



EVALUATION DE DYSFONCTIONNEMENT D'UN SYSTEME PAR APPROCHE BAYESIENNE: CAS DU SYSTEME FERROVIAIRE

Anass Bouchiba

► To cite this version:

Anass Bouchiba. EVALUATION DE DYSFONCTIONNEMENT D'UN SYSTEME PAR APPROCHE BAYESIENNE: CAS DU SYSTEME FERROVIAIRE. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université d'Angers, 2013. Français. NNT: . tel-00842756

HAL Id: tel-00842756

<https://theses.hal.science/tel-00842756>

Submitted on 9 Jul 2013

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.

EVALUATION DE DYSFONCTIONNEMENT D'UN SYSTEME PAR APPROCHE BAYESIENNE : CAS DU SYSTEME FERROVIAIRE

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Sciences de l'Ingénieur

**ECOLE DOCTORALE D'ANGERS
ECOLE DOCTORALE DE L'EMI**

**Présentée et soutenue publiquement
Le 22 Janvier 2013**

A l'Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers

Par Anass BOUCHIBA

Devant le jury ci-dessous:

Mohamed TKIOUAT	Président/Examineur	Professeur à l'EMI/Université Mohamed V-RABAT
Benoît IUNG,	Rapporteur	Professeur à l'Université de Lorraine-Nancy
Houda EL OUFIR	Rapporteur	Professeur à l'EST/Université Mohamed V-RABAT
Mihaela BARREAU	Co-Encadrante	MCF/HDR à l'ISTIA/Université d'Angers
Abdessamad KOBI	Directeur de Thèse	Professeur à l'ISTIA/Université d'Angers
Abdelghani CHERKAoui	Directeur de Thèse	Professeur à l'EMI/Université Mohamed V-RABAT
Moha KHADDour	Invité	Directeur du Pôle Sécurité et Contrôle de l'O.N.C.F
Noureddine HMidani	Invité	Directeur Technique de la Société de Tramway Rabat/Salé (S.T.R.S)

Laboratoire en Sécurité de fonctionnement, Qualité et Organisation
62, avenue Notre Dame du Lac
49000 ANGERS

Laboratoire du Génie Industriel de l'Ecole Mohammadia d'Ingénieurs (IMOSYS)
Avenue Ibn Sina B.P 765 Agdal Rabat Maroc



Remerciements

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a été effectué au sein de deux laboratoires : le **L**aboratoire en **S**ûreté de fonctionnement, **Q**ualité et **O**rganisation (LASQUO) de l'Université d'Angers et le laboratoire du Génie Industriel de l'Ecole Mohammadia d'Ingénieurs (EMI) de l'Université Mohammed V à Rabat.

Ce travail a été aussi accompli en collaboration avec l'Office National des Chemins de Fer (O.N.C.F) chargé de l'exploitation du réseau ferroviaire au Maroc, et la Société du Tramway de Rabat/Salé (S.T.R.S), chargée de l'exploitation des lignes du Tramway dans les deux villes Rabat et Salé.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à M. Abdessamad KOBI, Professeur à l'Université d'Angers, et M. Abdelghani CHERKAOUI, Professeur à l'EMI pour avoir assuré la direction de mes travaux et pour la qualité de leur encadrement. Tout au long de ces années de thèse, ils ont su m'apporter leur expérience, leur soutien et leur disponibilité qui ont permis la réussite de ce travail. Ils m'ont aussi témoigné de leur patience, confiance et optimisme qui m'ont permis d'avancer sur ma recherche dans de bonnes conditions, malgré les contraintes liées à mon travail dans le secteur privé de l'ingénierie.

J'adresse également mes remerciements à Mme Mihaela BARREAU, Maître de Conférences Habilité à Diriger des Recherches de l'Université d'Angers, Co-encadrante de cette thèse, pour son aide et sa disponibilité.

Je remercie aussi M. Benoit IUNG, Professeur à Université de Lorraine, Nancy, pour avoir accepté d'étudier mes travaux avec beaucoup d'intérêt et d'être rapporteur de ma thèse.

J'adresse mes vifs remerciements à Mme Houda EL OUFIR, Professeur à l'Ecole Supérieure de Technologie (EST) de l'Université Mohamed V, pour avoir accepté de rapporter mon mémoire et pour l'intérêt qu'elle a bien voulu porter à ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à M. Mohamed TKIOUAT, Professeur au Génie Industriel de l'EMI de Rabat, qui m'a fait l'honneur d'avoir accepté de prendre part au jury et d'être examinateur de ce mémoire de thèse.

Je tiens à remercier aussi Mme Najiba SBIHI, Professeur au Génie Industriel de l'EMI de Rabat et responsable de l'UFR pour sa confiance, son encouragement et aussi pour l'intérêt qu'elle a porté à mes travaux de recherche.

Un grand merci à M. Moha KHADDOUR, Inspecteur Général Sécurité de l'Office National des Chemins de Fer (ONCF) et M. Nouredine HMIDANI, Directeur Technique de la Société de Tramway Rabat/Salé (STRS), de m'avoir accueilli au sein de leurs organismes et d'avoir participé à la réalisation de ce travail par les échanges et discussions constructives, et par la mise à ma disposition des données de Retour d'EXpérience relatives aux incidents survenus aux Passages à Niveau et Tramway.

Mes remerciements vont à tout le personnel des deux laboratoires LASQUO et Génie Industriel de l'EMI qui m'ont accueilli durant ces années de thèse. L'ambiance chaleureuse est propice à un travail efficace.

Je remercie particulièrement ma famille pour la compréhension des impératifs qu'entraîne un tel travail, et pour leur encouragement et leur soutien moral. Un grand remerciement s'adresse à mon frère Moncif qui a su gérer pendant mes absences fréquentes lors de mes déplacements à l'Université d'Angers, toutes mes obligations familiales et professionnelles.

Je voudrais rendre hommage à tous ceux qui, de près ou de loin, à leur manière m'ont aidé à mener à bien cette thèse.

J'exprime enfin toute mon affection à mes deux enfants Malak et Samy, à qui je n'ai pas pu consacrer beaucoup de temps durant cette période d'études, je leur dédie ce mémoire.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : La Sûreté de Fonctionnement des systèmes	
I.1. Introduction.....	8
I.2. Notion de système	8
I.2.1.