *sous incertitude* (Cf. Paragraphe 2 Différents types de prise de décision du chapitre 2).

3.2 Etapes de la méthode de prédiction des franchissements de barrière

Les étapes de la méthode de prédiction des franchissements de barrière sont les suivantes :

1. calculer l'utilité espérée initiale du franchissement de la première barrière rencontrée par l'opérateur humain à la première situation $u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})$. Ce calcul nécessite :
 - les valeurs initiales des attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels B_0 , C_0 et D_0 ,
 - les valeurs initiales des poids α_0 , β_0 et γ_0 ,

- les valeurs initiales des erreurs ε_{α_0} , ε_{β_0} et ε_{γ_0} .
2. déduire le Comportement Prédit (CP_1) de l'opérateur humain correspondant à $u(FB_0 \setminus RB)$. La déduction de CP_1 nécessite la connaissance de la valeur du seuil de sensibilité Δu .
 3. enregistrer le Comportement Observé (CO_1) de l'opérateur humain à la première situation,
 4. comparer le Comportement Prédit (CP_1) au Comportement Observé (CO_1),
 - si $CP_1 = CO_1$, alors renforcer $u(FB_0 \setminus RB)$ pour obtenir $u(FB_1 \setminus RB)$, dans ce cas $u(FB_1 \setminus RB) = u(FB_0 \setminus RB) + r u(FB_0 \setminus RB)$, avec $r > 0$
 - si $CP_1 \neq CO_1$, alors corriger $u(FB_0 \setminus RB)$ pour obtenir $u(FB_1 \setminus RB)$, dans ce cas $u(FB_1 \setminus RB) = u(FB_0 \setminus RB) - r u(FB_0 \setminus RB)$
 5. répéter les quatre étapes précédentes (N-1) fois,
 6. prédire le N^{ième} comportement humain CP_N .

Les quatre premières étapes constituent la première itération de l'algorithme du Contrôle Itératif de l'Apprentissage (Cf. Figure 36). Les (N-1) autres itérations correspondent aux deux dernières étapes 5 et 6.

Les entrées de l'organigramme du Contrôle Itératif de l'Apprentissage sont :

- a. la valeur initiale de l'utilité espérée du franchissement de barrière $u(FB_0 \setminus RB)$ calculée à partir (1) des attributs Bénéfices, Coûts et Déficit potentiels (B_0 , C_0 et D_0) évalués pour la première itération, (2) leurs poids associés α_0 , β_0 et γ_0 et (3) les erreurs sur ces poids ε_{α_0} , ε_{β_0} , ε_{γ_0} .
- b. les (N-1) comportements observés des opérateurs CO_i c'est-à-dire franchissement ou respect de la barrière étudiée.

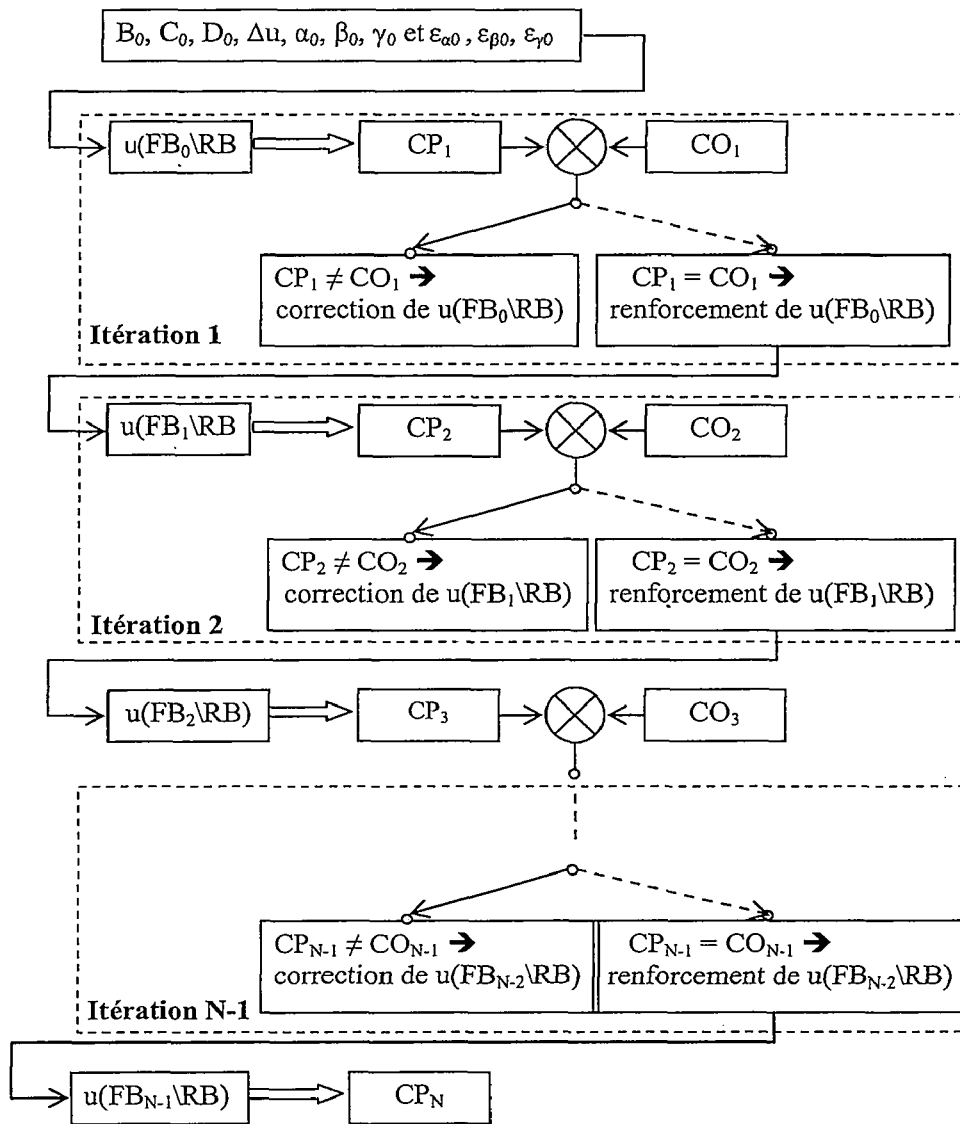


Figure 36 : Algorithme de la méthode de prédiction des franchissements de barrière pour N itérations [CHAALI-DJELASSI & al, 06]

Avec :

- $\text{CO}_i, 0 < i < N$ est le comportement de l'opérateur observé à la $i^{\text{ème}}$ situation, c'est-à-dire franchissement de barrière ou respect de barrière,
- $\text{CP}_i, 0 < i < N$ est le comportement de l'opérateur prédit à la $i^{\text{ème}}$ situation (respect ou franchissement de barrière).

L'algorithme du Contrôle Itératif de l'Apprentissage intègre ces données dans son processus d'apprentissage pour calculer les utilités espérées des franchissements de barrière $u(\text{FB}_i \setminus \text{RB})$ et prédire les comportements de l'opérateur qui leur correspondent (Cf. Figure 37).

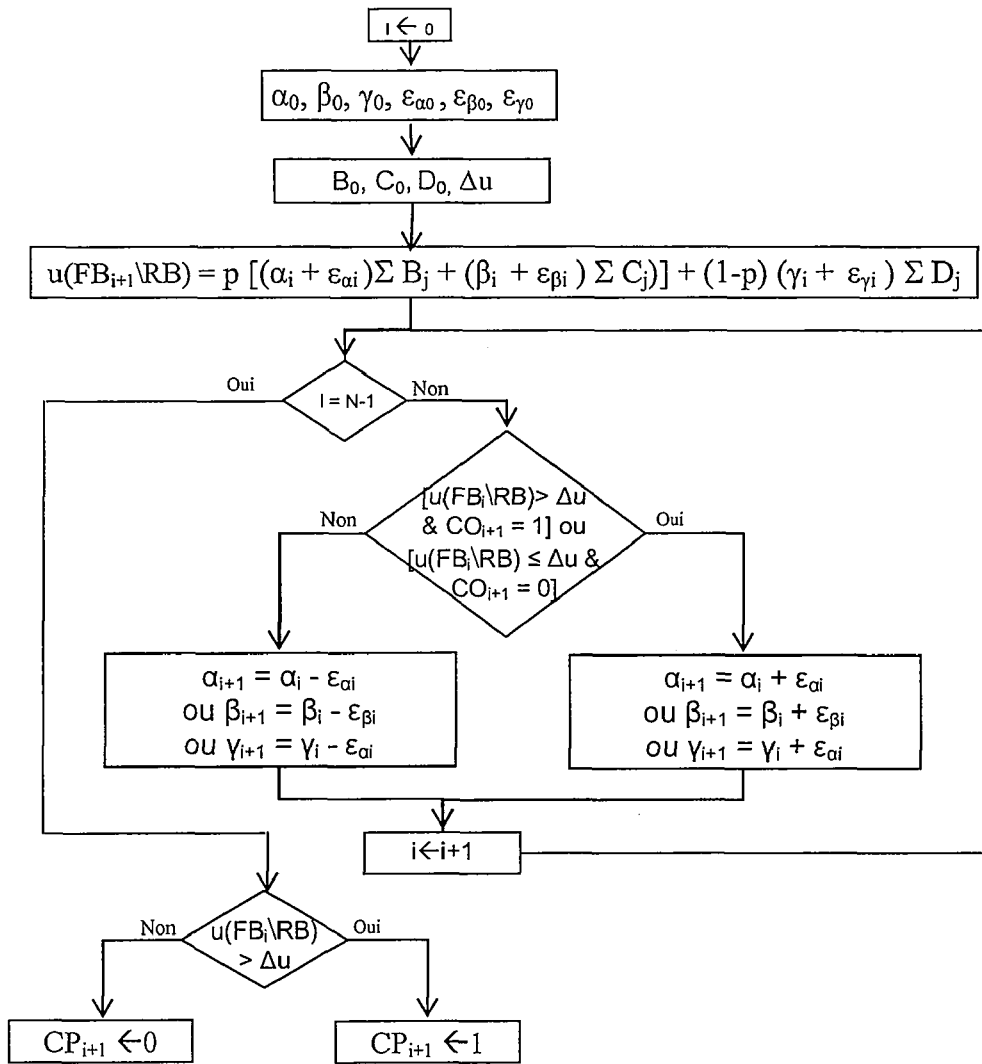


Figure 37 : Organigramme du Contrôle Itératif de l'apprentissage

Avec $\varepsilon_{\alpha_i}, \varepsilon_{\beta_i}, \varepsilon_{\gamma_i} \geq 0$

3.3 Renforcement et Correction de $u(\text{FB}_i \setminus \text{RB})$

Selon nos hypothèses, si l'utilité espérée du franchissement de barrière $u(\text{FB}_i \setminus \text{RB})$ est supérieure à Δu alors la barrière en question sera franchie. À chaque itération, l'algorithme renforce la valeur de l'utilité espérée $u(\text{FB}_i \setminus \text{RB})$ en augmentant sa valeur absolue si cette hypothèse est validée ou corrige la valeur de l'utilité espérée $u(\text{FB}_i \setminus \text{RB})$ en diminuant sa valeur absolue si cette hypothèse n'est pas validée (Cf. Tableau 6).

$u(\text{FB}_i \setminus \text{RB}) > \Delta u$	FB observé	Action	Equation
Oui	Oui	Renforcement	$u(\text{FB}_{i+1} \setminus \text{RB}) = u(\text{FB}_i \setminus \text{RB}) + r_i u(\text{FB}_i \setminus \text{RB}),$
Oui	Non	Correction	$u(\text{FB}_{i+1} \setminus \text{RB}) = u(\text{FB}_i \setminus \text{RB}) - r_i u(\text{FB}_i \setminus \text{RB}),$
Non	Oui	Correction	$u(\text{FB}_{i+1} \setminus \text{RB}) = u(\text{FB}_i \setminus \text{RB}) + r_i u(\text{FB}_i \setminus \text{RB}),$
Non	Non	Renforcement	$u(\text{FB}_{i+1} \setminus \text{RB}) = u(\text{FB}_i \setminus \text{RB}) - r_i u(\text{FB}_i \setminus \text{RB}),$

Avec r_i la valeur absolue d'un signal de renforcement associé à la correction ou au renforcement de la valeur de $u(\text{FB}_i \setminus \text{RB})$.

Tableau 6 : Renforcement et correction de la valeur de l'utilité espérée du franchissement de barrière $u(\text{FB}_i \setminus \text{RB})$

Dans le cas d'un renforcement de la valeur de l'utilité espérée,

$$\begin{aligned}
 u(\text{FB}_{i+1} \setminus \text{RB}) &= u(\text{FB}_i \setminus \text{RB}) + r_i u(\text{FB}_i \setminus \text{RB}), \\
 &= p (\alpha_i \Sigma B_j + \beta_i \Sigma C_j) + (1-p) \gamma_i \Sigma D_j + r_i [p (\alpha_i \Sigma B_j + \beta_i \Sigma C_j) + (1-p) \gamma_i \Sigma D_j] \\
 &= p [(\alpha_i \Sigma B_j + r_i \alpha_i \Sigma B_j) + (\beta_i \Sigma C_j + r_i \beta_i \Sigma C_j)] + (1-p) (\gamma_i \Sigma D_j + r_i \gamma_i \Sigma D_j) \\
 &= p [(\alpha_i + r_i \alpha_i) \Sigma B_j + (\beta_i + r_i \beta_i) \Sigma C_j] + (1-p) (\gamma_i + r_i \gamma_i) \Sigma D_j
 \end{aligned}$$

Ce qui implique:

$$\begin{aligned}
 \alpha_{i+1} &= \alpha_i + r_i \alpha_i \\
 \text{ou } \beta_{i+1} &= \beta_i + r_i \beta_i \\
 \text{ou } \gamma_{i+1} &= \gamma_i + r_i \gamma_i
 \end{aligned}$$

De la même manière, dans le cas d'une correction de la valeur de l'utilité,

$$\begin{aligned}
 \alpha_{i+1} &= \alpha_i - r_i \alpha_i \\
 \text{ou } \beta_{i+1} &= \beta_i - r_i \beta_i \\
 \text{ou } \gamma_{i+1} &= \gamma_i - r_i \gamma_i
 \end{aligned}$$

Avec $r_i \alpha_i$, $r_i \beta_i$ et $r_i \gamma_i$ représentés dans l'organigramme respectivement par ε_{α_i} , ε_{β_i} et ε_{γ_i}

Ainsi, les erreurs sur les poids ε_{α_i} , ε_{β_i} et ε_{γ_i} décrites dans ce chapitre ne sont autre que la valeur du signal d'un renforcement r_i multiplié par les valeurs des poids α_i , β_i et γ_i .

La performance de la méthode de prédiction peut être calculée à chaque itération. Elle est traduite par son taux correct de prédiction des comportements des opérateurs. Le meilleur taux de prédiction (T) de ces comportements devrait être obtenu à la dernière itération. Il est calculé par l'équation suivante (Cf. Équation 12):

$$T = m/N$$

Avec $m \leq N$, le nombre des comportements correctement prédits,
N, le nombre des comportements prédits.

Équation 12

4. Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons présenté deux modèles de la prise de décision liée au franchissement de barrière. Le premier modèle est un modèle générique. Il intègre les éléments de la prise de décision qui sont les probabilités et les conséquences (les Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels). Il est illustré lorsque les probabilités sont connues, par le modèle linéaire suivant :

$$u(\text{FB}\backslash\text{RB}) = p (\Sigma B_j + \Sigma C_j) + (1-p) \Sigma D_j$$

Mais lorsque les probabilités ne sont pas connues, le modèle linéaire est simplifié :

$$u(\text{FB}\backslash\text{RB}) = \Sigma B_j + \Sigma C_j + \Sigma D_j$$

Le deuxième modèle est un modèle spécifique de la prise de décision. Il intègre en plus des probabilités et des conséquences :

- les poids α , β et γ associés respectivement aux conséquences Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels
- les erreurs ε_α , ε_β , ε_γ sur ces poids α , β et γ .

Ce modèle linéaire spécifique est illustré lorsque les probabilités sont connues, par l'équation suivante :

$$u(\text{FB}_{(i+1)}\backslash\text{RB}) = p[(\alpha_i + \varepsilon_{\alpha i})\Sigma B_j + (\beta_i + \varepsilon_{\beta i}) \Sigma C_j] + (1-p) (\gamma_i + \varepsilon_{\gamma i}) \Sigma D_j$$

Sinon, il est représenté par l'équation :

$$u(\text{FB}_{(i+1)}\backslash\text{RB}) = (\alpha_i + \varepsilon_{\alpha i})\Sigma B_j + (\beta_i + \varepsilon_{\beta i}) \Sigma C_j + (\gamma_i + \varepsilon_{\gamma i}) \Sigma D_j$$

L'intégration du modèle linéaire de la prise de décision liée au franchissement de barrière dans le processus d'apprentissage d'un Contrôle Itératif d'Apprentissage nous a permis de proposer une nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière. Les caractéristiques du Contrôle Itératif d'Apprentissage et la possibilité de faire varier les poids nous permettent d'affiner et d'améliorer la valeur de l'utilité espérée du franchissement de barrière. Ceci nous permet d'améliorer la performance de la méthode de prédiction des franchissements de barrière.

La nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière basée sur l'utilité espérée et sur le renforcement de l'apprentissage présente plusieurs avantages. En effet :

- elle se base sur l'analyse décisionnelle du franchissement de barrière qui est une technique simple permettant :
 - d'expliciter les différents choix qui s'offrent à l'opérateur humain,
 - de prendre en compte les conséquences de ces choix,
 - d'associer des poids à ces conséquences,
 - de prendre en compte les erreurs d'évaluation de ces poids.

- elle profite des avantages du Contrôle Itératif de l'Apprentissage qui :
 - lui permet d'améliorer sa performance à partir d'une faible base de connaissances,
 - lui offre surtout, la possibilité de s'auto-adapter pour diminuer les erreurs de prédiction,
- elle permet d'affiner les éléments du modèle linéaire de la prise de décision,
- elle peut prédire des comportements humains considérés, la plupart du temps, comme des comportements difficiles à prédire.

Afin de tester cette nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière, il est nécessaire de l'appliquer sur des systèmes Homme-machine dans lesquels des opérateurs humains sont confrontés, de manière répétitive, à des barrières susceptibles d'être franchies. Pour cette raison, le cadre de la conduite automobile semble être un domaine approprié pour tester les performances de cette nouvelle méthode. Nous aborderons dans le quatrième chapitre de ce mémoire les détails de l'application de cette nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrières à la conduite automobile.

Chapitre IV : Application de la prédiction des franchissements de barrière dans le cadre de la conduite automobile

I. Introduction

Nous avons élaboré dans le troisième chapitre deux modèles linéaires de l'utilité espérée du franchissement de barrière : un modèle générique et un modèle spécifique. Dans le premier modèle figurent les critères que l'opérateur prend en compte dans sa décision et les attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels qu'il associe à ces critères. Le deuxième modèle intègre en plus des éléments du modèle générique, les poids α , β et γ et les erreurs ε_α , ε_β et ε_γ sur les poids. L'intégration de ce modèle dans un processus d'apprentissage nous permet d'élaborer une nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière. Cette méthode se base sur la variation des erreurs associées aux poids pour affiner et améliorer la valeur de l'utilité espérée du franchissement de barrière et donc améliorer la prédiction.

Ce chapitre a pour objectif de

- valider les deux modèles linéaires (générique et spécifique),
- prédire les franchissements de barrière,
- tester l'influence du paramétrage des éléments des deux modèles linéaires sur la prédiction des franchissements de barrières.

Pour ce faire, nous avons appliqué la méthode de prédiction des franchissements de barrières à la conduite automobile.

II. Application de la méthode de prédiction à la conduite automobile

Le choix de la conduite automobile pour l'application de la méthode de prédiction des franchissements de barrières est justifié par ses caractéristiques. En effet :

- la conduite automobile est un domaine à risque qui peut mettre en jeu la sécurité des passagers et nécessite donc une étude liée à la sûreté de fonctionnement,
- l'opérateur humain est l'élément incontournable dans la boucle de régulation du système Homme-véhicule. Il peut donc être une source d'événements risqués,
- la conduite automobile est une activité régie par le code de la route. Dans l'environnement du système Homme-véhicule se trouve un grand nombre de barrières susceptibles d'être franchies par le conducteur. Ces barrières peuvent être (1) matérielles, comme les passages à niveau, (2) fonctionnelles comme les feux tricolores, (3) symboliques, comme les panneaux de limitations de vitesse ou (4) immatérielles, comme les règles du code de la route (la règle de céder la priorité à droite, par exemple),
- l'opérateur humain doit gérer plusieurs critères tels que le critère temporel, le critère lié à la charge de travail et à la sécurité.

La prise en compte et la prédiction des franchissements de barrière dans la conduite automobile peuvent s'avérer utiles parce que, d'une part, les conséquences de telles violations sur les passagers, les systèmes et l'environnement peuvent être graves et irrécupérables et d'autre part, le nombre des franchissements de barrières constatés dans le cadre de la conduite automobile est très important. A titre d'exemple et selon les statistiques du ministère de l'intérieur français [MIF, 06], le nombre d'infractions constatées en France au cours de l'an 2003 dépasse les 20 millions (Cf. Figure 38).

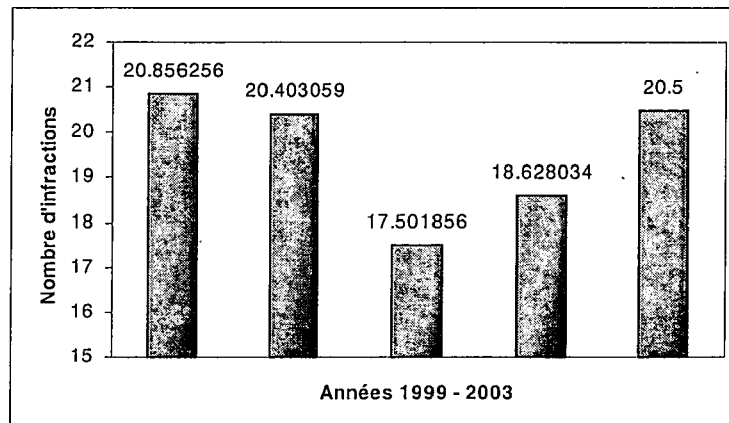


Figure 38 : Evolution du nombre d'infractions constatées par an (en Millions)

1. Les barrières étudiées

Nous voulons étudier des situations fréquentes de conduite automobile qui mettent en jeu des barrières clairement identifiées. De ce fait, nous prévoyons d'étudier la situation de Stop, la situation de priorité à droite dans les agglomérations et la situation de ligne continue sur une route nationale.

Les barrières étudiées seront donc :

- l'obligation d'arrêt dans la situation de Stop,
- donner la priorité au véhicule de droite au niveau du croisement dans la situation de priorité à droite,
- ne pas dépasser ce véhicule dans la situation de la ligne continue.

Nous présentons dans les paragraphes suivants les trois situations dans lesquelles le conducteur peut être confronté à chacune des trois barrières citées ci-dessus.

1.1 La situation de Stop

La situation de Stop se déroule en agglomération où la vitesse est limitée à 50 Km/h. Le panneau Stop se situe au niveau d'une intersection et est annoncé cinquante mètres à l'avance par un panneau annonceur. Afin d'assurer la même situation pour tous les sujets et de ne pas influencer leurs décisions par la présence d'autres véhicules, le sujet est seul sur la route c'est-à-dire qu'il n'y a aucun véhicule ni derrière, ni devant, ni à gauche du véhicule du sujet (Cf. Figure 39).

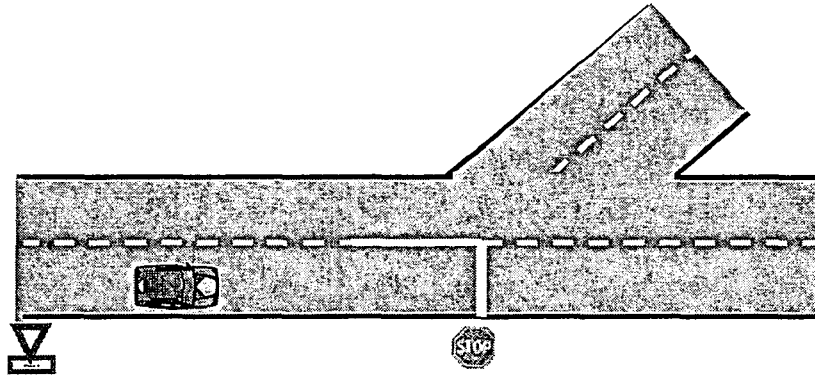


Figure 39 : La situation de Stop

1.2 La situation de priorité à droite

La situation de priorité à droite se déroule en agglomération où la vitesse est limitée à 50 Km/h. Le croisement est annoncé cinquante mètres à l'avance par un panneau annonciateur.

Afin de ne pas influencer les décisions des sujets par la présence d'autres véhicules, il n'y a aucun véhicule ni derrière, ni devant le véhicule du sujet. Cependant il y a un véhicule prioritaire sur la droite du véhicule sujet (VS) à chaque situation de priorité à droite (Cf. Figure 40).

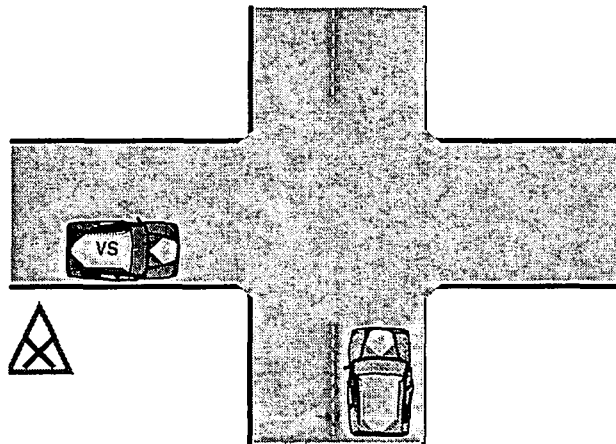


Figure 40 : La situation de priorité à droite

1.3 La situation de ligne continue

La situation de ligne continue se déroule sur une route nationale limitée à 90 km/h. La ligne continue est tracée sur la route. Devant le véhicule sujet se trouve un véhicule lent roulant à environ 40 km/h. Afin de ne pas influencer les décisions des sujets par la présence d'autres véhicules, il n'y a aucun véhicule derrière le véhicule sujet (Cf. Figure 41).

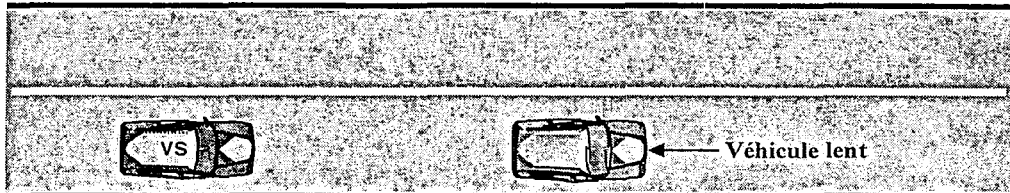


Figure 41 : La situation de ligne continue

A ce stade, nous avons défini les barrières qui seront étudiées dans l'application de la nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrières.

Afin d'étudier la faisabilité de la nouvelle méthode de prédiction, de valider les deux modèles et retenir les critères définis pour la conduite automobile, nous avons mené une campagne expérimentale avec le simulateur de conduite (SHERPA) du LAMIH. Les détails du protocole expérimental sont donnés dans les paragraphes suivants. Les critères sont abordés plus loin.

2. Le protocole expérimental:

2.1 Le simulateur de conduite :

Le simulateur de conduite SHERPA présente une cabine de conduite constituée d'un véhicule totalement instrumenté. L'environnement de la simulation est restitué par l'intermédiaire de 3 vidéos projecteurs sur 3 écrans situés à l'avant du véhicule. Ces écrans sont placés de telle manière qu'ils offrent un angle de vue de 180° au conducteur (Cf. Figure 42). Un quatrième vidéo-projecteur permet la rétro-vision latérale et centrale. Afin d'accentuer le réalisme de la conduite dans le simulateur, un générateur reproduit les bruits du moteur et le volant est doté d'un retour d'effort. Les données de tous les véhicules présents sur le circuit telles que la vitesse, la position sur la route, le régime moteur, l'état du clignotant, l'angle du volant, etc.... sont récupérées et stockées.



Figure 42 : Le simulateur de conduite

2.2 Le parcours :

Le parcours a été généré à l'aide d'une station Silicon Graphics « ONYX 1 » et du logiciel EVARISTE. Ce dernier permet de concevoir l'environnement de simulation en 3D à partir de différents gabarits de route (nationale, autoroute, bretelle d'autoroute, ...) et de primitives géométriques (droites, arcs de cercle, ...). Il permet ainsi de réaliser des tracés complexes tant en termes de courbe qu'en termes de relief et d'y intégrer des éléments dynamiques (voitures, camions, motos, ...), fonctionnels (signalisation, aire d'autoroute) et des éléments de décor (piétons, maisons, arbres, etc.).

Afin d'étudier les situations de conduite décrites précédemment, nous avons réalisé un parcours qui est composé d'agglomérations, de routes nationales et d'une autoroute. La première partie du circuit comprend une partie d'une route nationale suivie par deux agglomérations et finit par une deuxième route nationale. La deuxième partie du circuit est constituée d'une autoroute qui débute à la fin de la route nationale. La troisième partie du circuit ressemble à la première : elle est formée d'une portion de route nationale, suivie par deux agglomérations et se termine par une portion de route nationale (Cf. Figure 43).

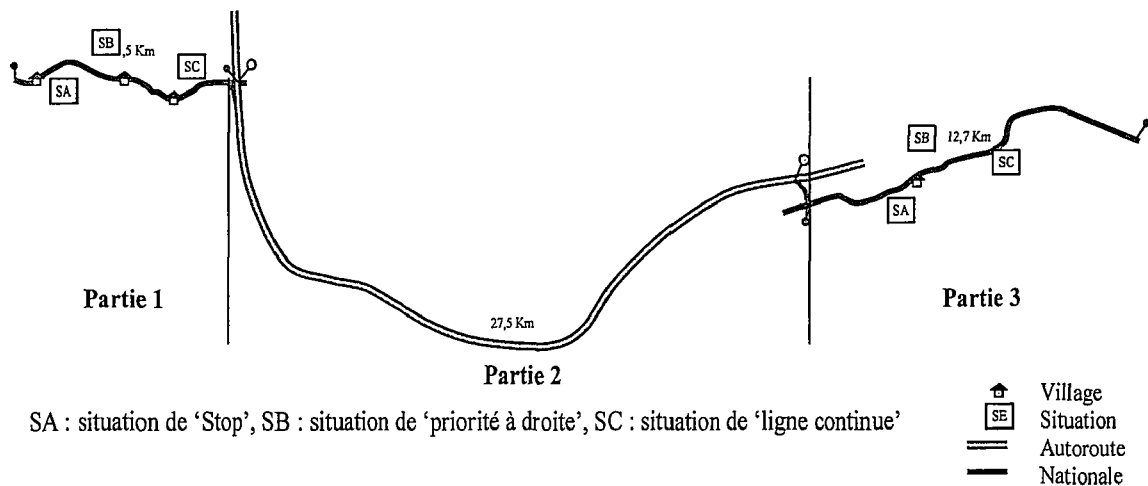


Figure 43 : Le tracé du circuit

2.3 Les scénarios

Rappelons que le modèle spécifique de la prise de décision relative au franchissement de barrière intègre des poids associés aux attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels. Ces poids peuvent traduire la subjectivité de cette prise de décision. Afin de tester l'influence de l'occurrence d'un accident (par exemple) sur l'évaluation de ces poids par les sujets, nous avons étudié deux scénarios possibles. La comparaison entre les comportements des sujets de chaque groupe vis-à-vis des barrières peut constituer une indication supplémentaire sur l'influence de l'occurrence d'un accident sur les franchissements de barrières. Cette comparaison est détaillée par la suite. Les deux scénarios sont les suivants :

- dans le premier scénario, les sujets (le groupe 1 : G1) conduisent deux fois sur le même parcours et sont mis en danger à la fin du deuxième parcours.
- Dans le deuxième scénario, les sujets (le groupe 2 : G2) conduisent deux fois et sont mis en danger à la fin du premier parcours.

L'élaboration des scénarios a été réalisée en collaboration avec l'équipe de Psychologie et ergonomie de la cognition dans les environnements technologiques [PERCOTEC] du LAMIH. Elle nous a aidés à :

- construire les questionnaires qui traduisent les besoins de l'expérimentation sans pour autant influencer les sujets,
- construire des scénarios écologiques qui se rapprochent au maximum des conditions réelles de la conduite automobile,
- collecter les données par la visualisation des vidéos des situations objets de l'expérimentation et par l'interview des sujets (la verbalisation).

Cette étude expérimentale a été réalisée dans le cadre du pôle Sciences et Technologies pour la Sécurité dans les Transports (ST2). La situation de l'accident (crash) a servi dans :

- l'étude de l'influence de l'occurrence d'un accident sur l'observation des franchissements de barrière dans le cadre du thème 4 : 'Facteurs humains : défaillances et parades' dans lequel le groupe de recherche Systèmes Homme-Machine (SHM) a été fortement impliqué,
- l'étude des positions d'évitements d'un accident dans le cadre du thème 2 : 'Approche biomécanique de la sécurité : mouvement et pré-crash'.

La mise en danger des sujets a été obtenue par la simulation d'un accident. Le décor adéquat de cet accident a été réalisé par l'équipe de BIOMECHANIQUE appartenant au thème 2 du pôle ST2. L'accident est décrit dans le paragraphe suivant.

2.4 Description de l'accident :

A la fin du parcours le sujet roulant sur une route nationale se trouve au niveau d'un virage. La voie sur laquelle il circule est délimitée par une ligne continue. La rive droite de la route est délimitée par une série d'arbres et sur la voie gauche de la route roule un véhicule lent (tracteur). Un camion qui roulait derrière le tracteur déboîte et double le tracteur en se mettant en face du véhicule sujet (Cf. Figure 44).

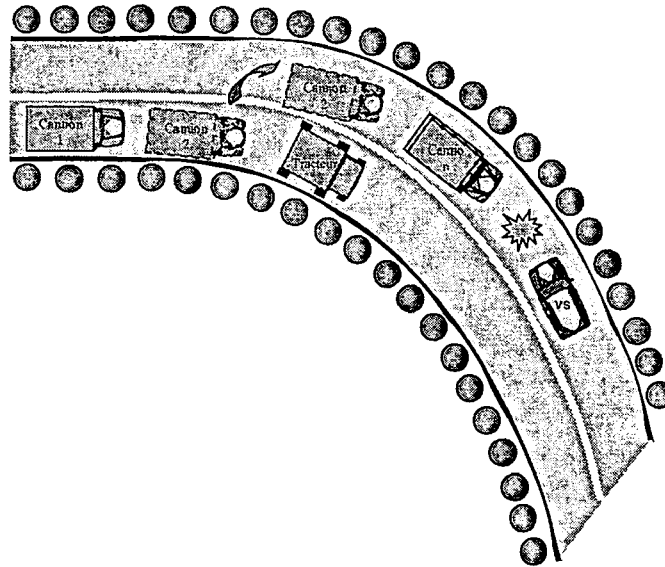


Figure 44 : Description de l'accident

Au moment de l'impact, un bloc de mousse placé au dessus du véhicule du sujet chute sur le pare-brise de la voiture pour simuler le choc avec le camion. Un klaxon est actionné en parallèle de la chute de l'objet pour stimuler les sens perceptifs du sujet et accroître le réalisme de l'accident (Cf. Figure 45).

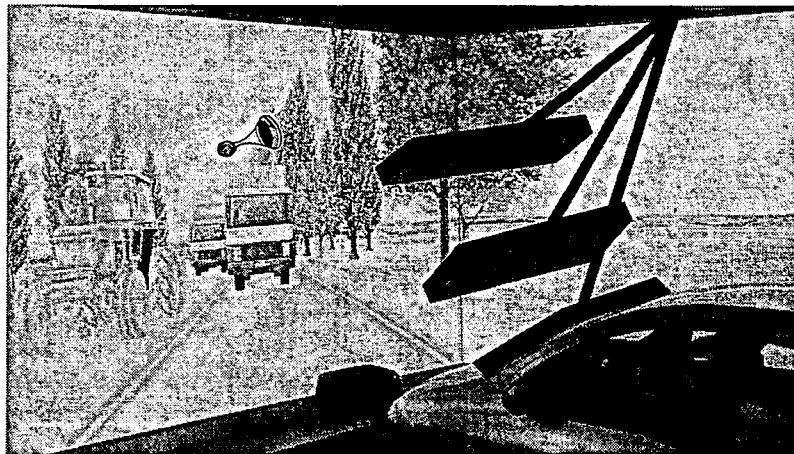


Figure 45 : Environnement du Simulateur au moment de l'accident

2.5 Déroulement de l'expérimentation

L'expérimentation présente trois étapes principales (cf. Figure 46):

- pendant la première étape les sujets répondent à un premier questionnaire (Questionnaire A) afin de recueillir des informations sur leurs caractéristiques (âge, sexe, profession, kilométrage hebdomadaire, ...) (Cf. Annexe 1) et construire les échelles subjectives de leurs charges de travail.

- La deuxième étape présente deux phases : une phase de familiarisation avec le simulateur pendant environ dix minutes et une phase de conduite qui sera analysée par la suite.
- Au cours de la troisième étape, les sujets répondent à deux questionnaires (Questionnaires B et C) afin d'évaluer les Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels (Cf. Annexe 2).

Il est important de noter que les sujets n'étaient pas informés de l'objectif de la campagne expérimentale et qu'il leur était demandé de conduire le plus naturellement possible. Durant la simulation, les sujets étaient filmés pour faciliter l'explication de leurs comportements à partir des vidéos obtenues.

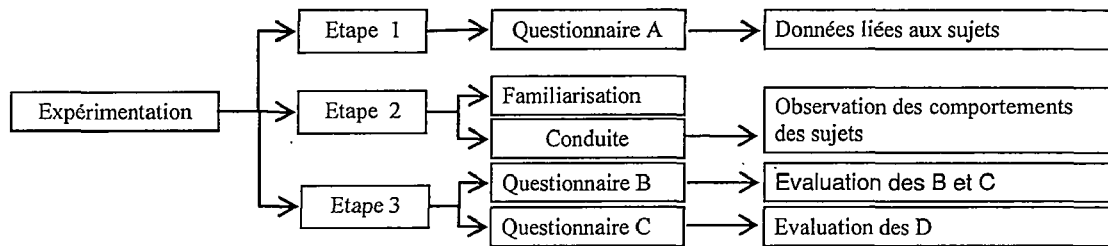


Figure 46: Différentes étapes de l'expérimentation

3. Définition des critères propres à la conduite automobile :

Dans son activité, le conducteur automobile doit respecter des contraintes, satisfaire des exigences et prendre en compte, dans ses prises de décision, certains critères tels que Sécurité, le Degré de Liberté, le Confort, le Gain de Temps et sa Charge de travail. La majorité de ces critères peut être évaluée subjectivement par les opérateurs ou calculée objectivement par des indicateurs. Nous présentons dans les paragraphes suivants ces cinq critères [CHAALI-DJELASSI & al, 05a] et [CHAALI-DJELASSI & al, 05b].

3.1 La Sécurité (S)

Généralement, un accident se produit quand l'automobile entre en collision avec un obstacle. Cet obstacle peut être mobile (autres véhicules) ou fixe (limites de la route, arbres...) (Cf. Figure 47). Le critère Sécurité dépend aussi du temps qui sépare le véhicule des éventuels points de collision. Il est déterminé par l'indicateur objectif s défini dans l'Équation 13:

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{1}{t_{aci}} \quad \text{Équation 13}$$

Où n est le nombre de collisions potentielles, t_{aci} le temps restant avant la collision i .

Plus la valeur de s augmente, plus la situation est dangereuse.

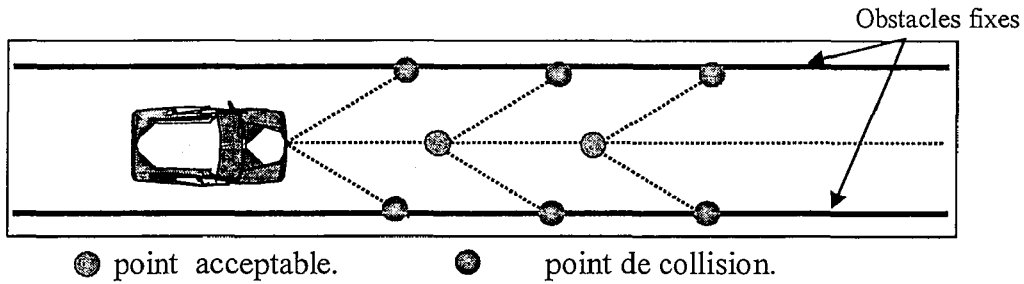


Figure 47 : Exemple de points de collision

3.2 Le Degré De Liberté (DDL)

Ce critère traduit la liberté de mouvement ou de déplacement d'un véhicule sur une route. En effet, le déplacement peut être assimilé à des points atteignables (p_a), ces derniers dépendent de la vitesse ainsi que la direction du véhicule à un instant donné. Parmi les points atteignables, nous trouvons les points de collision (p_c) et les points acceptables. Une collision peut avoir lieu avec un ou plusieurs obstacles fixes ou mobiles (Cf. Figure 47).

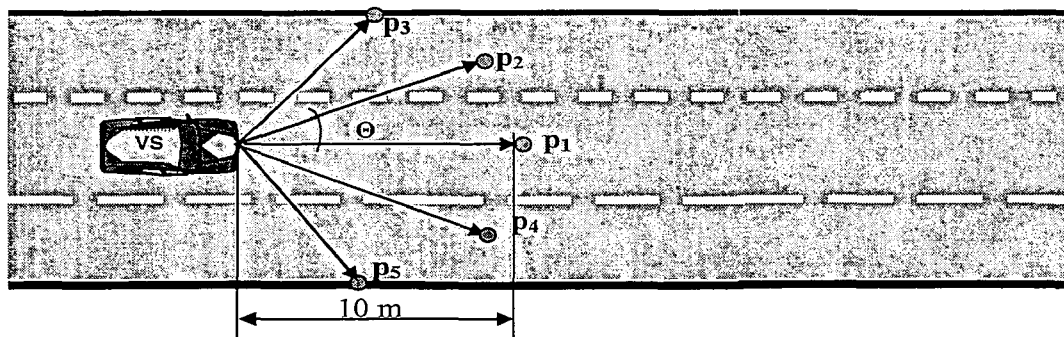
Le critère Degré De Liberté est déterminé par l'indicateur objectif ddl défini par l'Équation 14:

$$ddl = [\text{Card}(p_a) - \text{Card}(p_c)] / \text{Card}(p_a).$$

Équation 14

Avec p_a , l'ensemble des points atteignables par le véhicule.
 p_c , l'ensemble des points de collision pour le véhicule.

Afin de mieux illustrer le calcul des indicateurs des deux critères Sécurité et Degré De Liberté, nous considérons les deux exemples suivants. Dans le premier exemple, un véhicule sujet (Vs) roulant à 100 km/h se trouve tout seul au milieu d'une autoroute à trois voies. La largeur du véhicule sujet et des voies de l'autoroute sont respectivement 2 et 3.5 mètres (Cf. Figure 48).



Avec $\theta = 22.5^\circ$

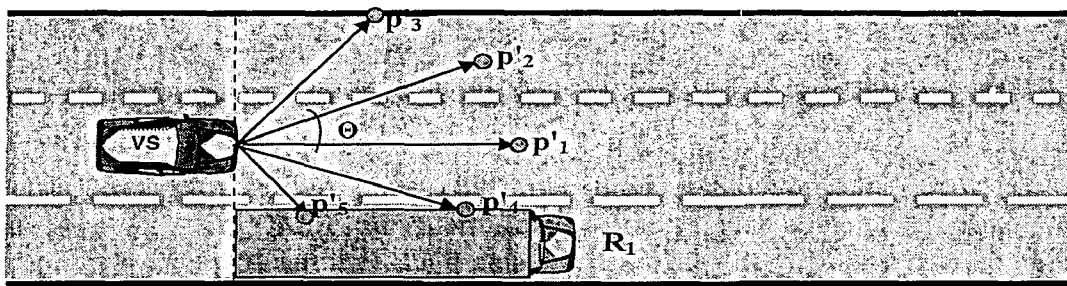
Figure 48 : Premier exemple de calcul des deux indicateurs objectifs des critères S et DDL

Nous considérons, à titre d'exemple, cinq directions possibles pouvant être suivies par le véhicule sujet. A ces cinq directions correspondent cinq points atteignables par le véhicule sujet (p_1, p_2, p_3, p_4 et p_5). Parmi ces cinq points, p_3 et p_5 sont des points dangereux puisqu'ils sont associés à deux collisions potentielles du véhicule sujet avec les deux bords de l'autoroute (des obstacles fixes). Chacune de ces deux collisions peut avoir lieu à t_3 et t_5 égaux à 0.26 seconde. Le calcul des deux indicateurs objectifs s et ddl définis respectivement par l'Équation 13 et l'Équation 14 est le suivant :

$$s = 1/t_3 + 1/t_5 = 1/0.26 + 1/0.26 = 7.69$$

$$ddl = (5-2)/5 = 0.6$$

Dans le deuxième exemple, un semi-remorque (R_1) roulant à 90 km/h est présent à droite du véhicule sujet (Cf. Figure 49).



Avec $\theta = 22.5^\circ$

Figure 49 : Deuxième exemple d'illustration des deux indicateurs objectifs des critères S et DDL

Sachant que le semi-remorque est long de 16.5 mètres et large de 3 mètres, nous déterminons cinq points (p'_1, p'_2, p'_3, p'_4 et p'_5) atteignables par le véhicule sujet. Les trois points p'_3, p'_4 et p'_5 sont des points dangereux puisqu'ils sont associés à trois collisions potentielles du véhicule sujet avec le bord gauche de l'autoroute et le semi-remorque. Les collisions potentielles associées aux trois points p'_3, p'_4 et p'_5 peuvent avoir lieu respectivement à t'_3, t'_4 et t'_5 . Les indicateurs objectifs s et ddl sont déterminés comme suivant :

$$s' = 1/t'_3 + 1/t'_4 + 1/t'_5 = 1/0.26 + 1/0.188 + 1/0.10 = 19.16$$

$$ddl' = (5-3)/5 = 0.4.$$

Avant de comparer les deux situations, rappelons que plus la valeur de s augmente, plus la situation est dangereuse.

Dans le deuxième exemple $ddl' < ddl$ et $s' > s$ ce qui décrit correctement les deux situations. En effet, dans le deuxième exemple le conducteur a moins de liberté dans ses mouvements et la situation est plus dangereuse puisque l'autoroute est plus chargée.

3.3 Le Confort (C)

Une conduite est confortable si le conducteur fait un minimum d'action ou s'il effectue des actions uniformément variées en fonction du temps. Le Confort est défini par trois indicateurs :

- a. **L'espace libre e** : l'espace libre autour du véhicule peut être limité par la présence d'autres véhicules sur la route et par l'infrastructure qui limite cette route (Cf. Figure 50). Il est calculé par l'équation suivante (Cf. Équation 15) :

$$e = (d_b + d_f) \cdot d_v + (d_g + d_d) \cdot l$$

Équation 15

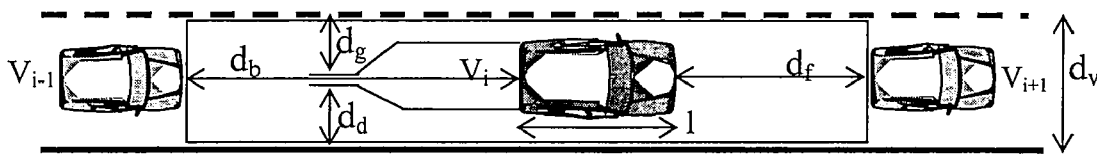


Figure 50 : Exemple d'espace

- b. **Les dérivées des positions des pédales** : les positions de pédales étudiées sont celles de la pédale du frein et de l'accélérateur.
- c. **La dérivée de l'angle du volant**

3.4 Le gain de Temps (GT)

Il est défini par l'écart entre le temps limite acceptable t_a et le temps mesuré t_m . Le temps acceptable est le temps correspondant à la distance d parcourue par le conducteur divisée par la vitesse limite v_l qui lui correspond. Le temps mesuré t_m représente le temps mis par le conducteur pour faire la même distance. Cet indicateur g_t est défini par l'équation suivante (Cf. Équation 16):

$$g_t = t_m - t_a$$

Équation 16

3.5 La charge de travail (WL)

Il existe un grand nombre de méthodes d'estimation de la charge de travail qu'il est toutefois possible de classer en quatre groupes :

- 1- les méthodes subjectives telles que l'Echelle de Cooper et Harper [COOPER, 69], la Méthode TLX (Task Load index) [HART, 88], [NASA-TLX, 86] et la méthode SWAT (Subjective Workload Assessment Technique) [O'DONNELL, 79], [SWAT USER GUIDE, 87],

- 2- les méthodes physiologiques basées sur la mesure de la fréquence cardiaque, les indicateurs du fonctionnement cérébral ou les mouvements oculaires,
- 3- les méthodes comportementales [JOHANNSEN, 79], [WIENER & al, 84], [SCHONPFLUG, 85],
- 4- les méthodes temporelles [MILLOT, 87]

La méthode que nous avons retenue pour la mesure de la charge de travail des conducteurs automobile est la méthode SWAT car elle nous permet de recueillir les données sur la charge de travail subjective du conducteur en ligne, c'est-à-dire au cours de la situation étudiée.

Toutefois, cette méthode nécessite la construction a priori de l'échelle de la charge de travail du conducteur. Cette échelle consiste à classer 27 combinaisons qui vont de la charge de travail du conducteur la moins élevée à la charge de travail la plus élevée. Ces 27 combinaisons ne sont autres que les croisements possibles des trois niveaux (c'est-à-dire bas, moyen et élevé) avec les trois facteurs (c'est-à-dire stress, concentration et temps) (Cf. Tableau 7).

Temps	Concentration	Stress
Pas de temps pour agir	Peu concentré(e)	Peu stressé(e)
Peu de temps pour agir	Moyennement concentré(e)	Moyennement stressé(e)
Beaucoup de temps pour agir	Très concentré(e)	Très stressé(e)

Tableau 7 : Adaptation de la méthode SWAT

Après la construction de l'échelle subjective de la charge de travail par le sujet, ce dernier évalue, quand c'est nécessaire, le temps dont il dispose pour accomplir sa tâche ainsi que le niveau de sa concentration et de son stress. Pour attribuer une valeur de 1/27 à 27/27 à cette combinaison, il suffit de la retrouver parmi les 27 combinaisons classées par le sujet.

Après avoir décrit le cadre de l'application de la méthode de prédiction des franchissements de barrière ainsi que le protocole expérimental, les paragraphes suivants présentent les données expérimentales et les résultats obtenus.

Nous commencerons d'abord par la description de la population qui a participé à notre expérimentation. Ensuite, nous présenterons les résultats de la prédiction des franchissements de barrière basée sur le modèle linéaire générique (Cf. Équation 3). Cette prédiction nécessite la connaissance des Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels et des probabilités qui leur sont associées et les critères auxquels ils sont attribués. Puis, nous nous intéresserons à la prédiction des franchissements de barrière basée sur le modèle linéaire spécifique (Cf. Équation 7). Afin d'étudier les poids α_i , β_i et γ_i associés aux attributs, nous étudierons l'influence de l'occurrence d'un accident sur les comportements observés des sujets. Pour explorer toutes les possibilités d'amélioration des taux de prédiction des franchissements de barrières, les valeurs des critères seront subjectivement évaluées par les sujets et objectivement calculées à partir des données du simulateur (vitesse, position du véhicule, position des pédales du frein, de l'accélérateur et de l'embrayage, angle du volant, régime moteur, ...).

4. Données expérimentales et premiers résultats

4.1 Description des sujets et de leurs comportements

La population formée par les sujets ayant participé à notre expérimentation n'est pas représentative de la population française. Il devient nécessaire de la décrire pour mieux la connaître et pour mieux comprendre les sens des pourcentages donnés par la suite.

La population qui a participé à notre campagne expérimentale est une population constituée de 44 sujets. C'est une population plutôt masculine, relativement jeune, ayant presque la totalité de ses points de permis et une bonne expérience de la conduite automobile. Elle conduit en moyenne plus de 14000 Km par an, respecte les limites de vitesse en agglomération et sur autoroute. Elle a vécu au moins une fois l'expérience d'un accident, préfère conduire sur autoroute et s'estime capable de maîtriser la conduite automobile.

Durant la campagne expérimentale, nous avons étudié 357 situations : 132 situations de Stop, 132 situations de priorité à droite et 93 situations de ligne continue. Au total, nous avons constaté 80 franchissements de barrière, soit 22.40 % (Cf. Tableau 8).

Type de la situation	Stop	Priorité à droite	Ligne continue
Nombre situations	132	132	93
Nombre de Franchissements de barrière	36	34	10
Pourcentage de Franchissement de Barrière	27.3	25.8	10.8

Tableau 8 : Nombre et pourcentage des franchissements de barrière observés

4.2 Prise en compte des critères

Nous avons retenu a priori quatre critères qui sont la Sécurité, le Confort, le Degré de Liberté et le Gain de temps pour le cadre de la conduite automobile (Cf. paragraphe 3, page 88). Afin de tester ces critères et de pouvoir les intégrer dans la prédiction des franchissements de barrière, nous nous basons sur l'étude du pourcentage de sujets ayant pris en compte ces critères dans leurs décisions. Ces pourcentages sont obtenus à partir des questionnaires B et C. Les résultats de cette étude des critères sont résumés dans la figure suivante (Cf. Figure 51).

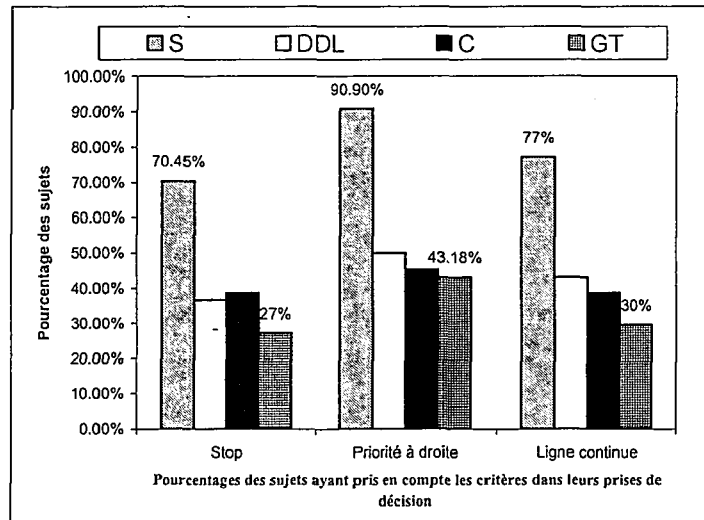


Figure 51 : Pourcentage des sujets ayant pris en compte les critères S, DDL, C et GT dans leurs décisions relatives au respect et au franchissement des barrières Stop, priorité à droite et ligne continue

La plupart des sujets ont pris en compte les quatre critères dans leurs prises de décision relatives au respect ou au franchissement de barrière. Plus de 90% des sujets ont pris en compte le critère Sécurité dans la situation de priorité à droite. Cette prise en compte peut être due à la présence du véhicule prioritaire. L'absence d'autres véhicules (prioritaires ou non) dans la situation de Stop pourrait expliquer le pourcentage plus faibles (70.45%) des sujets qui ont pris en compte le critère Sécurité.

Globalement, le fort pourcentage des sujets ayant pris en compte les quatre critères nous permettent de les retenir. Ceci nous permet de les intégrer dans la prédiction des franchissements des trois barrières Stop, priorité à droite et ligne continue. Cette prédiction peut se baser sur le modèle linéaire générique ou le modèle linéaire spécifique. Elle peut être réalisée avec les évaluations subjectives ou objectives des critères. Nous commencerons par l'étude de la prédiction des franchissements des trois barrières basée sur le modèle linéaire générique.

III. Prédiction des franchissements de barrières basée sur le modèle linéaire générique

Nous rappelons que initialement, les éléments du modèle linéaire générique sont les attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels, les critères auxquels ils sont associés, les probabilités p et $(1-p)$ et le seuil de sensibilité Δu . Faute de données, les probabilités ne sont pas intégrées dans le calcul de l'utilité espérée $u(\text{FB}\backslash\text{RB})$. Le chapitre suivant abordera des perspectives de calcul et d'intégration de ces probabilités. Nous nous baserons, ainsi, dans la prédiction des franchissements de barrière sur l'Équation 5 du chapitre III:

$$u(\text{FB}\backslash\text{RB}) = \sum B_j + \sum C_j + \sum D_j$$

1. Détermination du seuil de sensibilité Δu

Afin de prendre en compte l'influence des éléments du modèle linéaire générique sur la prédiction des franchissements de barrière, nous avons procédé à (1) la prise en compte de deux types d'évaluations des critères (objectives et subjectives) et (2) au paramétrage de la valeur du seuil Δu . Les valeurs de ce seuil de sensibilité ont été déterminées empiriquement dans un premier temps à 0 et à la moyenne des $u(\text{FB}\backslash\text{RB})$ des sujets. Ensuite, le paramétrage du seuil s'est basé sur une série de tests dont le principe était d'identifier la valeur offrant le meilleur taux de prédiction correcte. Les tests s'arrêtent dès que le taux de prédiction correcte avoisine les 90%. Cette série de tests a été appliquée aux trois barrières étudiées.

Nous présentons dans les paragraphes qui suivent les résultats de la prédiction des franchissements des trois barrières : Stop, priorité à droite et ligne continue en fonction des évaluations objectives et subjectives des critères et du seuil de sensibilité de la méthode Δu .

2. Prédiction des franchissements de la barrière de Stop

Avant de présenter les résultats, il est important de noter que le critère charge de travail n'est pas intégré dans la prédiction des franchissements de barrières basée sur le modèle générique. En effet, ce critère a été évalué seulement par les sujets car nous ne disposons pas d'outil pour le calculer objectivement. Toutefois, il est pris en compte dans la prédiction basée sur le modèle linéaire spécifique abordée dans le paragraphe IV de ce chapitre.

Les résultats de prédiction des franchissements de la barrière de Stop sont des résultats encourageants. En effet, ils peuvent atteindre plus de 94% de prédiction correcte (Cf. Figure 52).

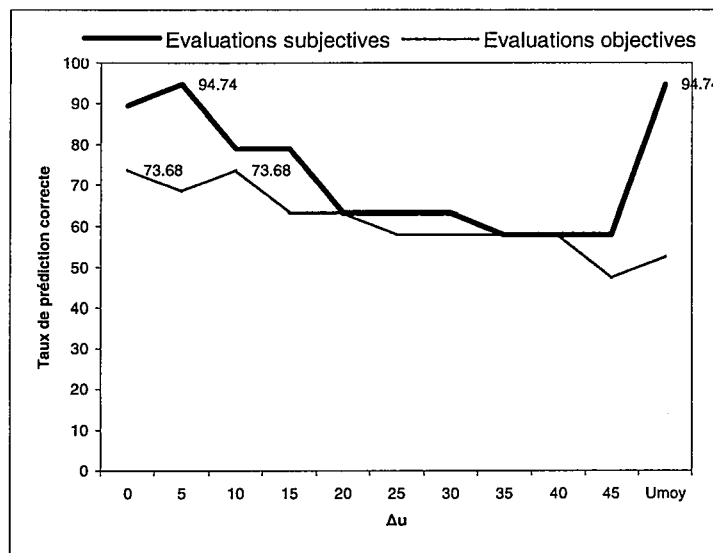


Figure 52 : prédiction des franchissements de la barrière de Stop à partir des évaluation objectives et subjectives des critères et en fonction du paramétrage du seuil Δu

Les évaluations subjectives réalisées par les sujets semblent être plus adéquates pour la prédiction des franchissements de la barrière de Stop. La figure précédente illustre aussi

l'influence du paramétrage du seuil de sensibilité Δu sur la prédiction des franchissements de barrières. En effet, le meilleur taux de prédiction correcte (94.74%) est obtenu lorsque Δu est égale à 5 ou à la moyenne des $u(\text{FB}\backslash\text{RB})$ de tous les sujets. Les meilleurs taux de prédiction correcte basée sur les évaluations objectives (73.68%) sont obtenus lorsque Δu est égal à 0 ou 10.

3. Prédiction des franchissements de la barrière de priorité à droite

Nous avons procédé au même paramétrage des éléments du modèle linéaire générique pour prédire les franchissements de la barrière de priorité à droite. Les résultats de cette prédiction sont illustrés dans la figure suivante (Cf. Figure 53).

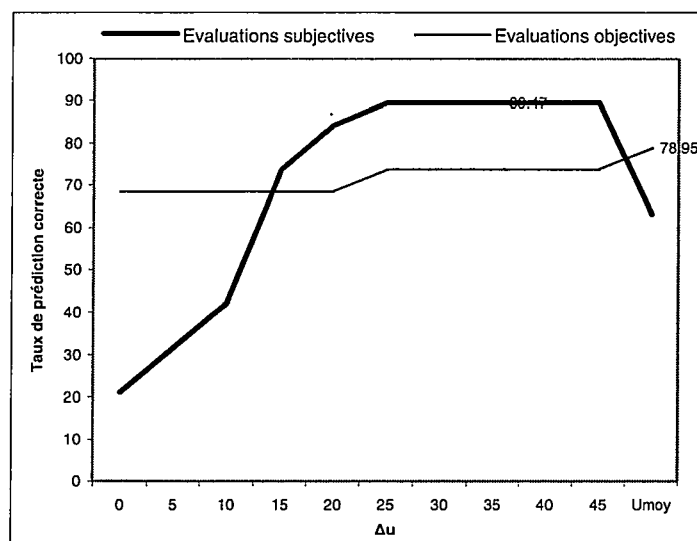


Figure 53 : prédiction des franchissements de la barrière de priorité à droite à partir des évaluations objectives et subjectives des critères et en fonction du paramétrage du seuil Δu

Les meilleurs taux de prédiction correcte des franchissements de la barrière de priorité à droite (89.5%) sont obtenus avec les évaluations subjectives des critères. Les valeurs du seuil Δu qui correspondent à ce taux sont égales à 25, 30, 35, 40 ou 45. Le meilleur taux de prédiction correcte obtenu avec les évaluations objectives des critères correspond à Δu égal à la moyenne des $u(\text{FB}\backslash\text{RB})$.

4. Prédiction des franchissements de la barrière de ligne continue

Tout comme pour la barrière de Stop et de priorité à droite, nous avons procédé à un paramétrage de la valeur du seuil Δu pour prédire les franchissements de la barrière de ligne continue.

Les meilleurs taux de prédiction correcte (100%) sont obtenus avec les évaluations subjectives des critères et correspondent à un seuil de sensibilité Δu égal à 20, 25, 30, 35, 40, 45 ou à la moyenne des $u(\text{FB}\backslash\text{RB})$ (Cf. Figure 54).

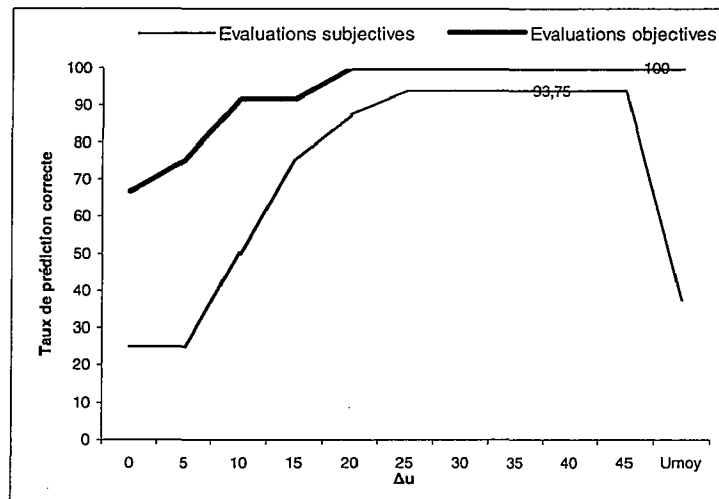


Figure 54 : prédiction des franchissements de la barrière de ligne continue à partir des évaluations objectives et subjectives des critères et en fonction du paramétrage du seuil Δu

Les résultats de prédictions des franchissements des trois barrières sont des résultats très encourageants qui atteignent avec les évaluations subjectives des critères et avec certaines valeurs de Δu les 100% de prédiction correcte. Ils nous permettent de :

- valider le modèle linéaire générique de l'utilité espérée du franchissement de barrière,
- de mettre en évidence l'influence du paramétrage du seuil de sensibilité Δu sur les taux de prédiction correcte des franchissements de barrière,
- de retenir des seuils de prédiction spécifiques aux types de barrières et en fonction du type de données (subjectives ou objectives).

Cependant, la différence entre les taux de prédiction obtenus avec les évaluations subjectives des critères et ceux obtenus avec les évaluations objectives des critères peut être due :

- à la différence qui peut exister entre la représentation qu'a le sujet de la situation dans laquelle il se trouve, de l'évaluation de ses actions et de leurs conséquences et l'évaluation de la situation à partir de données objectives relatives au véhicule et son environnement,
- au nombre de critères pris en compte dans le calcul des valeurs des utilités espérées des franchissements de barrières. En effet, puisque certains sujets n'ont pas pris en compte la totalité des critères (Cf. Figure 51), le calcul des valeurs des utilités espérées qui en découle est différent de celui basé sur les évaluations objectives et qui a donc considéré la totalité des critères.

A ce stade, nous avons étudié la possibilité de prédire les franchissements de barrière à partir du modèle linéaire générique. Le modèle linéaire spécifique est un modèle qui intègre plus d'éléments que le modèle linéaire générique (les poids α_i , β_i et γ_i et les erreurs ε_{α_i} , ε_{β_i} et ε_{γ_i} qui leur sont associées). Nous nous proposons d'identifier et de paramétrer ces éléments afin de tester leur influence sur les taux de prédiction correcte des franchissements de barrières. Le paragraphe suivant apporte plus d'éclairage sur l'identification des poids α_i , β_i et γ_i et des erreurs qui leur sont associées ε_{α_i} , ε_{β_i} et ε_{γ_i} .

IV. Prédiction des franchissements de barrières basée sur le modèle linéaire spécifique

1. Identification des éléments du modèle linéaire spécifique

1.1 Identification des poids α_i , β_i et γ_i

L'occurrence d'un accident peut influencer les évaluations des poids α_i , β_i et γ_i associés aux attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels par les sujets. Par exemple, un sujet s_1 qui a vécu un accident grave suite au franchissement d'une barrière peut accorder plus d'importance au poids (γ_1) associé aux Déficits potentiels dans ses décisions futures alors qu'un autre sujet s_2 qui a souvent réussi le franchissement de la même barrière pourrait considérer que les Déficits potentiels sont très faibles et pourrait leur attribuer un poids (γ_2) qui peut être inférieur au poids (γ_1).

Les deux scénarios (détaillés dans la page 86) ont été définis dans le but de tester l'influence de l'occurrence de l'accident sur les évaluations des poids α_i , β_i et γ_i .

Les deux groupes de sujets ont conduit deux fois sur le parcours. Cependant, le groupe 1 (G1) a été mis en danger à la fin du deuxième parcours et le groupe 2 (G2) a été mis en danger à la fin du premier parcours. La comparaison entre les comportements des deux groupes sur les deux parcours nous permet d'étudier l'influence de l'accident sur les poids α_i , β_i et γ_i associés aux attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels. La différence entre les pourcentages des franchissements de barrières observés pour les deux groupes sur les deux parcours est présentée dans le tableau suivant (Cf. Tableau 9).

G1			G2		
Parcours 1	Parcours 2		Parcours 1	Parcours 2	
Stop1	Stop3	Différence	Stop1	Stop3	Différence
27.3%	18.2%	-9.1%	27.3%	36.4%	9.1%
Stop2	Stop4		Stop2	Stop4	
36.4%	45.5%	9.1%	27.3%	54.5%	27.3%
Droite1	Droite3		Droite1	Droite3	
27.3%	36.4%	9.1%	54.5%	18.2%	-36.4%
Droite2	Droite4		Droite2	Droite4	
18.2%	0.0%	-18.2%	36.4%	27.3%	-9.1%
Ligne1	Ligne3		Ligne1	Ligne3	
10.0%	10.0%	0.0%	20.0%	10.0%	-10.0%

Tableau 9 : Influence de l'occurrence d'un accident sur l'observation des franchissements de barrière

La comparaison entre les comportements observés des deux groupes sur les deux parcours nous permet de constater que :

- le pourcentage des franchissements de la barrière Stop n'a pas changé pour le groupe G1. Cependant, il a considérablement augmenté pour le groupe G2 (36.4%).
- Le pourcentage des franchissements de la barrière priorité à droite a diminué pour le groupe G1 (-9.1%) et a fortement diminué pour le groupe G2 (-45.5%).
- Le pourcentage des franchissements de la barrière ligne continue a diminué pour le groupe G1 (9.1%) et a considérablement diminué pour le groupe G2 (-29.1%).

L'augmentation des franchissements de la barrière Stop par le groupe G2 peut être expliquée par l'absence de perception du danger. En effet, les véhicules sujets étaient seuls sur la route. Ils pouvaient donc se sentir en sécurité lorsqu'ils comparaient la situation dans laquelle ils se trouvaient (c'est-à-dire la situation de Stop) à celle qui avait engendré l'accident. Cette hypothèse peut être renforcée lorsqu'on compare les franchissements de la barrière Stop par le groupe G1. En effet, puisque la perception du danger par ce groupe n'a pas changé entre les deux parcours (parce que l'accident a eu lieu à la fin du deuxième parcours), leurs comportements n'ont pas changé.

La diminution importante des franchissements des deux barrières priorité à droite et ligne continue peut être expliquée par la présence d'un autre véhicule dans les deux situations. En effet, d'une part, dans la situation de priorité à droite un véhicule prioritaire est présent dans le croisement. D'autre part, la situation de la ligne continue peut rappeler la situation dans laquelle l'accident a eu lieu. Le danger (et par conséquent les Déficit potentiels) peut être d'avantage perçu par les sujets.

Il semble alors que l'accident a influencé la prise de décision de franchir les barrières à travers la perception de la sécurité et du danger. Ceci nous permet d'attribuer des poids γ_i faibles aux Déficit potentiels dans la prédiction des franchissements de la barrière de Stop et des poids γ_i élevés aux Déficit potentiels dans la prédiction des deux barrières priorité à droite et ligne continue. Les poids α_i et β_i peuvent ne pas varier en fonction du type de la barrière étudiée.

Après avoir étudié la variation des poids α_i , β_i et γ_i en fonction du type de barrière et de l'occurrence d'un accident, nous pouvons présenter le principe de l'identification des erreurs ε_{α_i} , ε_{β_i} et ε_{γ_i} associées à ces poids. L'identification de ces erreurs ε_{α_i} , ε_{β_i} et ε_{γ_i} est abordée dans le paragraphe suivant.

1.2 Identification des erreurs sur les poids ε_{α_i} , ε_{β_i} et ε_{γ_i}

L'intégration des erreurs ε_{α_i} , ε_{β_i} et ε_{γ_i} sur les poids α_i , β_i et γ_i dans le modèle linéaire spécifique a pour but d'affiner la valeur de l'utilité espérée du franchissement de barrière à travers la correction ou le maintien des poids α_i , β_i et γ_i associés aux attributs Bénéfices, Coûts et Déficit potentiels dans l'Équation 11 :

$$u(\text{FB}_{(i+1)} \setminus \text{RB}) = (\alpha_i + \varepsilon_{\alpha_i}) \Sigma B_j + (\beta_i + \varepsilon_{\beta_i}) \Sigma C_j + (\gamma_i + \varepsilon_{\gamma_i}) \Sigma D_j$$

L'identification de ces erreurs se base essentiellement sur la comparaison entre les comportements prédits et les comportements observés des sujets. Lorsque le comportement prédit (CP_i) est identique à celui observé (CO_i), nous renforçons la valeur de l'utilité espérée $u(\text{FB}_i \setminus \text{RB})$ qui lui correspond. Ce renforcement est obtenu par l'augmentation de la valeur absolue de $u(\text{FB}_i \setminus \text{RB})$. Dans ce cas, $\alpha_{(i+1)} = \alpha_i + \varepsilon_{\alpha_i}$, $\beta_{(i+1)} = \beta_i + \varepsilon_{\beta_i}$ et $\gamma_{(i+1)} = \gamma_i + \varepsilon_{\gamma_i}$. Si le comportement prédit (CP_i) est différent du comportement observé, nous corrigeons la valeur de l'utilité espérée $u(\text{FB}_i \setminus \text{RB})$ qui lui correspond. Cette correction est obtenue par la diminution de la valeur absolue de $u(\text{FB}_i \setminus \text{RB})$. Dans ce cas, $\alpha_{(i+1)} = \alpha_i - \varepsilon_{\alpha_i}$; $\beta_{(i+1)} = \beta_i - \varepsilon_{\beta_i}$ et $\gamma_{(i+1)} = \gamma_i - \varepsilon_{\gamma_i}$. Avec ε_{α_i} , ε_{β_i} et $\varepsilon_{\gamma_i} > 0$.



Afin de ne pas trop modifier les valeurs des utilités espérées des franchissements de barrière, nous considérons que $\varepsilon_{\alpha i}$, $\varepsilon_{\beta i}$ et $\varepsilon_{\gamma i}$ sont inférieures à 1. Dans notre cadre, nous associons quatre valeurs à ces erreurs. Ces valeurs sont 0, 0.25, 0.5 ou 0.75. Le tableau suivant présente un exemple d'identification des erreurs $\varepsilon_{\alpha i}$, $\varepsilon_{\beta i}$ et $\varepsilon_{\gamma i}$ en fonction de la valeur de l'utilité espérée du franchissement de barrières $u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})$ et des comportements observés des sujets (Cf. Tableau 10).

	$u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB}) \leq \Delta u$		$u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB}) > \Delta u$	
CO	Valeur ($\varepsilon_{\alpha 1}$, $\varepsilon_{\beta 1}$, $\varepsilon_{\gamma 1}$)	Valeur ($\varepsilon_{\alpha k}$, $\varepsilon_{\beta k}$, $\varepsilon_{\gamma k}$)	Valeur ($\varepsilon_{\alpha 1}$, $\varepsilon_{\beta 1}$, $\varepsilon_{\gamma 1}$)	Valeur ($\varepsilon_{\alpha k}$, $\varepsilon_{\beta k}$, $\varepsilon_{\gamma k}$)
RB	(0.25, 0.25, 0.25)	(0.25, 0.25, 0.25)	(-0.25, -0.25, -0.25)	(0.25, 0.25, 0.25)
FB	(-0.25, -0.25, -0.25)	(0.25, 0.25, 0.25)	(0.25, 0.25, 0.25)	(0.25, 0.25, 0.25)

Avec $2 \leq k \leq n$, n = le nombre d'itérations

Tableau 10 : Exemple d'identification des valeurs des erreurs sur les poids en fonction du comportement observé et de Δu

Après avoir illustré l'identification des α_i , β_i et γ_i et des erreurs $\varepsilon_{\alpha i}$, $\varepsilon_{\beta i}$ et $\varepsilon_{\gamma i}$ qui leurs sont associées, nous pouvons présenter la démarche du calcul de la valeur initiale de l'utilité espérée du franchissement de barrière $u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})$.

1.3 Le calcul de $u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})$:

Le tableau précédent présente un exemple d'identification des erreurs $\varepsilon_{\alpha i}$, $\varepsilon_{\beta i}$ et $\varepsilon_{\gamma i}$ pour calculer l'utilité espérée du franchissement de barrière mais ne décrit pas comment calculer la valeur initiale de cette utilité. Afin d'intégrer les poids α_0 , β_0 et les erreurs $\varepsilon_{\alpha 0}$, $\varepsilon_{\beta 0}$ et $\varepsilon_{\gamma 0}$ qui leur sont associées dans le calcul de l'utilité espérée initiale $u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})$, sans influencer sa valeur, nous leur attribuons des valeurs neutres c'est-à-dire : $\alpha_0 = \beta_0 = 1$ et $\varepsilon_{\alpha 0} = \varepsilon_{\beta 0} = \varepsilon_{\gamma 0} = 0$.

Cependant, en conclusion de la démarche de l'identification de α_i , β_i et γ_i abordée ci-dessus, les valeurs des poids γ_0 associés aux Déficit potentiels seront neutres ($\gamma_0 = 1$) pour les sujets du groupe G1 et cinq fois plus importantes ($\gamma_0 = 5$) pour le groupe G2. La valeur 5 est une valeur empirique.

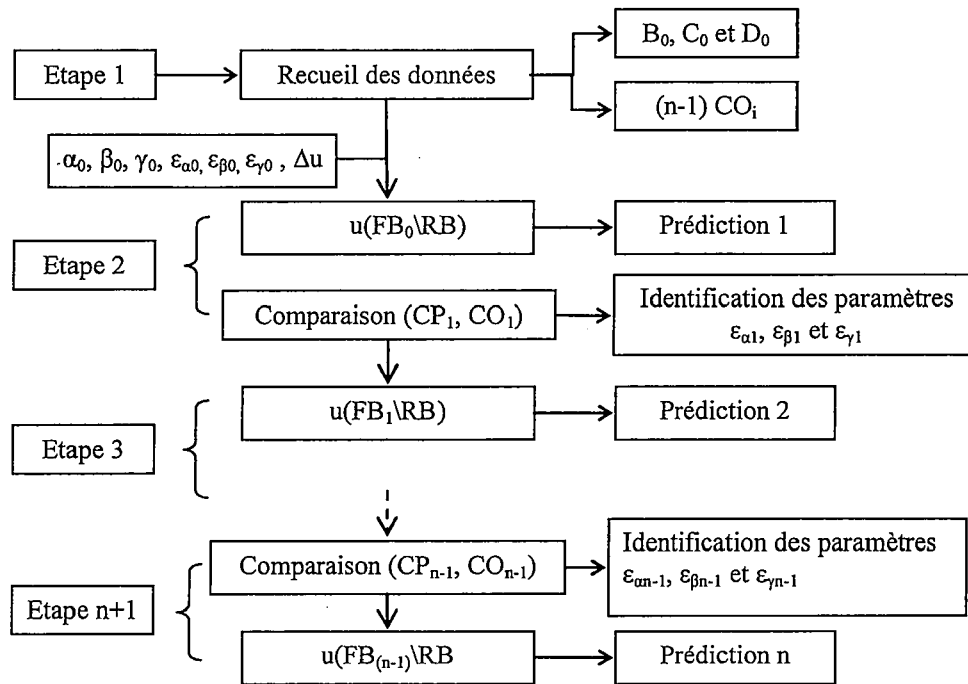
Ainsi, nous obtenons :

$$u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB}) = (\alpha_0 + \varepsilon_{\alpha 0}) \Sigma B_j + (\beta_0 + \varepsilon_{\beta 0}) \Sigma C_j + (\gamma_0 + \varepsilon_{\gamma 0}) \Sigma D_j = \Sigma B_j + \Sigma C_j + \Sigma D_j \text{ pour le groupe G1.}$$

$$u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB}) = (\alpha_0 + \varepsilon_{\alpha 0}) \Sigma B_j + (\beta_0 + \varepsilon_{\beta 0}) \Sigma C_j + (\gamma_0 + \varepsilon_{\gamma 0}) \Sigma D_j = \Sigma B_j + \Sigma C_j + 5 \Sigma D_j \text{ pour le groupe G2.}$$

Le calcul de $u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})$ constitue la première étape de la prédiction des franchissements de barrière basée sur le modèle linéaire spécifique.

Afin de présenter les résultats de prédiction des franchissements des trois barrières Stop, priorité à droite et ligne continue, nous rappelons que les différentes étapes de la méthode de prédiction des franchissements de barrière sont les suivantes (Cf. Figure 55):



Avec CO_i : le Comportement Observé du sujet,
 CP_i : le Comportement Prédit
 n : le nombre d'itérations

Figure 55 : Différentes étapes de la méthode de prédiction

A chaque étape, il faut paramétrer les erreurs ϵ_{α_i} , ϵ_{β_i} et ϵ_{γ_i} , calculer les valeurs des utilités espérées de franchissements de barrières qui leur correspondent et comparer les comportements prédits CP_i à ceux observés CO_i .

Nous présentons dans ce qui suit les résultats de prédiction des franchissements des barrières Stop, priorité à droite et ligne continue.

2. Prédiction des franchissements de la barrière Stop

Afin d'étudier l'influence du paramétrage du modèle linéaire spécifique sur les taux de prédiction correcte, nous avons commencé par faire varier les valeurs des erreurs ϵ_{α_i} , ϵ_{β_i} et ϵ_{γ_i} en leur associant 21 combinaisons détaillées dans le Tableau 11. Ensuite nous avons calculé les valeurs des utilités espérées $u(FB_i \setminus RB)$ qui leur correspondent. Puis, nous avons prédit les comportements des sujets face à la barrière Stop. Enfin, nous avons calculé les taux de prédiction correcte (T). Le Tableau 11 résume l'ensemble des combinaisons des erreurs ϵ_{α_i} , ϵ_{β_i} et ϵ_{γ_i} avec lesquelles nous avons travaillé.

$(\epsilon_{\alpha i} \epsilon_{\beta i} \epsilon_{\gamma i})$	N° Combinaison
$(\pm 0.25, \pm 0.25, \pm 0.25)$	Q1
$(\pm 0.25, 0, 0)$	Q2
$(0, \pm 0.25, 0)$	Q3
$(0, 0, \pm 0.25)$	Q4
$(\pm 0.25, \pm 0.25, 0)$	Q5
$(\pm 0.25, 0, \pm 0.25)$	Q6
$(0, \pm 0.25, \pm 0.25)$	Q7
$(\pm 0.5, \pm 0.5, \pm 0.5)$	Q8
$(\pm 0.5, 0, 0)$	Q9
$(0, \pm 0.5, 0)$	Q10
$(0, 0, \pm 0.5)$	Q11
$(\pm 0.5, \pm 0.5, 0)$	Q12
$(\pm 0.5, 0, \pm 0.5)$	Q13
$(0, \pm 0.5, \pm 0.5)$	Q14
$(\pm 0.75, \pm 0.75, \pm 0.75)$	Q15
$(\pm 0.75, 0, 0)$	Q16
$(0, \pm 0.75, 0)$	Q17
$(0, 0, \pm 0.75)$	Q18
$(\pm 0.75, \pm 0.75, 0)$	Q19
$(\pm 0.75, 0, \pm 0.75)$	Q20
$(0, \pm 0.75, \pm 0.75)$	Q21

Tableau 11 : Exemple de 21 combinaisons associées à $\epsilon_{\alpha i}$, $\epsilon_{\beta i}$ et $\epsilon_{\gamma i}$

Il est important de noter que la prédiction des franchissements de barrière basée sur le modèle linéaire spécifique intègre seulement les évaluations subjectives des critères. Le critère charge de travail (WL) est donc pris en compte dans le calcul de l'utilité espérée du franchissement des trois barrières.

Les résultats de prédiction des franchissements de la barrière Stop basée sur le modèle linéaire spécifique sont résumés dans la Figure 56. Ils nous permettent de constater que :

- il est possible de prédire les franchissements de la barrière Stop à partir du modèle linéaire spécifique,
- nous pouvons atteindre des taux de prédiction correcte qui dépassent 94%,
- la variation des valeurs des erreurs $\epsilon_{\alpha i}$, $\epsilon_{\beta i}$ et $\epsilon_{\gamma i}$ nous permet d'améliorer les taux de prédiction correcte des franchissements de la barrière Stop.

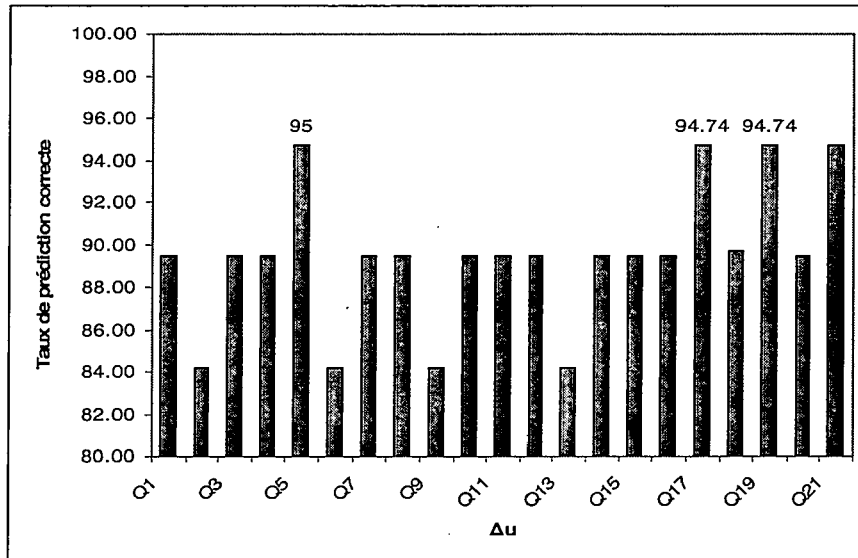


Figure 56 : Taux de prédiction correcte des franchissements de la barrière de Stop pour différentes combinaisons ($\epsilon\alpha$, $\epsilon\beta$, $\epsilon\gamma$) et $\Delta u = 0$

Les combinaisons qui correspondent aux meilleurs taux de prédiction sont Q₅, Q₁₇, Q₁₉ et Q₂₁. Ces combinaisons pondèrent le plus souvent les Bénéfices et les Coûts. Ceci peut être expliqué par la recherche des Bénéfices par les sujets qui motive les franchissements de la barrière Stop. Selon la Figure 51, ces Bénéfices peuvent être attribués le plus souvent au critère Sécurité. Puisque les Coûts sont investis pour atteindre les Bénéfices, il est logique de constater leur pondération en mêmes temps que ces Bénéfices. Enfin, les valeurs de combinaisons sont en majorité les valeurs les plus importantes (± 0.75), ceci peut montrer l'importance des Bénéfices recherchés par les sujets lorsqu'ils franchissent la barrière Stop.

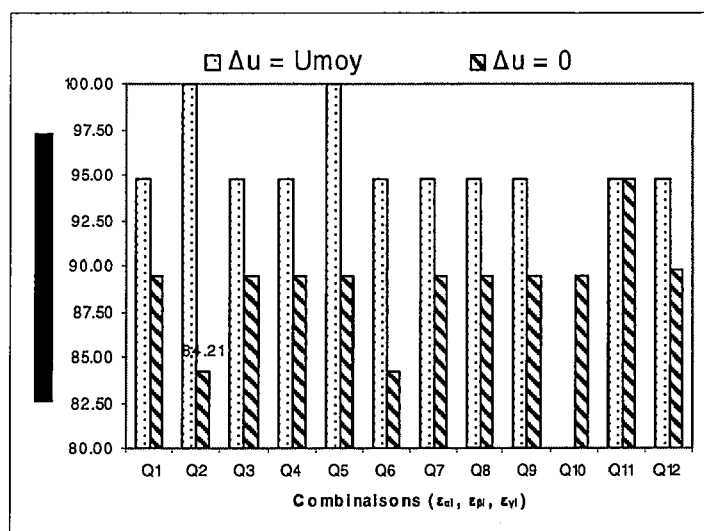


Figure 57 : Influence du paramétrage de Δu sur les taux de prédiction correcte des franchissements de la barrière de Stop ($\Delta u = 0$ et $\Delta u = u(FB_0 \setminus RB)_{moy}$)

Le paramétrage de la valeur du seuil Δu s'avère également bénéfique pour l'amélioration des taux de prédiction correcte. En effet, lorsque $\Delta u = u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})_{\text{moy}}$, nous pouvons atteindre le meilleur taux de prédiction correcte (100%) (Cf. Figure 57).

La valeur moyenne des $u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})$ peut être admise comme le meilleur seuil de sensibilité de la méthode de prédiction des franchissements de la barrière de Stop.

3. Prédiction des franchissements de la barrière priorité à droite

Tout comme pour la prédiction des franchissements de la barrière Stop, la démarche de prédiction des franchissements de la barrière priorité à droite intègre (1) l'identification des erreurs $\varepsilon_{\alpha i}$, $\varepsilon_{\beta i}$ et $\varepsilon_{\gamma i}$ et le paramétrage du seuil Δu . Les résultats de cette prédiction sont illustrés dans la Figure 58 et la Figure 59.

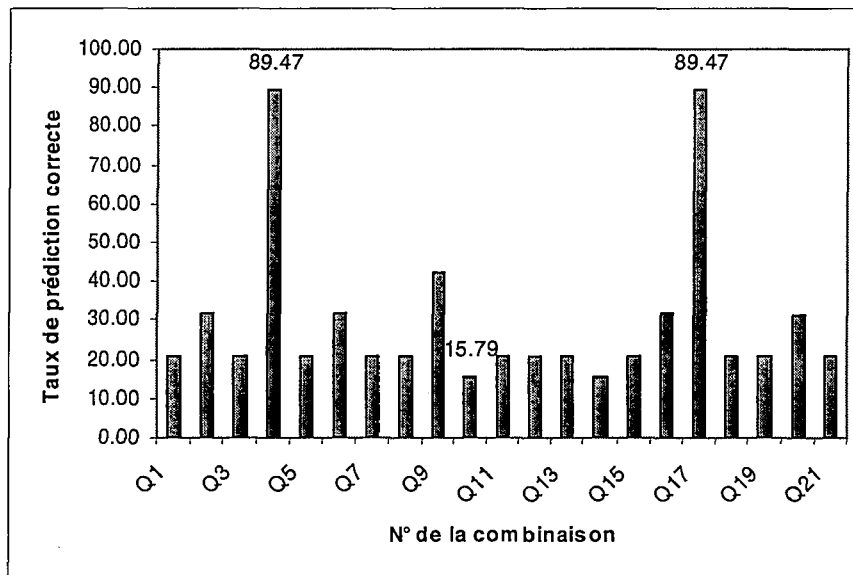


Figure 58 : Taux de prédiction correcte des franchissements de la barrière priorité à droite pour les 21 combinaisons (ε_{α} , ε_{β} , ε_{γ}) et $\Delta u = 0$

La variation des erreurs $\varepsilon_{\alpha i}$, $\varepsilon_{\beta i}$ et $\varepsilon_{\gamma i}$ améliore les taux de prédiction correcte des franchissements de la barrière priorité à droite. Ces taux peuvent atteindre 89.47%.

Les combinaisons qui correspondent aux meilleurs taux de prédiction correcte des franchissements de la barrière priorité à droite sont Q4 et Q17. Elles pondèrent les Coûts et les Déficit potentiels. Selon la Figure 51, ces Coûts et Déficit sont attribués le plus souvent au critère Sécurité. Ceci peut être expliqué par la prise en compte par les sujets des conséquences négatives qui peuvent avoir lieu lorsqu'ils franchissaient la barrière surtout en présence du véhicule prioritaire.

Le paramétrage de la valeur du seuil Δu apporte une amélioration aux taux de prédiction correcte. En effet, lorsque $\Delta u = u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})_{\text{moy}}$, nous pouvons atteindre un taux de prédiction correcte qui dépasse les 94% (Cf. Figure 59).

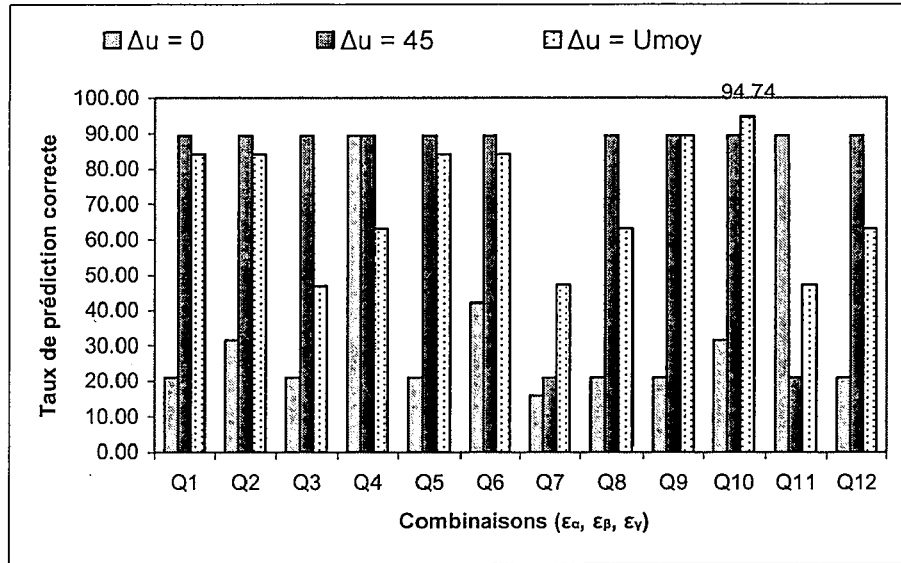


Figure 59 : Influence du paramétrage de Δu sur les taux de prédiction correcte des franchissements de la barrière de priorité à droite ($\Delta u = 0$, $\Delta u = 45$ et $\Delta u = u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})_{\text{moy}}$)

Les résultats du paramétrage du seuil Δu permettent aussi d'admettre la valeur de $u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})_{\text{moy}}$ comme le meilleur seuil de sensibilité de la méthode de prédiction des franchissements de la barrière de priorité à droite.

4. Prédictions des franchissements de la barrière de ligne continue

Tout comme pour les barrières Stop et priorité à droite, la prédiction des franchissements de la barrière de ligne continue est sensible aux valeurs des erreurs $\varepsilon_{\alpha i}$, $\varepsilon_{\beta i}$ et $\varepsilon_{\gamma i}$ (Cf. Figure 60).

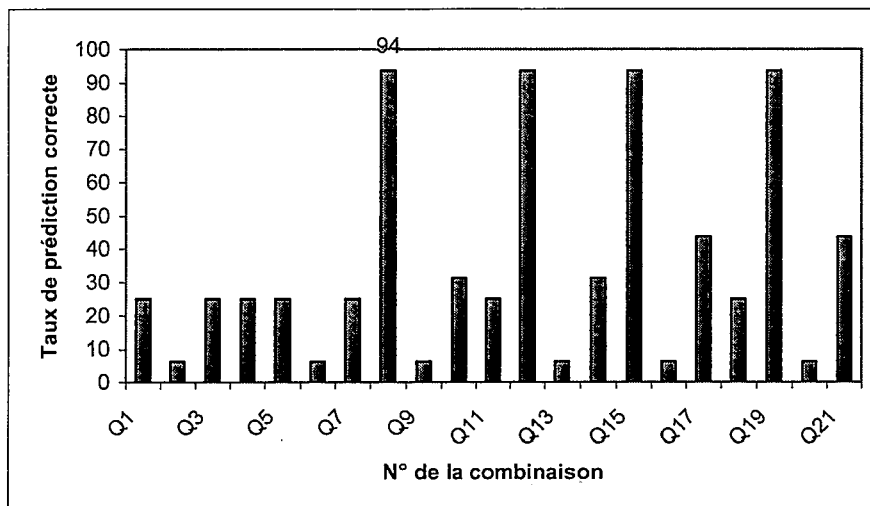


Figure 60 : Taux de prédiction correcte des franchissements de la barrière de ligne continue pour les 21 combinaisons (ε_{α} , ε_{β} , ε_{γ}) et $\Delta u = 0$

Les combinaisons qui correspondent aux meilleurs taux de prédiction de barrière ligne continue sont Q₈, Q₁₂, Q₁₅ et Q₁₉. Il s'agit de combinaisons pour lesquelles les poids sont importants (± 0.5 et ± 0.75) et qui concernent généralement les Bénéfices en Sécurité (Cf. Figure 51) qui motivent le franchissement de la barrière. Les combinaisons Q₈ et Q₁₅ pondèrent les Déficits potentiels. Globalement les sujets qui avaient associé ces poids importants aux Déficits potentiels appartiennent au groupe G2. Ceci peut s'expliquer par l'influence de l'occurrence d'un accident sur l'évaluation des Déficits potentiels (γ_i).

Le paramétrage de la valeur du seuil Δu apporte une amélioration aux taux de prédiction correcte des franchissements de la barrière ligne continue (Cf. Figure 61). Les meilleurs taux de prédiction correcte (94%) sont obtenus lorsque Δu est égale à 45 ou à $u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})_{\text{moy}}$.

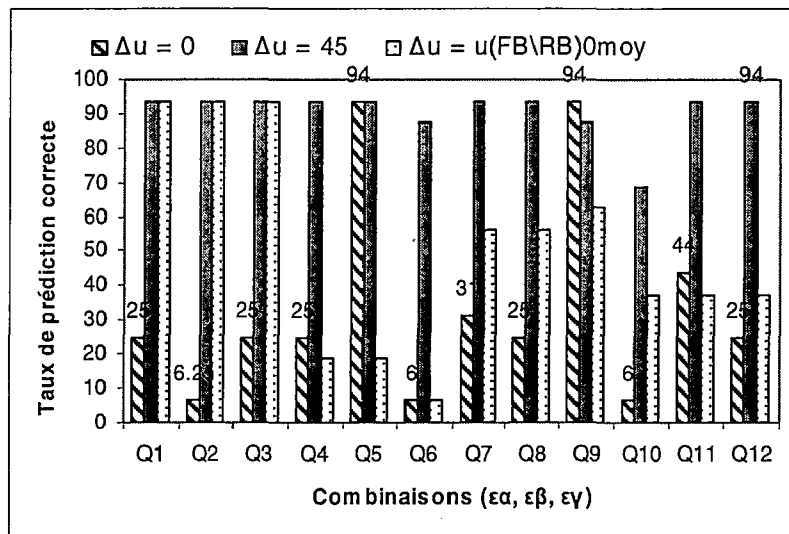


Figure 61 : Influence du paramétrage de Δu sur les taux de prédiction correcte des franchissements de la barrière de ligne continue ($\Delta u = 0$, $\Delta u = 45$ et $\Delta u = u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})_{\text{moy}}$)

Ces résultats nous permettent de considérer la moyenne $u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})_{\text{moy}}$ comme étant le seuil de sensibilité de la méthode qui nous permet d'obtenir les meilleurs taux de prédiction des franchissements de la barrière ligne continue.

5. Discussion

L'application de la méthode de prédiction des franchissements de barrière basée sur l'utilité espérée et sur le renforcement de l'apprentissage à la conduite automobile donne des résultats intéressants pour les trois types de barrières étudiés : Stop, priorité à droite et ligne continue.

Cette méthode de prédiction s'est basée sur deux modèles linéaires de la prise de décision relative au franchissement de barrière. Ses résultats atteignent 100% de prédiction correcte pour certaines combinaisons des erreurs ε_{α_i} , ε_{β_j} et ε_{γ_i} et du seuil Δu .

5.1 Sensibilité des taux de prédiction correcte aux éléments du modèle linéaire générique

La première partie de la prédiction a été réalisée avec le modèle linéaire générique qui intègre les critères, les attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels qui leurs sont associés et le seuil de sensibilité Δu . L'utilité espérée du franchissement de barrière qui lui correspond est illustrée par l'Équation 5 :

$$u(\text{FB}\backslash\text{RB}) = \Sigma B_j + \Sigma C_j + \Sigma D_j$$

Le tableau suivant résume les meilleurs taux de prédiction des franchissements des trois barrières (stop, priorité à droite et ligne continue) à partir du modèle linéaire générique. Il présente aussi la nature des évaluations et les différentes valeurs du seuil de sensibilité Δu qui permettent de les obtenir (Cf. Tableau 12).

	Stop	Priorité à droite	Ligne continue
Meilleurs taux	94.74%	89.5%	94.47%
Evaluation des critères	subjective	subjective	subjective
Valeur de Δu	5, $u(\text{FB}_0\backslash\text{RB})_{\text{moy}}$	25, 30, 35, 40, 45	20, 25, 30, 35, 40, 45, $u(\text{FB}_0\backslash\text{RB})_{\text{moy}}$

Tableau 12 : Les meilleurs taux de prédiction correcte et les éléments du modèle linéaire générique qui leur correspondent

Le paramétrage des éléments du modèle générique apporte une amélioration aux taux de prédiction correcte des franchissements des trois barrières. En effet, la méthode de prédiction est sensible à la nature des évaluations des critères (objectives ou subjectives) et à la valeur du seuil Δu . Les résultats de cette prédiction sont encourageants : ils peuvent atteindre les 100% de prédiction correcte.

5.2 Sensibilité des taux de prédiction correcte aux éléments du modèle linéaire spécifique

La deuxième partie de prédiction a été réalisée avec le modèle linéaire spécifique qui intègre les critères, les attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels qui leurs sont associés, les poids α_i , β_i et γ_i , les erreurs ε_{α_i} , ε_{β_i} et ε_{γ_i} et le seuil de sensibilité Δu .

L'utilité espérée du franchissement de barrière qui lui correspond est illustrée par l'Équation 11 :

$$u(\text{FB}_{(i+1)}\backslash\text{RB}) = (\alpha_i + \varepsilon_{\alpha_i}) \Sigma B_j + (\beta_i + \varepsilon_{\beta_i}) \Sigma C_j + (\gamma_i + \varepsilon_{\gamma_i}) \Sigma D_j$$

Le Tableau 13 résume les meilleurs taux de prédiction des franchissements des trois barrières à partir du modèle linéaire spécifique, les différentes valeurs des combinaisons des erreurs ε_{ai} , $\varepsilon_{\beta i}$ et $\varepsilon_{\gamma i}$ et les valeurs du seuil de sensibilité Δu qui permettent de les obtenir.

	Stop	Priorité à droite	Ligne continue
Meilleurs taux	100%	94.47%	94%
Combinaison de ε_{α} , ε_{β} et ε_{γ}	Q ₅ , Q ₁₇ , Q ₁₉ , Q ₂₁	Q ₄ , Q ₁₇	Q ₈ , Q ₁₂ , Q ₁₅ , Q ₁₉
Valeur de Δu	$u(FB_0 \setminus RB)_{moy}$	$u(FB_0 \setminus RB)_{moy}$, 45	$u(FB_0 \setminus RB)_{moy}$, 45

Tableau 13 : Les meilleurs taux de prédiction correcte et les éléments du modèle linéaire spécifique qui leur correspondent

Généralement, les franchissements de la barrière Stop ont été motivés par la recherche des Bénéfices en Sécurité. Les attributs Bénéfices et Coûts ont été fortement pondérés. Cependant, les Déficits potentiels ont été très peu intégrés dans les décisions de franchir cette barrière. Par contre, les prises de décision de franchir la barrière priorité à droite ont intégré les Coûts et les Déficits potentiels en Sécurité. Cette prise en compte des conséquences négatives est expliquée par la présence du véhicule prioritaire dans le croisement. Enfin, les prises de décision de franchissement de la barrière ligne continue sont motivées par la recherche des Bénéfices en Sécurité. Globalement, les sujets qui avaient associé des poids importants aux Déficits potentiels appartenaient au groupe G2. Le tableau suivant décrit les valeurs des erreurs ε_{ai} , $\varepsilon_{\beta i}$ et $\varepsilon_{\gamma i}$ sur les poids qui permettent d'obtenir les meilleurs taux de prédiction (Cf. Tableau 14).

Barrière	ε_{ai}	$\varepsilon_{\beta i}$	$\varepsilon_{\gamma i}$
Stop	Moyenne	Forte	Faible
Priorité à droite	Nulle	Moyenne	Faible
Ligne continue	Forte	Forte	Moyenne

Tableau 14 : Description des erreurs ε_{ai} , $\varepsilon_{\beta i}$ et $\varepsilon_{\gamma i}$ associées aux meilleurs taux de prédiction

Avec : Nulle signifie ε_{ai} , $\varepsilon_{\beta i}$ ou $\varepsilon_{\gamma i} = 0$. Faible signifie $0 < \text{moyenne}(|\varepsilon_{ai}, \varepsilon_{\beta i}, \varepsilon_{\gamma i}|) \leq 0.25$. Moyenne signifie $0.25 < \text{moyenne}(|\varepsilon_{ai}, \varepsilon_{\beta i}, \varepsilon_{\gamma i}|) \leq 0.5$ et Forte signifie $0.5 < \text{moyenne}(|\varepsilon_{ai}, \varepsilon_{\beta i}, \varepsilon_{\gamma i}|) \leq 0.75$

Le paramétrage de la valeur du seuil Δu est bénéfique pour l'amélioration des taux de prédiction correcte des trois barrières Stop, priorité à droite et ligne continue. Lorsque $\Delta u = u(FB_0 \setminus RB)_{moy}$, nous pouvons atteindre les meilleurs taux de prédiction correcte qui peuvent

atteindre les 100%. La valeur moyenne des $u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})$ peut alors être admise comme étant le meilleur seuil de sensibilité de la méthode de prédiction des franchissements des trois barrières.

6. Conclusion :

Le premier objectif fixé pour ce quatrième chapitre était de valider les deux modèles linéaires générique et spécifique de la prise de décision relative au franchissement de barrière. Ce premier objectif a été atteint. En effet, les deux modèles linéaires traduisent avec succès ce type de décisions à travers le calcul de son utilité espérée. Les différents éléments de ces deux modèles sont :

- les critères et les attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels qui leurs sont associés pour le modèle linéaire générique,
- les critères, les attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels qui leurs sont associés, les poids α_i , β_i et γ_i et les erreurs ε_{α_i} , ε_{β_i} et ε_{γ_i} pour le modèle linéaire spécifique

Ces deux modèles intègrent non seulement des éléments de la prise de décision, mais aussi des éléments du modèle BCD. Le paramétrage des deux modèles linéaires a permis de traduire les décisions relatives au franchissement de barrière et ainsi de pouvoir les prédire.

Le deuxième objectif de ce chapitre était de prédire les franchissements de barrière. Cet objectif aussi a été atteint. En effet, les prédictions des franchissements de barrière ont été réalisées avec les deux modèles linéaires et ont atteint des taux de prédiction correcte très encourageants et atteignant dans certains cas les 100% de prédiction correcte. Les prédictions des franchissements de barrière ont été appliquées à trois types de barrières dans trois situations différentes.

Le paramétrage du seuil de sensibilité Δu a permis à son tour d'améliorer les taux de prédiction correcte. La valeur moyenne $u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})_{\text{moy}}$ peut être considérée comme étant celle qui optimise ces taux de prédiction. L'hypothèse majeure sur laquelle s'est basée la méthode de prédiction peut alors être modifiée:

$$\text{si } u(\text{FB}_{(i+1)} \setminus \text{RB}) > u(\text{FB}_0 \setminus \text{RB})_{\text{moy}} \text{ alors, CP} = \text{FB}$$

Le troisième objectif de ce chapitre était de tester l'influence du paramétrage des éléments des deux modèles linéaires sur la prédiction des franchissements des barrières. Cet objectif également a été atteint. En effet, les taux de prédiction correcte qui est basée sur le modèle générique sont sensibles à la nature des évaluations des critères et à la valeur du seuil Δu . Le paramétrage de ces éléments a permis d'améliorer les taux de prédiction correcte. Dans certain cas, les taux de prédiction s'améliorent de plus de 68% (Cf.

Figure 54). De même, les taux de prédiction correcte des franchissements de barrière basée sur le modèle spécifique sont sensibles aux valeurs des poids α_i , β_i et γ_i , aux valeurs des erreurs ε_{α_i} , ε_{β_i} et ε_{γ_i} et à la valeur du seuil Δu . Le paramétrage de ces éléments a permis d'améliorer les taux de prédiction correcte.

Pour résumer les apports de cette nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière à la conduite automobile, nous pouvons retenir que :

- cette nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière est intéressante et permet d'atteindre des taux de prédiction de comportements humains qui peuvent atteindre 100% de prédiction correcte,
- les points forts de cette méthode sont les suivants :
 - elle nécessite une faible base de données qui est constituée par les attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels associés aux critères spécifiques de la tâche de conduite automobile,
 - elle nécessite un faible nombre d'itérations pour le processus de l'apprentissage
 - elle assure des résultats satisfaisants en termes de taux de prédiction correcte,
- l'applicabilité de cette méthode de prédiction nous permet de valider les deux modèles linéaires générique et spécifique de l'utilité espérée du franchissement de barrière $u(\text{FB}\backslash\text{RB})$ décrits respectivement par les deux équations suivantes :

$$u(\text{FB}\backslash\text{RB}) = \Sigma B_j + \Sigma C_j + \Sigma D_j$$

$$u(\text{FB}_{(i+1)}\backslash\text{RB}) = p[(\alpha_i + \varepsilon_{\alpha i})\Sigma B_j + (\beta_i + \varepsilon_{\beta i}) \Sigma C_j] + (1-p) (\gamma_i + \varepsilon_{\gamma i}) \Sigma D_j$$

si $u(\text{FB}\backslash\text{RB}) > \Delta u$ alors il y'a FB

- le paramétrage de ces deux modèles permet d'affiner la valeur de l'utilité espérée du franchissement de barrière et de réussir leur prédiction.
- la possibilité de paramétrer les éléments des deux modèles linéaires nous permet d'appliquer la nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière à différents types de barrières et dans différentes situations.

La nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière proposée dans ce mémoire est une méthode intéressante qui nous permet de prédire certains comportements humains. Les résultats obtenus sont satisfaisants et nous encouragent à l'appliquer dans d'autres domaines et surtout à l'intégrer dans une démarche d'étude de sûreté de fonctionnement. Cependant, elle nécessite quelques améliorations comme l'intégration des probabilités dans le calcul de l'utilité espérée du franchissement de barrière. L'amélioration de cette méthode de prédiction constitue une partie des perspectives qui font l'objet du chapitre suivant.

Chapitre V : Perspectives

La validation des deux modèles linéaires de l'utilité du franchissement de barrière ainsi que les taux obtenus de prédiction correcte des franchissements de barrière nous permettent d'intégrer cette nouvelle méthode de prédiction dans plusieurs perspectives.

Ces perspectives peuvent être à court ou à long terme. Parmi les perspectives à court terme nous retrouvons :

- la proposition d'un guide des méthodes de prédiction des franchissements de barrière,
- l'amélioration des deux modèles linéaires générique et spécifique par l'intégration des probabilités subjectives et objectives dans le calcul de l'utilité espérée du franchissement de barrière,
- la proposition d'une démarche complète d'analyse des risques qui intègre les erreurs humaines volontaires et involontaires ainsi que leurs conséquences et probabilités d'échec.

Les perspectives à long terme concernent la conception de systèmes intelligents permettant de prédire en ligne les franchissements de barrière potentiels et d'agir pour les éviter ou minimiser leurs conséquences. La prédiction de ces franchissements de barrière peut se baser sur la sélection de la méthode de prédiction la plus adéquate parmi les trois méthodes : basées sur le Raisonnement à Partir de Cas distribué, le réseau de neurones et l'utilité espérée du franchissement de barrière.

Ces perspectives à long terme sont abordées dans la dernière partie de ce chapitre. La première partie est consacrée aux perspectives à court terme.

1. Les perspectives à court terme

1. Vers la conception d'un guide des méthodes de prédiction des franchissement de barrière

Afin de pouvoir choisir une méthode adéquate pour la prédiction des franchissements de barrière dans différents domaines, nous pouvons concevoir un guide qui décrit les trois méthodes, leurs cadres d'application et leurs performances.

Le choix de la méthode adéquate peut se baser sur le degré de confiance qui lui est associé. Ce degré de confiance peut être défini en fonction du domaine d'application de la méthode, des exigences des tâches, des barrières susceptibles d'être franchies et des taux de réussite de la prédiction des franchissements de barrière (Cf. Tableau 15).

	Barrière B ₁	Barrière B ₂	...	Barrière B _M
Méthode de prédiction basée sur le Raisonnement à Partir de Cas distribué	(C ₁₁ , T ₁₁)	(C ₁₂ , T ₁₂)	...	(C _{1M} , T _{1M})
Méthode de prédiction basée sur le réseau de neurones	(C ₂₁ , T ₂₁)	(C ₂₂ , T ₂₂)	...	(C _{2M} , T _{2M})
Méthode de prédiction basée sur l'utilité espérée des franchissements de barrière	(C ₃₁ , T ₃₁)	(C ₃₂ , T ₃₂)	...	(C _{3M} , T _{3M})

Avec $1 \leq i \leq 3$ et $1 \leq k \leq N$. N : nombre des barrières étudiées

Tableau 15 : (Degré de confiance C_{ik}, Taux de réussite T_{ik}) de chaque méthode i par type de barrière B_k

Ce guide pourrait aider l'utilisateur (concepteur ou exploitant) à choisir la méthode qui correspond le plus à ses besoins ou à combiner les trois méthodes de prédiction en fonction de leurs facteurs de sensibilité permettant d'accroître le niveau de prédiction.

Puisque le guide proposé accorde une importance aux performances des trois méthodes de prédiction des franchissements de barrière, il est nécessaire de tester la performance de la méthode de prédiction basée sur l'utilité espérée des franchissements de barrière. Pour ce faire, elle peut être appliquée à d'autres domaines tel que le domaine de la conduite et du contrôle du trafic ferroviaire. Avant de l'appliquer, il convient de l'améliorer.

L'amélioration principale qui peut être apportée à cette nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière est l'évaluation des probabilités subjectives et objectives associées aux Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels pour les intégrer dans le calcul de l'utilité espérée du franchissement de barrière.

Nous commencerons dans le paragraphe suivant, par proposer un moyen d'évaluation des probabilités subjectives. L'évaluation des probabilités objectives est abordée par la suite.

2. Vers une évaluation des probabilités subjectives

Initialement, le modèle linéaire spécifique de l'utilité espérée du franchissement de barrière proposé dans ce mémoire est illustré par l'équation suivante :

$$u(\text{FB}_{(i+1)} \setminus \text{RB}) = p [(\alpha_i + \varepsilon_{\alpha i}) \sum B_j + (\beta_i + \varepsilon_{\beta i}) \sum C_j] + (1-p) (\gamma_i + \varepsilon_{\gamma i}) \sum D_j$$

Ce modèle nécessite l'évaluation des probabilités subjectives de la réussite et de l'échec du franchissement de barrière p et (1-p). Faute de données, ces probabilités n'ont pas été intégrées dans le calcul de l'utilité espérée pour prédire les franchissements de barrière. Le modèle linéaire spécifique qui a été admis pour prédire les franchissements de barrière était alors décrit par l'équation suivante :

$$u(\text{FB}_{(i+1)} \setminus \text{RB}) = (\alpha_i + \varepsilon_{\alpha i}) \sum B_j + (\beta_i + \varepsilon_{\beta i}) \sum C_j + (\gamma_i + \varepsilon_{\gamma i}) \sum D_j$$

Une des perspectives à court terme de ce mémoire consiste à améliorer le modèle linéaire spécifique par l'évaluation des probabilités subjectives par les opérateurs humains. Ces évaluations peuvent être :

- évaluées par les opérateurs humains par l'intermédiaire de questionnaires par exemple,
- obtenues à partir du jugement d'experts [GOURIVEAU, 03].

L'intégration des probabilités subjectives dans le calcul des utilités espérées des franchissements de barrière pourrait :

- nous permettre d'améliorer les taux de prédiction correcte des franchissements de barrière,
- apporter un éclairage sur les relations qui pourraient exister entre les probabilités subjectives et les franchissements de barrière.

La forme initiale du modèle linéaire générique de l'utilité espérée du franchissement de barrière est illustrée par l'équation suivante :

$$u(\text{FB}\backslash\text{RB}) = p (\sum B_j + \sum C_j) + (1-p) \sum D_j.$$

Cette équation intègre à son tour les probabilités de réussite et d'échec des franchissements de barrière.

Comme les probabilités n'ont pas été calculées, le modèle linéaire générique retenu était illustré par l'équation suivante :

$$u(\text{FB}\backslash\text{RB}) = \sum B_j + \sum C_j + \sum D_j.$$

Le modèle générique a pu être appliqué avec des évaluations subjectives et objectives des critères. Les probabilités qu'il intègre peuvent être subjectives ou objectives. L'évaluation des probabilités subjectives peut être réalisée par les opérateurs humains ou obtenue à partir du jugement d'experts. Les probabilités objectives doivent être calculées à partir de méthodes adaptées. Le paragraphe suivant présente une des méthodes les plus adéquates pour évaluer les probabilités objectives de la réussite et de l'échec des franchissements de barrière : la méthode THERP.

3. Vers une évaluation des probabilités objectives

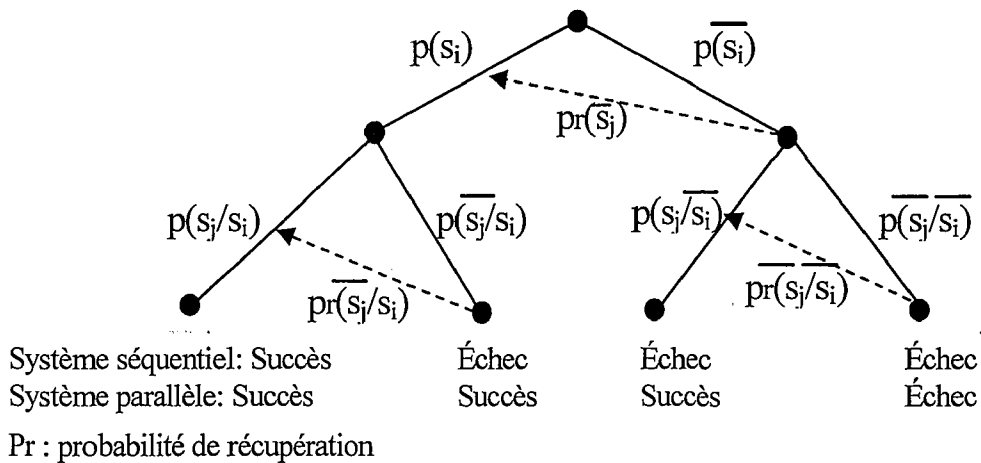
Une des méthodes les plus adéquates pour calculer les probabilités objectives de réussite et d'échec d'une procédure donnée est la Technique for Human Error Rate Prediction (THERP) [CACCIABUE, 04]. Cette méthode se base sur le calcul des probabilités de réussite et d'échec des tâches élémentaires d'une procédure pour en déduire les probabilités de réussite et d'échec de la procédure.

Afin d'expliquer la démarche de calcul des probabilités de réussite et d'échec d'une procédure prescrite par la méthode THERP en premier lieu et d'une procédure détournée (c'est-à-dire le franchissement de barrière) en deuxième lieu, nous commencerons par présenter la méthode THERP. Ensuite, nous l'appliquerons à titre d'exemple à une procédure

prescrite de conduite du RER 'A' (Rames Expressément Régionale 'A'). Enfin, nous nous intéresserons à la même procédure appliquée dans un mode détourné pour illustrer le calcul des probabilités de réussite et d'échec du franchissement de barrière.

3.1 Présentation de la méthode THERP

La méthode THERP [SWAIN, 83] est une technique de prédiction de l'erreur humaine. La probabilité d'erreur y est évaluée à partir de trois facteurs : une probabilité de base relative aux caractéristiques de la tâche à réaliser (i et j), un coefficient correctif pour la prise en compte des facteurs pouvant affecter l'exécution de cette tâche, et une probabilité de non-récupération de l'erreur. La probabilité d'erreur humaine lors de la réalisation d'une tâche est soit une probabilité de base qui traduit l'échec d'exécution d'une tâche élémentaire, soit une probabilité d'absence de récupération d'une erreur (Cf. Figure 62).



Type	Séquentiel	Parallèle
Cas général	$p(\text{Echec}) = 1 - p(\text{succès}) = 1 - p(s_i \cap s_j)$	$p(\text{Echec}) = p(\overline{s_i} \cap \overline{s_j})$
i et j dépendantes	$p(\text{Echec}) = 1 - p(s_i) \cdot p(s_j / s_i)$	$p(\text{Echec}) = p(\overline{s_i}) \cdot p(\overline{s_j} / \overline{s_i})$
i et j indépendantes	$p(\text{Echec}) = 1 - p(s_i) \cdot p(s_j)$	$p(\text{Echec}) = p(\overline{s_i}) \cdot p(\overline{s_j})$

Figure 62 : Arbre d'événements pour l'évaluation de l'erreur humaine dans THERP

La probabilité de base peut être pondérée par un coefficient correctif qui permet de prendre en compte l'impact de facteurs externes ou internes sur l'exécution de la tâche élémentaire tels que le stress et l'expérience. Les probabilités d'absence de récupération d'une erreur dépendent du temps disponible pour détecter celle-ci et la corriger. Pour une même tâche élémentaire, plusieurs stades de récupération peuvent être identifiés. L'ensemble des probabilités est évalué à partir de tables prédéfinies ou de jugements d'experts.

3.2 Exemple de calcul des probabilités de réussite et d'échec d'une procédure prescrite avec THERP

Afin d'illustrer le calcul des probabilités de réussite et d'échec d'une procédure prescrite, nous considérons un exemple associé à la conduite du RER 'A'. En effet, tout comme pour la conduite automobile, le conducteur du RER 'A' (Cf. Figure 63) doit respecter un ensemble de barrières placées tout au long du trajet qu'il doit suivre. Ces barrières sont par exemple : le respect de vitesse, le respect des signalisations, le contrôle des portes, etc.... (Cf. Figure 64). Nous nous intéresserons à la procédure liée au respect de la vitesse. Cette procédure est retenue parce qu'elle est directement liée à la sécurité du RER 'A' et des passagers.

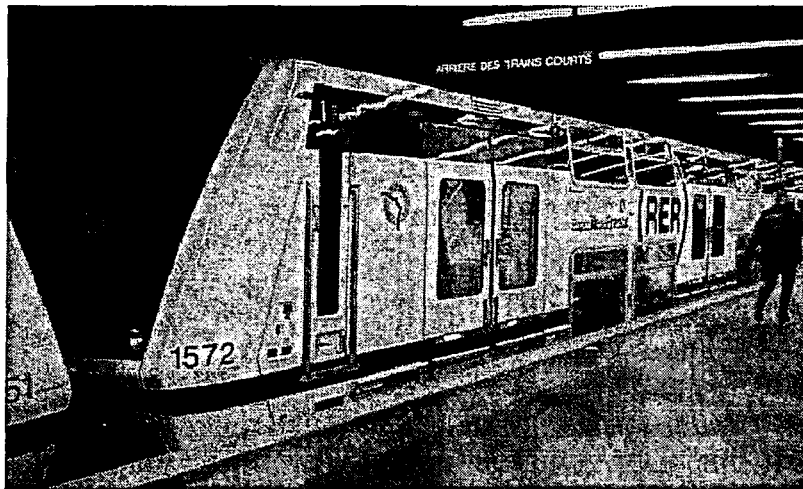


Figure 63: Le RER 'A'

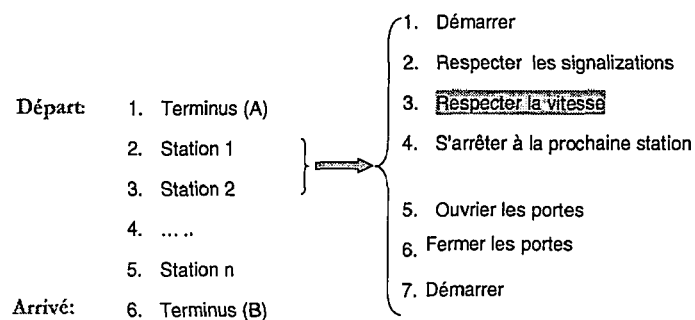


Figure 64: Etapes de la conduite du RER 'A'

Les tâches élémentaires de la procédure de respect de vitesse sont les suivantes (Cf. Figure 65 et Figure 66) :

- la perception du signal de limitation de vitesse (A),
- l'interprétation de la limitation de vitesse (B),
- l'action du bouton pour ralentir (C),
- la perception du signal sonore lorsque la limitation de vitesse n'est pas respectée (D),
- l'interprétation du signal sonore (E),
- l'interprétation du signal de début de la zone 'Z' à vitesse limitée (G)

- l'interprétation du signal Z (H).



Figure 65: Signalisations de limite de vitesse du RER 'A'



Figure 66: Début de la zone à vitesse limitée du RER 'A'

L'étude des probabilités d'échec et de réussite des tâches élémentaires de la procédure prescrite du respect de vitesse ainsi que les probabilités de récupération des erreurs potentielles sont détaillées dans la figure suivante (Cf. Figure 67).

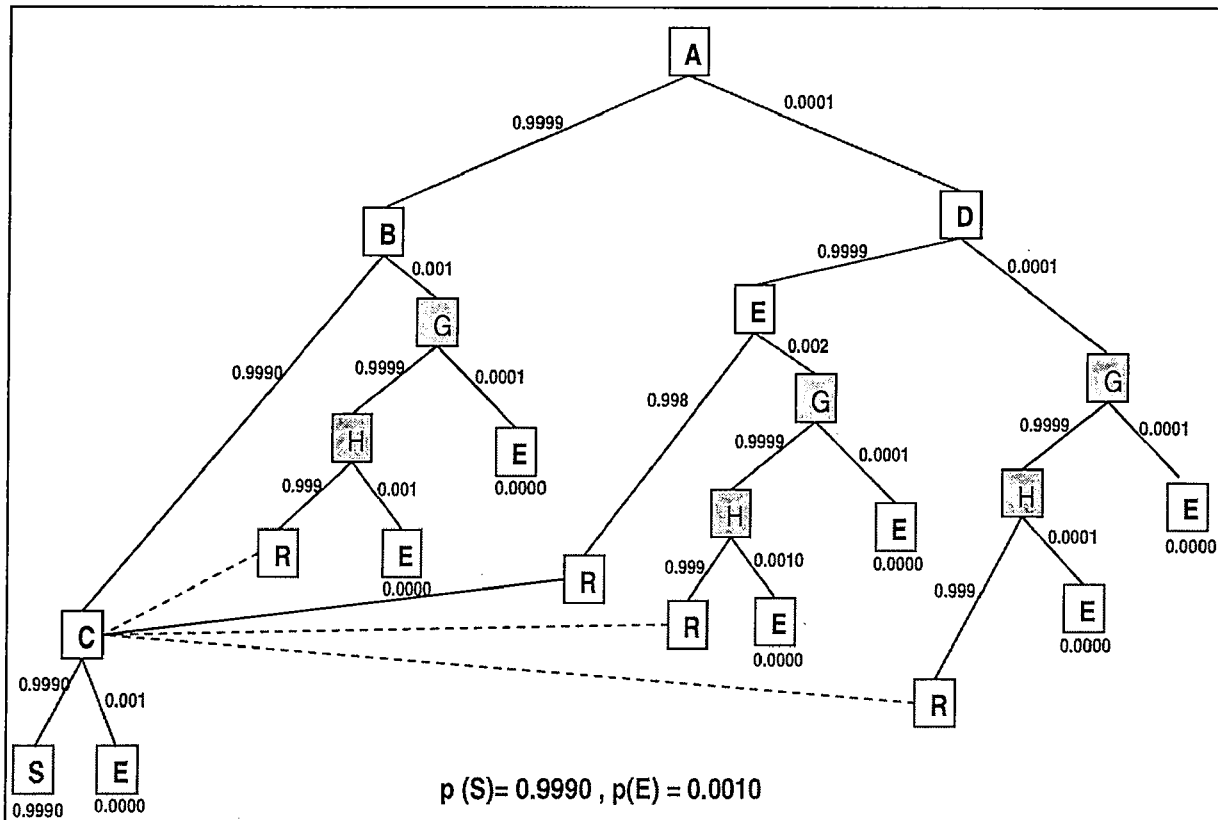


Figure 67: Evaluation des probabilités de réussite et d’échec de la procédure prescrite du respect de vitesse du RER ‘A’

Les probabilités de réussite et d’échec de la procédure prescrite du respect de la vitesse sont respectivement égales à 0.9990 et 0.0010 (Cf. Figure 67).

3.3 Exemple de calcul des probabilités de réussite et d’échec d’une procédure détournée avec THERP

Les probabilités calculées ci-dessus sont les probabilités de réussite et d’échec de la procédure prescrite du respect de vitesse du RER ‘A’. Les probabilités d’échec sont celles des erreurs non intentionnelles. En effet, ces erreurs peuvent être dues à la distraction, le manque de concentration, la fatigue, le stress, le manque de responsabilité, etc... [CACCIABUE, 04].

Puisque le franchissement de barrière est une erreur volontaire qui résulte d’une modification de la procédure prescrite, le calcul des probabilités de son échec et de sa réussite nécessite le calcul des probabilités de réussite et d’échec de la procédure détournée. Afin de mieux expliquer ce calcul, nous reprenons l’exemple précédent.

Les tâches élémentaires de la procédure détournée du respect de vitesse sont les mêmes que celles de la procédure prescrite (c’est-à-dire A, B, C, D, E, G et H). La seule différence réside

dans les valeurs des probabilités de réussite et d'échec de ces tâches élémentaires [CHAALI-DJELASSI, VANDERHAEGEN, CACCIABUE & CASSANI, 07].

Avant de détailler le calcul de ces probabilités (Cf. Figure 68), nous rappelons que dans la procédure détournée trois barrières sont prises en compte. Les deux barrières vitesse et signal sonore sont franchies. Seule la barrière de zone est respectée.

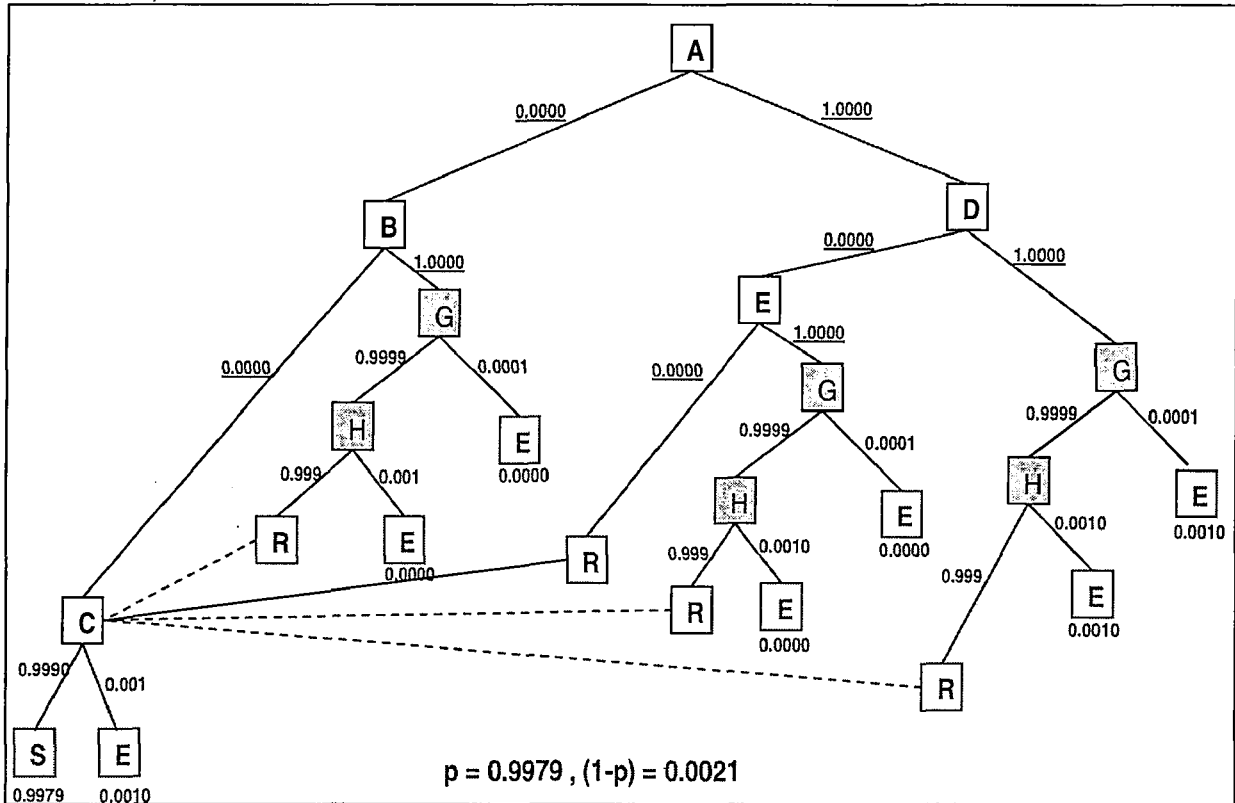


Figure 68: Evaluation des probabilités de réussite et d'échec de la procédure détournée du respect de vitesse du RER 'A'

Les probabilités de réussite et d'échec du franchissement de la barrière vitesse du RER 'A' sont respectivement égales à 0.9979 et 0.0021.

Les probabilités de réussite et d'échec du franchissement de la barrière sont représentées respectivement par p et $(1-p)$ dans les deux modèles linéaires initiaux de l'utilité des franchissements de barrière.

La comparaison entre la probabilité d'échec de la procédure prescrite du respect de vitesse à celle de la procédure détournée montre que le franchissement de la barrière vitesse du RER 'A' peut augmenter le risque à travers l'augmentation de sa probabilité d'occurrence.

Le calcul objectif des probabilités de réussite et d'échec des franchissements de barrière ainsi que l'évaluation objective des critères nous offrent la possibilité de :

- prédire les franchissements de barrière à partir de données objectives. Ceci nous permet de prétendre à la prédiction en ligne des franchissements de barrière. Cette proposition est abordée dans la dernière partie de ce chapitre.
- Proposer une nouvelle méthode d'analyse des risques qui intègre les erreurs humaines intentionnelles et non intentionnelles. Cette méthode est abordée ci-dessous.

II. Les perspectives à court terme

1. Vers une analyse de risque plus complète

La méthode THERP nous a permis d'évaluer les probabilités de réussite et d'échec des deux types d'erreurs humaines (intentionnelles et non intentionnelles). L'obtention de ces erreurs nous permet de proposer une analyse plus complète du risque qui, à la différence de la majorité des analyses précédentes, intègre :

- les défaillances techniques, leurs conséquences et leurs probabilités d'occurrence,
- les erreurs humaines involontaires, leurs conséquences et leurs probabilités d'échec,
- les erreurs humaines volontaires, leurs conséquences et leurs probabilités d'échec.

Cette nouvelle analyse de risque est illustrée par la Figure 69.

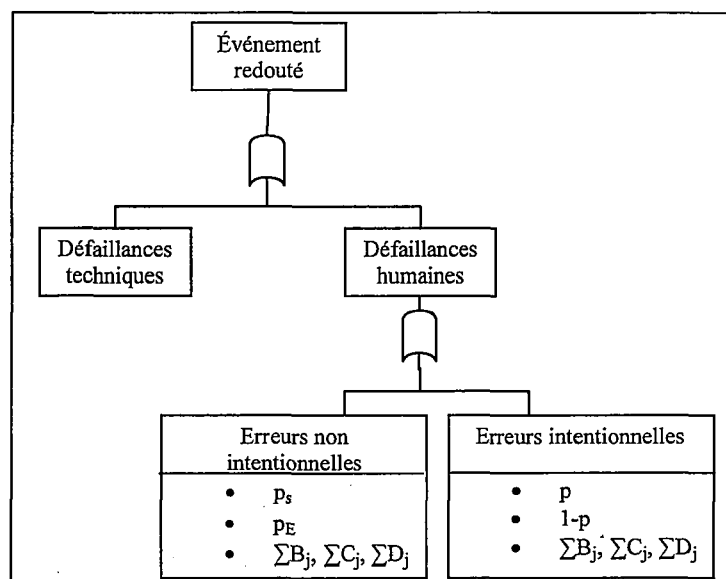


Figure 69 : proposition d'une méthode d'analyse de risque qui intègre tous les types de l'erreur humaine

La probabilité de l'occurrence d'une défaillance humaine sera calculée de la manière suivante (Cf. Équation 17):

$$p_{dh} = p_{Eni} + p_{Ei}$$

Équation 17

Avec :

- p_{dh} la probabilité de l'occurrence d'une défaillance humaine,
- p_{Eni} la probabilité de l'occurrence d'une erreur non intentionnelle,
- p_{Ei} la probabilité de l'occurrence d'une erreur intentionnelle.

L'identification des erreurs intentionnelles et non intentionnelles ainsi que l'évaluation de leurs conséquences (c'est-à-dire, les Bénéfices, les Coûts et les Déficits potentiels) peuvent être évaluées objectivement à partir d'indicateurs ou subjectivement. Dans ce cas, tout comme pour l'évaluation des probabilités subjectives (Cf. Paragraphe 2 de ce chapitre), ces évaluations peuvent être obtenues :

- soit par les opérateurs humains par l'intermédiaire de questionnaires par exemple. Cette approche est en cours de réalisation en collaboration avec l'équipe PERCOTECH du LAMIH et l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard à partir des verbalisations et rejeux des expérimentations présentées dans le chapitre IV [CHALME, CHAALI-DJELASSI & ANCEAUX, 06],
- soit à partir du jugement d'experts [GOURIVEAU, 03].

A ce stade, nous avons présenté les perspectives à court terme de ce mémoire. Ces perspectives se sont intéressées à la proposition d'un guide des méthodes de prédiction des franchissements de barrière, à l'amélioration des deux modèles linéaires de l'utilité espérée du franchissement de barrière par l'intégration des probabilités et à l'élaboration d'une étude complète des risques dans les systèmes Homme-machine. Les perspectives à long terme visent la prédiction en ligne des franchissements de barrière pour concevoir des barrières intelligentes capables d'agir en ligne pour réduire l'occurrence ou les conséquences des événements redoutés. La méthode de prédiction retenue correspond à une combinaison des trois méthodes de prédiction (basées sur le Raisonnement à Partir de Cas distribué, le réseau de neurones et l'utilité espérée du franchissement de barrière). Ces perspectives sont abordées dans le paragraphe suivant.

2. Vers une prédiction en ligne des franchissements de barrière

L'intégration de la prédiction des franchissements de barrière dans l'analyse de risque des systèmes Homme-machine peut améliorer la conception des barrières pour limiter l'occurrence ou les conséquences des événements redoutés engendrés par l'opérateur humain. Cependant, ces barrières ne peuvent pas s'adapter en ligne en fonction des comportements des opérateurs humains qui évoluent dans le temps.

Afin de concevoir des barrières intelligentes qui peuvent analyser les comportements des opérateurs humains et agir en conséquences, il est nécessaire de prédire en ligne les franchissements de barrière.

Cette prédiction en ligne peut être assurée par un système embarqué qui :

- calcule les critères à partir des données dynamiques du véhicule et de son environnement,
- se base sur le modèle linéaire générique pour calculer en ligne l'utilité espérée du franchissement de barrière,
- prédit le comportement de l'opérateur humain qui lui correspond.

Ce système aurait pour entrées :

- les données relatives aux différents conducteurs qui peuvent l'utiliser (par l'intermédiaire d'une clé de contact personnalisée par exemple),
- les données relatives à l'itinéraire,
- les données sur les barrières qui peuvent être rencontrées par le conducteur (à partir des données de localisation (GPS) par exemple),
- les données dynamiques du véhicule (vitesse, position sur la route, etc... à partir de capteurs),
- les données dynamiques de l'environnement du véhicule (autres véhicules présents sur la route, type de la route, conditions climatiques, etc...).

Dans un premier temps, ce système embarqué pourra intégrer les comportements du conducteur face aux barrières qu'ils rencontrent afin de paramétrer les éléments du modèle linéaire générique de l'utilité espérée du franchissement de barrière. Ce paramétrage est assuré par la comparaison entre les comportements prédits et ceux observés. Les comportements observés pourront être détectés à partir des données dynamiques du véhicule (Cf. Figure 70).

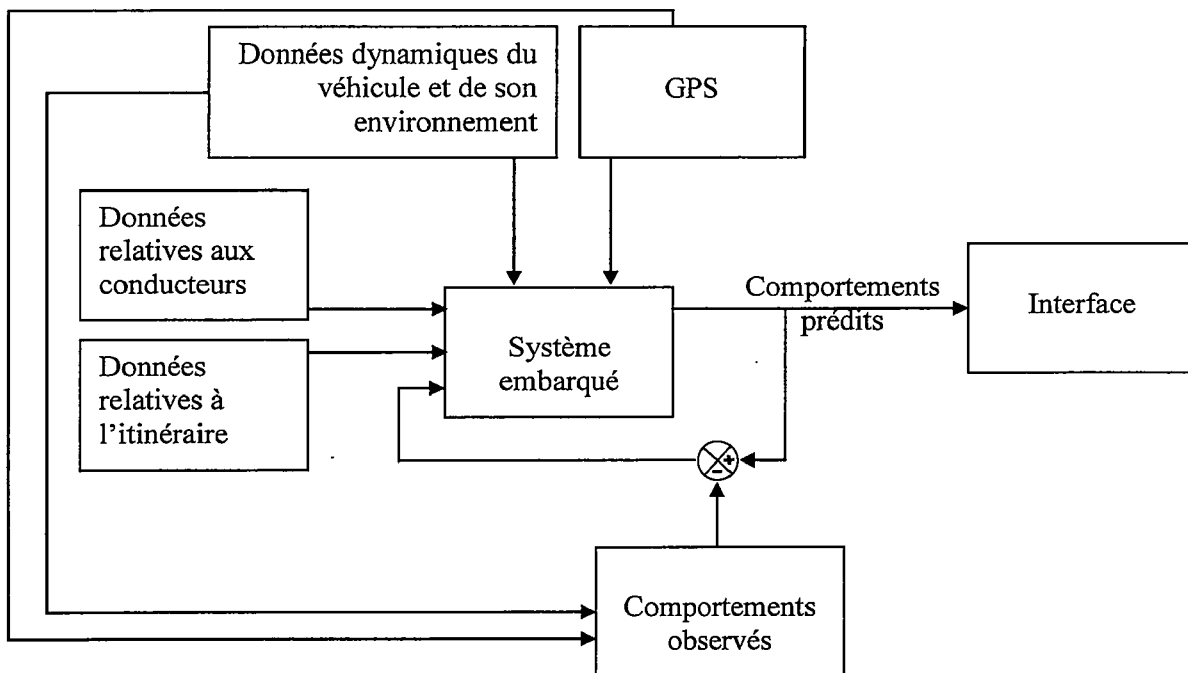


Figure 70 : Architecture du système embarqué

Dès que le système embarqué aura affiné et stabilisé la valeur de l'utilité espérée du franchissement de barrière, il déclenche une interface qui avertit en ligne le conducteur des conséquences de son comportement prédit. Par exemple, elle recommande au conducteur de s'arrêter si un véhicule prioritaire est présent. Dans le cas contraire, elle lui autorise de ne pas ralentir si aucun véhicule n'est présent (Cf. Figure 71).

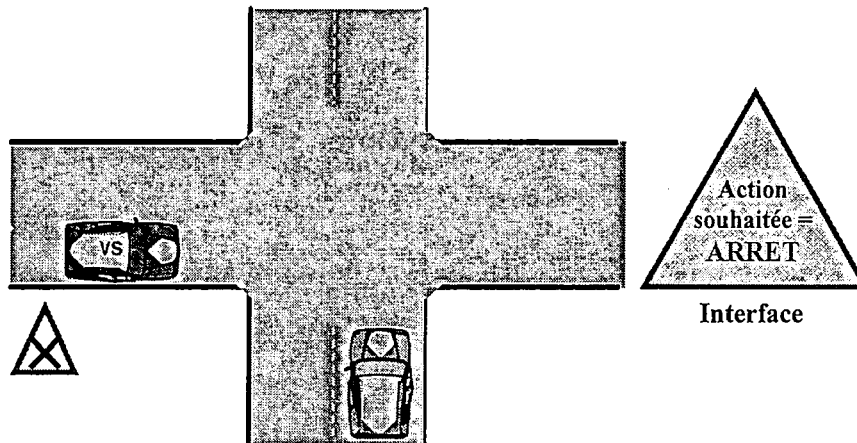


Figure 71 : Exemple d'intervention du système embarqué

Afin d'optimiser la prédiction en ligne des franchissements de barrière, nous pouvons utiliser une combinaison des trois méthodes de prédiction (basées sur le Raisonnement à Partir de Cas distribué, le réseau de neurones et l'utilité espérée du franchissement de barrière). En effet, ces trois méthodes peuvent être soit :

- indépendantes. Dans ce cas, le résultat de la prédiction en ligne retenu correspond au comportement qui est prédit au moins par deux méthodes (c'est le principe du vote) (Cf. Figure 72),

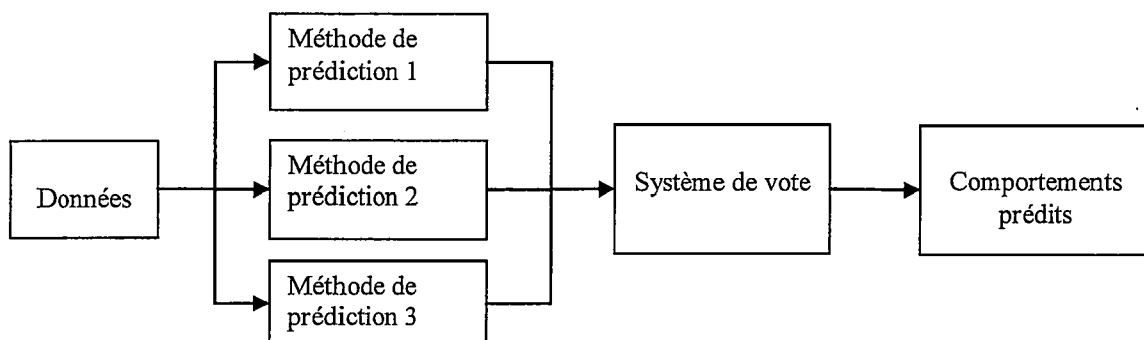


Figure 72 : Premier principe de combinaison des trois méthodes de prédiction des franchissements de barrière

- combinées, dans ce cas, deux méthodes (par exemple la méthode 1 et 2) constituent la base d'apprentissage pour la troisième afin d'accroître son taux de prédiction (Cf. Figure 73).

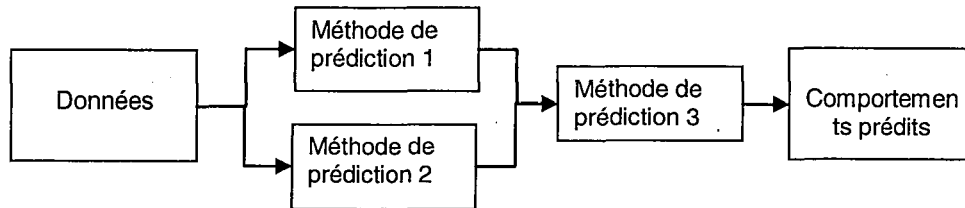


Figure 73 : Deuxième principe de combinaison des trois méthodes de prédiction des franchissements de barrière

Avec par exemple :

la méthode 1 est la méthode de prédiction basée sur l'utilité espérée,

la méthode 2 est la méthode de prédiction basée sur le réseau de neurones,

la méthode 3 est la méthode de prédiction basée sur le Raisonnement à Partir de Cas distribué.

La conception de barrières intelligentes capables de prédire en ligne les comportements déviés des opérateurs humains et d'agir en conséquence pour les éviter ou limiter leurs effets peut améliorer considérablement la sûreté de fonctionnement des systèmes Homme-machine. Elle peut ainsi assurer des conditions de manœuvre sécuritaires à l'opérateur humain et son environnement.

Nos travaux offrent de nombreuses perspectives. Elles concernent en premier lieu l'élaboration d'un guide d'utilisation des trois méthodes de prédiction des franchissements de barrière. En deuxième lieu, elles proposent une amélioration des deux modèles linéaires générique et spécifique de l'utilité espérée du franchissement de barrière par l'intégration du calcul des probabilités objectives et subjectives p et $(1-p)$. Ensuite, elles proposent une démarche complète de l'analyse du risque dans les systèmes Homme-machine qui intègre les erreurs humaines intentionnelles et non intentionnelles ainsi que leurs conséquences et probabilités d'échec.

L'aboutissement à long terme de ces perspectives est illustré par la conception de barrières intelligentes capables de prédire en ligne les franchissements de barrière potentiels et d'agir pour les éviter ou minimiser leurs conséquences.

L'ensemble de nos perspectives concerne une aide à la conception et au placement des barrières pour limiter lorsque c'est possible, en temps réel les opportunités des franchissements de barrière afin d'améliorer la sûreté de fonctionnement des systèmes Homme-machine.

Conclusion Générale

La sûreté de fonctionnement dans les systèmes Homme-machine se base sur une analyse bidimensionnelle qui prend en compte les défaillances techniques et humaines.

De nombreuses études se sont intéressées aux erreurs humaines et ont permis de les définir et de les analyser. Ces études contribuent à améliorer la sûreté de fonctionnement des systèmes Homme-machine. Cependant, elles ne prennent pas en compte les erreurs volontaires (violations).

Pour limiter les occurrences et/ou conséquences des erreurs humaines, les concepteurs équipent les systèmes Homme-machine de barrières qui peuvent être franchies par les opérateurs humains.

Afin de mieux concevoir les barrières, il est nécessaire d'intégrer les franchissements de barrière dans la phase de conception des systèmes Homme-machine. Cette intégration nécessite la modélisation et la prédiction des franchissements de barrière.

Ce mémoire a proposé deux modèles linéaires des franchissements de barrière : un modèle linéaire générique et un modèle linéaire spécifique. Le modèle générique intègre (1) les critères, (2) les attributs Bénéfices, Coûts et Déficit potentiels qui leurs sont associés et (3) le seuil de sensibilité Δu . Il est décrit par les deux équations suivantes :

$$u(\text{FB}\backslash\text{RB}) = \sum B_j + \sum C_j + \sum D_j$$

si $u(\text{FB}\backslash\text{RB}) > \Delta u$ alors, il y a FB

Le modèle spécifique est un modèle générique personnalisé. Il intègre des éléments supplémentaires qui sont les poids α_i , β_i et γ_i associés aux attributs Bénéfices, Coûts et Déficit potentiels et les erreurs ε_{α_i} , ε_{β_i} et ε_{γ_i} sur ces poids (α_i , β_i et γ_i). Il est illustré par les équations suivantes.

$$u(\text{FB}_{(i+1)}\backslash\text{RB}) = (\alpha_i + \varepsilon_{\alpha_i}) \sum B_j + (\beta_i + \varepsilon_{\beta_i}) \sum C_j + (\gamma_i + \varepsilon_{\gamma_i}) \sum D_j$$

si $u(\text{FB}\backslash\text{RB}) > \Delta u$ alors, il y a FB

L'aboutissement de ces deux modèles linéaires est le calcul de l'utilité espérée du franchissement de barrière. Cette utilité espérée nous permet de prédire les comportements des opérateurs humains (les franchissements de barrières).

Cette nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière a été appliquée dans le domaine de la conduite automobile. La campagne expérimentale s'est déroulée dans le simulateur de conduite SHERPA du LAMIH.

Le paramétrage des éléments des deux modèles linéaires (générique et spécifique) nous a permis d'affiner la valeur de l'utilité espérée du franchissement de barrière et d'atteindre des taux de prédiction très encourageants.

L'étude des poids α_i , β_i et γ_i associés aux attributs Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels et des erreurs ε_{α_i} , ε_{β_i} et ε_{γ_i} nous a permis de détecter les critères et les attributs qui motivent l'occurrence des franchissements des trois barrières Stop, priorité à droite et ligne continue.

Les points forts de la nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière sont nombreux. En effet,

- elle nécessite une faible base de données que sont les attributs Bénéfices, Coûts et déficits potentiels associés aux critères,
- elle nécessite un nombre faible d'itérations pour son processus d'apprentissage,
- elle s'auto-adapte pour paramétrer les éléments des deux modèles linéaires générique et spécifique,
- elle assure des résultats très intéressants en termes de taux de prédiction correcte.

La validation des deux modèles linéaires de l'utilité du franchissement de barrière ainsi que les taux obtenus de prédiction correcte nous ont permis d'intégrer cette nouvelle méthode de prédiction des franchissements de barrière dans plusieurs perspectives.

Parmi les perspectives à court terme de ce mémoire, nous retrouvons d'abord, la proposition d'un guide des méthodes de prédiction des franchissements de barrière. Ensuite, l'amélioration des deux modèles linéaires générique et spécifique par l'intégration des probabilités subjectives et objectives dans le calcul de l'utilité espérée du franchissement de barrière. L'évaluation des probabilités subjectives est obtenue par les opérateurs humains ou par jugement d'experts et le calcul des probabilités objectives est obtenu avec la méthode THERP. La démarche de ce calcul a été illustrée par un exemple dans le cadre de la conduite du RER 'A'. L'obtention des probabilités objectives nous a permis de proposer une démarche complète de l'analyse du risque dans les systèmes Homme-machine qui intègre les erreurs humaines intentionnelles et non intentionnelles ainsi que leurs conséquences et probabilités d'échec.

Les perspectives à long terme ont proposé une idée originale de conception de barrières intelligentes qui pourraient prédire en ligne les franchissements de barrière potentiels et agir pour les éviter ou de minimiser leurs conséquences. La prédiction en ligne de ces franchissements de barrière peut se baser sur une combinaison de trois méthodes : prédiction basée sur le Raisonnement à Partir de Cas distribué, prédiction basée sur le réseau de neurones et prédiction basée sur l'utilité espérée du franchissement de barrière.

Les travaux et perspectives de ce mémoire proposent une aide à la conception et au placement des barrières par la prédiction de leurs violations potentielles. Ils ont pour objectif la limitation des opportunités des franchissements de barrière pour accroître la sûreté de fonctionnement des systèmes Homme-machine.

Références

- [AMALBERTI, 01] AMALBERTI. *The paradoxes of almost, totally safe transportation systems*. Safety Science, 37. p 109-126. 2001
- [ARIMOTO, KAWAMURA et MIYAZAKI, 84] ARIMOTO. S, KAWAMURA. S and MIYAZAKI, F. *Bettering operation of robots by learning*. Journal of Robotic Systems. 1984.
- [ATKINSON, 57] ATKINSON. J W. *Motivational determinants of risk-taking behavior*. Psychological Review 64: 359-72. 1957.
- [BAUMONT, 99] BAUMONT. G. *Modèle et méthode Recuperare – Une méthode d'analyse des incidents intégrant la fiabilité humaine*. Rapport DES 371. IPSN, février 1999.
- [BAXTER 99] BAXTER, J and BARTLETT. P. *Direct Gradient-based Reinforcement Learning: I. Gradient Estimation Algorithms*. Technical report, Research School of Information Sciences and Engineering. Australian National University. p 24. 1999.
- [BESNARD & al, 02] BESNARD. D, GREATHEAD. D. *A cognitive approach to safety violation*. Cognition, Technology and Work, in review. 2002.
- [BICHINDARITZ, 1994] BICHINDARITZ. Apprentissage de concepts dans une mémoire dynamique: Raisonnement à partir de cas adaptable à la tâche cognitive. Thèse de Doctorat. Paris V. 1994
- [BIEN & XU 98] BIEN Z. and XU J.-X. *Iterative Learning Control: Analysis, Design, Integration and Application*. Norwell, MA: Kluwer, 1998.
- [BLUME, BRANDENBURGER & DEKEL, 91] BLUME L., BRANDENBURGER A., and DEKEL E. *Lexicographic probabilities and choice uncertainty*. Econometrica, 59(1) : 61–79, 1991.
- [BRANS, MARESCHAL & VINCKE 84] BRANS J.P., MARESCHAL B. and VINCKE PH. *A new family of outranking methods in multi-criteria analysis*, in Brans J.P. (Ed), Operational Research 84, pp. 477-490, North Holland, 1984.
- [BRANS, MARESCHAL & VINCKE, 86] BRANS J.P., MARESCHAL B. and VINCKE PH. *How to select and how to rank projects: the PROMETHE method*, European Journal of Operational Research, Vol. 24, p 228-238, 1986.
- [BUFFET, 03] BUFFET O. *Une double approche modulaire de l'apprentissage par renforcement pour des agents intelligents adaptatifs*. Thèse UFR STEMIA. Nancy: Université Henri Poincaré. Nancy 1. p 215. 2000.

- [BUFFET, 00] BUFFET O. *Apprentissage par renforcement dans un système multi-agents : rapport de stage de DEA*. DEA Informatique. Nancy : UFR STEMIA, Université Henri Poincaré. Nancy 1. p 40. 2000.
- [CACCIABUE, 04] CACCIABUE, C. P. (2004). *Guide to Applying Human Factors Methods: Human Error and Accident Management in Safety Critical Systems*. Springer. Verlag. London Limited. 2004.
- [CHAALI-DJELASSI & al, 05a] CHAALI-DJELASSI A, POLET P ET VANDERHAEGEN F. *Modélisation de la prise de décision d'un opérateur humain liée au franchissement de barrière*. Application à la conduite automobile. JDMACS. 2005.
- [CHAALI-DJELASSI & al, 05b] CHAALI-DJELASSI A, POLET P ET VANDERHAEGEN F. *Fonctions de pondération des décisions en conduite automobile*. Proceedings of the 6 Multidisciplinary International Conference on Quality and Dependability. ISBN 2-9523929-0-0 ET 2-9523929-1-9. Bordeaux, France, p 171-178, mars, 2005.
- [CHAALI-DJELASSI & al, 06] CHAALI-DJELASSI A, POLET P ET VANDERHAEGEN F. *A Comparative Study Between Subjective and Objective Results of a Predicting Human Behaviour Method Based on the Expected Utility and the Iterative Learning Control. Application to the Car Driving*. Proceedings CD-ROM of the 2006 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, ieee catalog number : 06ch37755c, Taipei, Taiwan, p 192, ISBN 1-4244-0100-3. Octobre, 2006.
- [CHAALI-DJELASSI, VANDERHAEGEN, CACCIABUE & CASSANI, 07] CHAALI-DJELASSI A, VANDERHAEGEN F, CACCIABUE P-C AND CASSANI M. *Barrier Removal prediction based on a new approach. Application to a degraded train speed procedure*. Paper accepted in European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control. Technical University of Denmark. 20-22. June, 2007.
- [CHALMÉ, CHAALI-DJELASSI & ANCEAUX, 06] CHALMÉ S, CHAALI-DJELASSI A & ANCEAUX F. *Subjective Risks and Traffic Violations: First results of an experimental study in driving simulator*. European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control. 2006.
- [DARWICHE & GINSBERG, 92] DARWICHE A. and GINSBERG M.L. *A symbolic generalization of probability theory*. In AAI, volume 10, pages 622–627, 1992.
- [DUBOIS & PRADE, 90] DUBOIS D. and PRADE H. *An introduction to possibilistic and fuzzy logics*. In *Readings in Uncertain Reasoning*. p 742–761. Morgan Kaufmann, 1990.
- [DUBOIS & PRADE, 95] DUBOIS D. and PRADE H. *Possibility theory as a basis of qualitative decision theory*. In IJCAI, volume 14, p 1925–1930. 1995.

- [DUBOIS, FARGIER & PERNY, 03] D. DUBOIS, H. FARGIER, and P. PERNY. *Qualitative decision theory with preference relations and comparative uncertainty: An axiomatic approach*. Artificial Intelligence, 148:219–260, 2003.
- [FADIER, 90] FADIER. E., *Fiabilité Humaine : Méthodes d'analyse et domaines d'application, in les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*. Editions Octares. 1990.
- [FADIER, 97] FADIER. E. *La fiabilité opérationnelle des systèmes automatisés. Habilitation à diriger des recherches*. Institut national polytechnique de Lorraine. Nancy, France. 1997.
- [FERBER, 95] FERBER. J., Les systèmes multi-agent : vers une intelligence collective. InterEditions, Paris, 1995..
- [FISHBURN, 88] FISHBURN P. C. *Nonlinear preference and utility theory*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1988.
- [GARCIA, 97] GARCIA F. et NDIAYE. S.M. *Apprentissage par renforcement en horizon fini I : comparaison du Q-learning et du R-learning*. Revue READ, vol 1. p 15. 1997.
- [GERDES, 97] GERDES. V. *Identification and analysis of cognitive errors – Application to control room operators*. Thèse de doctorat non publiée. University of Technology of Delft, Pays-Bas. 1997.
- [GOGUELIN, 88] GOGUELIN P. *Risque et prise de décision : les concepts, in la prise de risque dans le travail*, coordonné par GOGUELIN P., et CUNY X., pp 21-35, Octares éditions, France, 1988.
- [GOURIVEAU, 03] GOURIVEAU R. *Analyse des risques Formalisation des connaissances et structuration des données pour l'intégration des outils d'étude et de décision*. Thèse soutenue à de l'Institut National Polytechnique de Toulouse. France. Décembre 2003.
- [COOPER, 69] COOPER G E. and HARPER R P. The use of pilot rating in the evluaion of aircraft handling qualities (Report No. NASA TN-D-5153). Mofferr Field, CA: Ames Research Center, National Aeronautics and Space Administration. 1969.
- [HART, 88] HART S. G. and STAVELAND L. E., 1988. *Development of nasa-tlx (task load index) : results of empirical and theoretical research*. In P. A. HANCOCK & N. MESHKATI (Eds), Human mental workload. North-Holland,Advances in psychology, p. 139-185. 1988.
- [HAYWARD & al, 04] HAYWARD V, ASTLEY OR, CRUZ-HERNANDEZ M, GRANT D, ROBLES-DE-LA-TORRE G. *Haptic interfaces and devices*. Sensor Review 24(1), pp. 16-29. 2004.

- [HEINZINGER, FENWICK, PADEN et MIYAZAKI, 1992] HEINZINGER, G., FENWICK, D., PADEN, B. and MIYAZAKI, F. *Stability of learning control with disturbances and uncertain initial conditions*. IEEE Transactions on Automatic Control AC-37, pp. 110-114. 1992
- [HERRERA-VIEDMA, CHICLANA, HERRERA & ALONSO, 06] HERRERA-VIEDMA E., CHICLANA F., HERRERA F., ALONSO S. *A group decision-making model with incomplete fuzzy preference relations based on additive consistency*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B, final version december 2006. in press.
- [HOLLNAGEL, 98] HOLLNAGEL. E. *Cognitive Reliability and error Analysis Method (CREAM)*. Elsevier Science, New York. 1998.
- [HOLLNAGEL, 99] HOLLNAGEL. E. *Accident and barriers*. In: *Proc of the 7th European Conference on Cognitive Science Approches to Process Control*, Villeneuve d'Ascq, France. p. 175-180. 1999.
- [HOWARD & MATHESON , 83] HOWARD RA, MATHESON JE. *The principles and applications of decision analysis*. Menlo Park, CA, Strategic Decisions Group, 1983.
- [HSE, 95] *Health and Safety Executive*. Great Britain. 1995.
- [HUDSON & al, 98] HUDSON. P. T. W., VERSCHUUR. W. L. G., LAWTON. R., PARKER. D., REASON. J. T. *The violation Manual, Bendig the rules II*, Version 1.2, Leiden University. 1998.
- [HUMPHERY, 88] HUMPHERY P. *Human reliability assessors guide*, dans B. A. Sayers (dir.), *Human Factors and Decision Making – Their Influence on Safety and Reliability*, Elsevier, Amsterdam, p. 71-86, 1988.
- [IGNIZIO, 76] IGNIZIO J.P. *Goal programming and extensions*. Lexington Books, Lexington, MA, (1976).
- [ISAAC & al, 03] ISAAC. A., SHORROCK S. T., KENNEDY. R., ANDERSEN. H. and BOVE. T. *The Human Error in ATM Technique (HERA-JANUS)*. *European air traffic management programme*. European organisation for the safety in air navigation, Eurocontrol. 2003.
- [ISD, 94] Ouvrage collectif, sous la direction de FADIER E. *L'état de l'art dans le domaine de la Fiabilité Humaine*, collection ISDF, Octares éditions, 1994.
- [JOHANNSEN, 79] JOHANNSEN G., 1979. *Workload and workload measurement*. In N. MORAY (Ed), *Mental workload: its theory and measurement*. Nato Conference series: III, human factor; Vol 8. PLENUM PRESS, New York, p. 3-11. 1979.

- [JOUGLET, 00] JOUGLET D. *Coopération Homme-machine pour le diagnostic technique: application aux dérangements téléphoniques*. Thèse soutenue à l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. Valenciennes. France. Janvier 2000.
- [KAEHLING & AL, 96] L.P KAEHLING., M.L. LITTMAN. and A.W. MOORE. *Reinforcement learning: A survey*. Journal of artificial intelligence research, vol. 4. p 237-285. 1996.
- [KIRWAN, 97] KIRWAN. B. H. *Validation of human reliability assessment techniques: part2 – Validation issues*. Safetu Science, 27, p 43-75. 1997.
- [KIRWAN, 98] KIRWAN. B. H. *Error identification techniques for risk assessment of high risk systems – Part 1* review and evaluation of techniques, Applied Ergonomics, Vol 29, N°. 3. p 157-177. Part 2 toward a framework approach, Applied Ergonomics, Vol 29, N°. 5. p 299-318. 1998.
- [KOHONEN, 01] KOHONEN. *Self-Organizing Map*. Springer-Verlag, Third edition, Berlin, Heidelberg. Germany. 2001.
- [LAÏCHOUR, 02] LAÏCHOUR H. MAOUCHE S. & MANDIAU R. *Traffic control assistance in connection nodes: multi-agent applications in urban transport systems*. Computing International Scientific Journal, 1. p 37-42. 2002.
- [LEARY, 99] O'LEARY. M. *British Airways human factors reporting programme*. Proceedings of the International Workshop on Human error, Safety, and System Development. Liège, Belgique. 7-8. Juin, 1999.
- [LEE, TAN, LIM & DOU, 2000] LEE T. H., TAN K. K., LIM S. Y. and DOU H. F. *Iterative learning control of permanent magnet linear motor with relay automatic tuning*. Mechatronics, 10, 169-190. 2000.
- [LEHMANN, 96] LEHMANN D. *Generalized qualitative probability : Savage revisited*. In UAI, volume 12, p 381– 388. 1996.
- [LEMOINE, 98] LEMOINE. M-P. *Coopération Hommes-machines dans les procédés complexes: modèles techniques et cognitifs pour le contrôle du trafic aérien*, Thèse de doctorat de l'université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 1998.
- [LEPLAT, 85] LEPLAT. J.-C. *Erreur humaine et fiabilité humaine dans le travail*. Paris, Armand Collin. 1985.
- [LUCE & RAIFFA, 57] LUCE, R.D. & RAIFFA, H. *Games and decisions – Introduction and Critical Survey*. New York. 1957.
- [MANDIAU & al, 02] MANDIAU R, GRISLIN-Le STRUGEON E & PENINOU A. *Organisation et applications des SMA*. Hermés. Paris. ISBN 2-7462-0439-8. 2002.

- [McCLELLAND & al, 53& al, 53] McCLELLAND D C. And LIBERMAN A M. *The effect of need for achievement on recognition of need-related words*. Journal of Personality. 1953
- [MIF, 06] Ministère de l'intérieur français :
http://www.interieur.gouv.fr/misill/sections/a_la_une/statistiques/securite_routiere/infractions-au-code-route/bilan-2003/view. 2006.
- [MILLOT, 87] MILLOT. P. *Coopération Homme-machine dans les tâches de supervision des procédés automatisés*. Thèse soutenue à l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. Valenciennes, France. 1987.
- [MOORE, 93] MOORE K. L. *Iterative Learning Control for Deterministic Systems*. London: Springer-Verlag. 1993.
- [NASA-TLX, 86] NASA TASK LOAD INDEX: paper-and-pencil version. *Moffet Field, CA: Nasa-Ames Research Center, Aerospace Human Factors research Division*. 1986.
- [NF, 91] NF EN 292-1, *Norme française, norme européenne NF EN 292-1, Sécurité des machines – Notions fondamentales, principes généraux de conception – Partie 1 : Terminologie de base, méthodologie*, AFNOR, 1991.
- [NF, 97] NF EN 1050, *Norme française, norme européenne NF EN 1050, Sécurité des machines – Principes pour l'appréciation du risque*, AFNOR, 1997.
- [NUREG, 00] NUREG -0700. Rev. 2. *Human-System interface design review guidelines*. The U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), United States. 2002.
- [O'DONNELL, 79] O'DONNELL. *Contribution of psychophysiological technics to aircraft design and other operational problems*. AGARDOGRAPH n°244, 1979.
- [PARKER & al, 95] PARKER. D., REASON. J., MANSTEAD. S. R., STRADLING. S. G. *Driving errors, driving violations and accident involvement*

- [POLET & al, 00] POLET. P., VANDERHAEGEN. V. *Analysis of deviated modes for risk assessment*. In: Proc of ESREL 2000, Foresight and Precaution Conference, May 2000.
- [POLET & al, 01] POLET. P., VANDERHAEGEN. F., MILLOT. P., WIERINGA. P. *Barrier and risk analysis*. In: Proc of the 8th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems, Kassel, Germany. 2001.
- [POLET & al, 03] POLET. P., VANDERHAEGEN. F., AMALBERTI. R. *Modelling border-line tolerated conditions of use (BTCUs) and associated risks*. Safety Science. Vol 41. Issues 2-3. p 111-136. March 2003.
- [POLET & al, 06] POLET P., MANDIAU R & VANDERHAEGEN F. *Raisonnement à Partir de Cas Distribué pour la prédiction des comportements erronés des opérateurs humains*. 6^{ième} Conférence Francophone de Modélisation et Simulation – MOSIM'06. Rabat. Maroc. Avril 2006.
- [POLET, 02] POLET. P. *Modélisation des franchissements de barrières pour l'analyse des risques des systèmes homme-machine*. Thèse de doctorat non publié. Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis. Valenciennes. 2002.
- [POLET, CHAALI-DJELASSI & VANDERHAEGEN, 06] POLET. P., CHAALI-DJELASSI A, and VANDERHAEGEN F. *Comparaison de deux méthodes de prédiction des erreurs humaines en conduite automobile*. Actes de ErgoIA 2006 "L'humain comme facteur de performance des systèmes complexes", Biarritz, France, p 193-200, ISBN 2-9514772-6-0. Octobre 2006.
- [POMERÔL & BARBA-ROMERO, 93] POMEROL J.-C. and BARBA-ROMERO S. *Choix multicritère dans l'entreprise, principe et pratique*. Hermes, Paris, (1993).
- [RASMUSSEN, 86] RASMUSSEN. J. *Information processing and Human-Machine interaction*. New York : North-Holland. 19986.
- [RASMUSSEN, 83] RASMUSSEN. J. *Skills, Rules, Knowledges ; Signals Signs and Symbols and Other Distribution on Human Performance Models*. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernatics, SMC-13, N° 3, Mai/Juin 1983.
- [RASMUSSEN 97] RASMUSSEN. J. *Risk management in a dynamic society: a modelling problem*. Safety Science Vol 27. N° 2/3. p 183-213. November 1997.
- [RAUFASTE, HILTON, 99] RAUFASTE E. HILTON D J. *Les mécanismes de la décision face au risque* (Une première version de cet article est parue dans la revue Risques n° 39, septembre 1999).
- [REASON, 97] REASON J. *Managing the risks of organisational accidents*. Aldershot, Ashgate. 1997.

- [REASON, 90] REASON J. *Human error*. Cambridge University Press. New York. 1990
- [RIGBY, 70] Rigby, L.V. *The Sandia Human Error Rate Bank*, Sandia Laboratories, Albuquerque, NM. 1967.
- [ROBLES-DE-LA-TORRE & HAYWARD, 01] ROBLES-DE-LA-TORRE G. & HAYWARD V. *Force Can Overcome Object Geometry In the perception of Shape Through Active Touch*. Nature 412 (6845):445-8. 2001.
- [ROBLES-DE-LA-TORRE, 06] ROBLES-DE-LA-TORRE G. *The Importance of the Sense of Touch in Virtual and Real Environments*. IEEE Multimedia 13(3), Special issue on Haptic User Interfaces for Multimedia Systems, pp. 24-30. 2006.
- [ROY & BOUYSSOU, 93] ROY B. and BOUYSSOU D. *Aide Multicritere a la Decision: Methodes et Cas*, Edition Economica (1993).
- [ROY, 85] ROY B. *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Economica. 1985.
- [ROY, 93] ROY B. *Decision science or decision-aid science?* Article European. Journal of Operational Research, Volume 66, Issue 2, 16, p 184-203. April 1993.
- [SAAB, 1994] SAAB, S.S. *On the P-type learning control*. IEEE Transactions on Automatic Control 39, pp. 2298–2302. 1994.
- [SALMINEN, HOKKANEN & LAHDELMA, 96] SALMINEN P., HOKKANEN J. and LAHDELMA R. *Muticriteria Decision Analysis Project on Environmental Problems*, Report 5/1996, Department of Mathematics, Laboratory of Scientific Computing, University of Jyväskylä (1996).
- [SALVENDY, 87, 97] Salvendy. G. *Handbook of Human factors and Ergonomics*. New York : John Wiley and Sons, Inc. 1987/1997.
- [SCHAAF, 97] VAN DER SCHAAF. T.W. *Prevention and recovery of errors in software systems*. Preceeding pf the Workshop on Human Error and System Development. Glasgow, Grande-Bretagne. P. 49-57. 19-22 mars 1997.
- [SCHMIDT, 91] SCHMIDT K. *Cooperative work : a conceptuel framework*, in J. RASMUSSEN, BREHMER B. and LEPLAT J. (eds), *Distributed Decision Making : cognitive models for cooperative works*, UK, John Wiley & sons Ltd, p 75-110, 1991.
- [SCHONPFLUG, 85] SCHONPFLUG W. *On the role of psychophysiological approaches to human information processing*. Elsevier, north Holland, 1985.

- [SHAFER, 76] G. SHAFER. *A mathematical theory of evidence*. Princeton university press, 1976.])
- [SHERIDAN & FERREL, 81] SHERIDAN Thomas B. and FERRELL William R. *Man-Machine Systems: information, control, and decision Models of Human Performance*. 8 April 1981
- [SHERIDAN, 85] SHERIDAN. T.B., *Forty-five years of Human-Machine systems: history and trends. Keynote Address*. Proceedings of 2nd IFAC Conf. on Analysis, Design and Evaluation of Human-Machine Systems. Varese, Italy 10-12, Pergamon, Oxford. September 1985,
- [SPERANDIO, 88] SPERANDIO. J.-C., *Ergonomie du travail mental*, Masson, Paris, 1988.
- [STEUER, 86] STEUER R.E. *Muticriteria Optimization: Theory, Computation, and Application*, Wiley, New York, (1986).
- [SUTTON & BARTO 98] SUTTON R.S. and BARTO A.G. *Reinforcement Learning*. Mit press, Cambridge, Bradford book. p 322. ISBN 0-262-19398-1. 1998.
- [SUTTON 88] SUTTON R.S. *Learning to predict by the methods of temporal differences*. In Machine learning, vol 3. p 9-44. 1988.
- [SWAIN, 83] SWAIN. A.D & GUTTMAN. H. E. *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear power Plant Applications*. NUREG/CR-1278. 1983.
- [SWAIN, 90] SWAIN. A.D. *Human reliability analysis: needs, status, trends and limitation*. Reliability engineering and system safety, vol. 29, pp 301 – 313. 1990.
- [SWAIN, 89] SWAIN A D. *Human reliability analysis: need, status, trends and limitations*, reliability Engineering and System Safety, 29, p 301- 311. 1989.
- [SWAT USER'S GUIDE, 87] SWAT USER'S GUIDE. *Subjective workload assessment technique (swat): a user's guide*. Harry G. ARMSTRONG AEROSPACE MEDICAL RESEARCH LABORATORY, July 1987.
- [TOUZET 93] TOUZET C. *Apprentissage par renforcement neuronal d'un comportement d'obstacles pour le mini-robot Khepera*. Second European congress on systems sciences. Prague. p 5-8. 1993.
- [USN, 89, 00] U.S Nuclear Regulatory Commission (NRC). *Technical Basis and Implementation Guidelines for A Technique for Human Event Analysis (ATHEANA)*. NUREG-1624, Unites Stataes. 1998. 2000.
- [VALANCOGNE & al, 02] VALANCOGNE. J., NICOLET. J. L. *Defense-in-depth: a new systematic and global approach in socio-technical system design to*

- guarantee better the timelessness safety in operation.* In: Proc of Im13/Esrel. Lyon, France. p. 298-305. 2002.
- [VALOT, 89] VALOT C. AMALBERTI R. *Les redondances dans le traitement de données.* Le travail humain, volume 52, n°2, p. 155-174. 1989.
- [VANDERHAEGEN & al, 00] VANDERHAEGEN. F, POLET. P. *Human risk assessment method to control dynamic situation.* In: Proc of 4th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, SAFEPROCESS2000. Budapest, Hungary. P 774-779. June 2000.
- [VANDERHAEGEN & al, 01] VANDERHAEGEN. F and POLET P *.Risk analysis method of human deviation in operationnal situations.* In: Proc conf on Safety, Risk and Reliability – Trend in Engineering. Malta. 21-23 March 2001.
- [VANDERHAEGEN & al, 98] VANDERHAEGEN. F., Telle. B., Gautiez. Z. *Consequence analysis of human reliability during railway traffic control,* COMPRAIL'98 sixith international conference on computer aided design, manufacture and operation in railway and other advanced mass transit. Lisbon, Portugal. September 1998.
- [VANDEHAEGEN, 01] VANDERHAEGEN. F. *A non-probabilistic prodpective and retrospective human reliability analysis method – application to railway system.* Reliability Engineering and System Safety. 71(1). p 1-13. 2001.
- [VANDERHAEGEN, 03] VANDERHAEGEN. F. *Analyse et contrôle de l'erreur humaine.* Hermes. Paris. France. p. 58. 2003
- [VANDERHAEGEN, 99] VANDERHAEGEN. F. *APRECIH: a human unreliability analysis method – application to railways system.* Control Engineering Prectice. p 1395-1403. 1999.
- [VANDERHAEGEN & MILLOT, 2001] VANDERHAEGEN F., MILLOT P . *Cooperative redundancy to control human reliability,* proceeding of the 10th IFAC Symposium on infraction control problems in manufacturing, INCOM'01, 20-22 septembre, Vienna, Austria, 2001.
- [VANDERHAEGEN, 00] VANDERHAEGEN F., POLET P. *Human risk assessment method to control dynamic situations.* Proceedings of the 4th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process, SAFEPROCESS. Budapest, Hongrie, p, 774-779, 14-16 juin 2000.
- [VANDERHAEGEN, CHAALI-DJELASSI & ZHANG, 04] VANDERHAEGEN F., CHAALI-DJELASSI A., ZHANG Z. *Prédiction des erreurs humaines basée sur l'incertitude décisionnelle.* In Actes de la Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA'04, Douz, Tunisie, octobre 2004.
- [VILLEMEUR, 88] VILLEMEUR. A. *Sûreté de Fonctionnement des systèmes Industriels.* Octarès. Toulouse. 1988.

- [VINCENT, 05] VINCENT F. Hendricks, *Thought 2 Talk: A Crash Course in Reflection and Expression*, New York: Automatic Press / VIP. ISBN 87-991013-7-8. 2005.
- [VINCKE, 89] VINCKE Ph. *L'aide multicritere a la décision*, Editions de l'Université Libre de Bruxelles. 1989.
- [WAKKER, 89] WAKKER P. P. *Additive representations of preferences: A new foundation of decision analysis*. Kluwer, Dordrecht, 1989.
- [WIENER & al, 84] WIENER E. L., CURRY R. E. and FAUSTINA M. L., *Vigilance and task load: in search of the inverted U*. Human Factors, 1984, 26(2), p. 215-22.
- [XU & YAN, 04] XU J.-X. and YAN R. *Iterative learning control design without a priori knowledge of the control direction*. Automatica, 40, 1803-1809 2004.
- [NORRLÖF & GUNNARSSON, 05] NORRLÖF and GUNNARSSON S. *A note on causal and CITE iterative learning control algorithms*. Automatica, 41, 345-350. 2005.
- [ZHANG, 00] ZHANG. Z. *Evaluation of significant incidents in terms of technical and human reliability*, technical report of SEREP, IPSN/CEA. France. 2000.
- [ZHANG, 01] ZHANG. Z. *Spécifications d'une méthode pour analyser les conséquences d'erreur humaine*, working paper of LAMIH, Université de Valenciennes. France. Juillet 2001.
- [ZHANG, 04] ZHANG. Z. *Fiabilité humaine : prédiction des violations par réseaux de neurones et application aux systèmes de transport*. Thèse de l'université de Valenciennes.
- [ZHANG, CHAALI-DJELASSI & VANDERHAEGEN, 04] ZHANG Z., CHAALI-DJELASSI A AND VANDERHAEGEN F. *A comparative uncertainty study in prediction of human operator violation using neural networks*. In Proceedings of the IEEE SMC international conference, The Hague, The Netherlands, octobre 2004.
- [ZWINGELSTEIN, 99] ZWINGELSTEIN. *Assessment of the safety of recombinant tissue factor pathway inhibitor in patients with severe sepsis: A multicenter, randomized, placebo-controlled, single-blind, dose escalation study*. Critical care medicine. Official journal of the society of critical care medicine. 1999.

Annexe 1

Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et
Humaines
(LAMIH : UMR 8530)
Equipes SHM & PERCOTEC
Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis (UVHC)
Le Mont Houy F-59313 Valenciennes Cedex 9

Questionnaire A**Note importante :**

Nous nous engageons à garantir la confidentialité des données que vous nous apporterez durant toute cette expérimentation. Ces données ne seront utilisées que pour cette expérience et ne seront en aucun cas communiquées à un tiers. En outre, le traitement de ces données ne sera pas nominatif. Vous pouvez donc librement et le plus honnêtement possible répondre aux questions posées.

A la fin de l'expérience, n'hésitez pas à nous poser toutes vos questions (sur nos objectifs, sur les résultats attendus...) et n'hésitez pas à nous communiquer vos remarques.

Légalement, vous êtes en droit de demander les résultats de cette expérimentation à laquelle vous participez. Si vous nous en faites la demande, nous vous contacterons pour vous présenter le rapport final.

Répondez aux questions en cochant la case correspondant à la réponse adéquate ou en positionnant votre réponse à la manière d'un curseur sur la ligne (échelle).

Quand il n'y a ni case à cocher, ni échelle, répondez en texte libre

Exemples :

Aimez-vous le chocolat ?

OUI

NON

Consommez-vous souvent du chocolat ?

Jamais

_____ | _____

Très souvent

Quels souvenirs associez vous au chocolat ? : une récompense

Nom et Prénom :

Age : Sexe : Date et heure.....

Vous êtes : Droitier Gaucher
 Ambidextre

Portez vous des lunettes en conduisant : Oui Non

Profession ou domaine d'études :

Vous êtes : Droitier Gaucher
 Ambidextre

Portez vous des lunettes en conduisant : Oui Non

Véhicule(s) couramment utilisé(s) :

Année de mise en circulation de ce(s) véhicules(s) :

Quel(s) permis de conduire avez-vous ?

Nombre d'années de conduite :

Nombre de points actuellement sur votre permis :

Quel est le nombre de kilomètres que vous parcourez par semaine

- Moins de 20 km
- Entre 20 et 50 km
- Entre 50 et 100 km
- Entre 100 et 250 km
- Entre 250 et 500 km
- Plus de 500 km

Ou si vous préférez, indiquez le nombre de kilomètre par an :

Dans la majorité de vos déplacements, vous roulez

- Seul(e) En couple
- Avec des amis En famille avec enfant
- Autre Précisez :

Quelles vitesses pratiquez-vous habituellement ?

Agglomération	Départementale	Nationale	Auto route

Avez-vous déjà été victime d'accidents ?

En tant que conducteur (conductrice) : Oui Non
 En tant que passager (passagère) : Oui Non

Si oui (passager ou conducteur), combien ? et durant la dernière année ?

Précisez les circonstances de l'un de ces accidents :

.....

Pourriez-vous classer par ordre d'importance, les types de routes que vous empruntez le plus fréquemment ? (1 : la route la plus empruntée ; 5 : route la moins empruntée)

Agglomération	Départementale	Nationale	Autoroute	Montagne

Pourriez-vous classer par ordre d'importance, les types de routes que vous préférez emprunter ? (1 : la route la plus empruntée ; 5 : route la moins empruntée)

Agglomération	Départementale	Nationale	Autoroute	Montagne

Pour votre premier choix : expliquer pourquoi

Pour votre dernier choix : expliquer pourquoi

En général, êtes vous stressé(e) lorsque vous conduisez ?

Jamais _____ Toujours

Pensez-vous avoir une bonne maîtrise de l'activité de conduite ?

Pas du tout _____
 Tout à fait

Au volant, en général, vous énervez-vous facilement ?

Jamais _____
 Toujours

Êtes-vous agressif(ve) envers les autres usagers de la route (insultes, gestes de la main, appels de phare, coups de klaxon) ?

Jamais _____ Très souvent

En général, vous aimez changer de rapport de vitesse

Rarement

Souvent

Pour vous, la conduite automobile est une activité

Très déplaisante

Très plaisante

Qu'est-ce que pour vous le « confort de conduite » (**en dehors du confort dans le véhicule**) ?

Est-ce que ce style de conduite vous caractérise ? Oui Non

Si non, quel est votre style de conduite ?

Eprouvez-vous fréquemment certaines gênes en conduisant (mal au dos, aux yeux...) ?

Oui

Non

Si oui, lesquelles :

De manière générale, êtes-vous anxieux(se) quand vous conduisez ?

Pas du tout _____ Très

Vous préférez les freinages

réguliers

et légers

vifs et

intenses

Et vous préférez les accélérations

régulières

et légères

vives

et intenses

Vous effectuez...

Moins d'infractions

code de la route

que les autres

Plus d'infractions au

code de la route

que les autres

En général, en conduite en file, avez-vous tendance à suivre de très près le véhicule devant vous ou avez-vous tendance à prendre vos distances ?

Distance

Faible

Distance

Importante

En général, sur autoroute, avez-vous tendance à faire beaucoup de manœuvres (changements de file et dépassements) ?

Oui

Non

Moyennement

Sur autoroute, quelle file avez-vous tendance à occuper ?

Autoroute à 2 voies : voie droite

voie gauche

Autoroute à 3 voies : voie droite

voie milieu

voie gauche

Appréciez-vous de conduire dangereusement ?

Pas du tout _____ Tout à fait

Quels sont les dispositifs automatiques disponibles dans le véhicule que vous avez l'habitude de conduire ?

Parmi ces dispositifs automatiques, quels sont ceux que vous n'utilisez pas ?

Pourquoi ?

Les nouvelles technologies vous rendent-elles anxieux(se) ?

Pas du tout _____ Très

Quand je conduis, je.....

Pense facilement _____ Suis très
à autre chose attentif(ve)

Pensez-vous qu'en général vous conduisez plus vite que les autres conducteurs ?

Oui Non

Dans l'activité de conduite

Je contrôle _____ Je suis à la
ce qui ce passe merci des autres

La conduite

Me coûte _____ Ne me coûte
un gros effort aucun effort

Pensez-vous être un conducteur prudent(e) ?

Peu prudent(e) _____ Très prudent(e)

De manière générale, vous considérez vous comme quelqu'un d'anxieux(se) ?

Pas du tout _____ Très

De façon générale pensez-vous être plus prudent(e) que les autres conducteurs ?

Moins prudent(e) _____ Plus prudent(e)

Prenez-vous plaisir à conduire ?

Pas du tout _____ Tout à fait

Comment caractérisez-vous votre conduite ?

Economique _____ Nerveuse

Les autres conducteurs commettent des infractions

Souvent _____ Jamais

En général, vous doublez

Rarement _____ Très souvent

De façon générale, pensez-vous être plus compétent(e) que les autres conducteurs dans votre façon de gérer l'interdistance ?

Moins _____ Plus
compétent(e) compétent(e)

Dans la conduite automobile, la responsabilité incombe principalement :

A moi _____ Aux autres

En général, lorsque un véhicule situé à votre droite sur une voie d'accélération tente de s'insérer devant votre véhicule, que faites-vous ?

Vous accélérez

Vous ralentissez (« vous levez le pied »)

Vous freinez

Vous ne faites rien de particulier : vous restez sur votre file

Vous changez de file rapidement

Vous avez anticipé l'insertion de ce véhicule depuis longtemps et vous avez déjà changé de file

Dans ce cas, pour quelle raison principale avez-vous changé de file ?

pour faciliter l'insertion du véhicule

pour ne pas être gêné par ce véhicule

Autre possibilité (décrivez-la)

Dans votre conduite de tous les jours, comment estimez-vous votre façon de gérer la distance de sécurité par rapport au véhicule qui vous précède ?

Peu sécuritaire _____ Très sécuritaire

La conduite est une activité :

Très risquée _____ Très
peu risquée

L'influence que l'environnement et le trafic ont sur votre maîtrise du véhicule est :

Très Faible _____ Très élevée

Pouvez-vous évaluer votre niveau actuel de fatigue physique ?

Très Faible _____ Très élevée

Pouvez-vous évaluer votre niveau de stress actuel ?

Très Faible _____ Très élevée

Dans ce cas, pour quelle raison principale avez-vous changé de file ?

- pour faciliter l'insertion du véhicule
- pour ne pas être gêné par ce véhicule
- Autre possibilité (décrivez-la)

Dans votre conduite de tous les jours, comment estimez-vous votre façon de gérer la distance de sécurité par rapport au véhicule qui vous précède ?

Peu sécuritaire Très sécuritaire

La conduite est une activité :

Très risquée Très peu risquée

L'influence que l'environnement et le trafic ont sur votre maîtrise du véhicule est :

Très Faible Très élevée

Pouvez vous évaluer votre niveau actuel de fatigue physique ?

Très Faible Très élevée

Pouvez vous évaluer votre niveau de stress actuel ?

Très Faible Très élevée

Annexe 2

Dans la situation que vous avez vue...

Vous vous sentiez en sécurité

Pas du tout _____ Tout à fait

Avez-vous eu l'impression d'être libre d'agir ?

Pas du tout _____ Tout à fait

La situation que vous venez de rencontrer était-elle risquée ?

Pas du tout _____ Tout à fait

Vous avez eu assez d'espace ?

Pas du tout _____ Tout à fait

Vous avez eu suffisamment de temps ?

Pas du tout _____ Tout à fait

Cette situation était

Très _____ confortable
inconfortable

Vous avez conduit de la même manière que d'habitude

Pas du tout _____ Tout à fait

Les manœuvres ont été

Confortable _____ Inconfortable

A propos du comportement que vous avez effectué dans la situation que vous avez vue :

Avez-vous pris en compte la sécurité ? **Oui** **Non**

Si oui, vous pensiez

diminuer _____ augmenter
la sécurité la sécurité

Avez-vous pris en compte votre liberté d'action ? **Oui** **Non**

Si oui, vous avez cherché à

augmenter _____ diminuer
votre liberté d'action votre liberté d'action

Avez-vous pris en compte le risque ? **Oui** **Non**

Si oui, avez-vous

préféré _____ cherché
augmenter le risque ? à réduire le risque ?

Avez-vous pris en compte l'espace autour de vous ? **Oui** **Non**

Si oui, avez-vous

préféré _____ cherché à
réduire l'espace augmenter l'espace
autour de vous ? autour de vous ?

Avez-vous pris en compte le temps ? **Oui** **Non**

Si oui, avez-vous

préféré _____ cherché à
perdre du temps ? gagner du temps ?

Avez-vous pris en compte le confort ? **Oui** **Non**

Si oui, avez-vous

préféré _____ cherché à
rendre la situation rendre la situation
moins confortable ? plus confortable ?

La décision que vous avez prise a été

Très difficile _____ Très facile
à prendre à prendre

Qu'est-ce vous risquiez ? **(répondez oralement)**

Qu'est-ce que vous risquiez si cela s'était mal passé ? **(répondez oralement)**

Avez-vous eu conscience de ces risques au moment de votre action ?

(répondez oralement)

Parmi ces risques, quels risques vous n'acceptez pas ? **(répondez oralement)**

Consigne d'auto-confrontation

Afin de mieux comprendre tout ce qui s'est passé sur la route, nous allons vous présenter sur cet écran le déroulement de certaines situations.

Ce qui nous intéresse, c'est que vous nous disiez ce que vous aviez à l'esprit à ce moment-là. Ce n'est pas la façon dont vous voyez les choses maintenant, après coup, que nous cherchons à comprendre, mais **la façon dont vous avez vécu les choses à chaud, dans l'action**. Les enregistrements sont là pour vous aider à vous remettre dans la situation telle qu'elle s'est déroulée.

Voici quelques exemples des types d'informations que vous pourriez avoir à nous indiquer :

les informations auxquelles vous avez été attentif ou que vous aviez à l'esprit,
les décisions que vous souhaitiez prendre, ou que vous envisagiez de prendre (même si vous ne les avez finalement pas prises),
les préférences que vous avez prises en compte et les contraintes auxquelles vous avez été confronté pour établir votre décision,
ce que vous compreniez de la situation, de la signalisation et des actions des autres conducteurs même si ces interprétations étaient incorrectes ou si elles ont changé ensuite,
les buts que vous poursuiviez.

Il est donc très important que vous tentiez de voir les choses comme lorsque vous étiez dans l'action. Pour ma part, j'arrêterai parfois le déroulement du film afin que vous commentiez des événements particuliers.

En résumé:

Essayez de nous faire part de ce que vous avez vécu dans l'action ;
N'indiquez que ce que vous aviez à l'esprit au cours de l'action ;



Bibliothèque Universitaire de Valenciennes



00900406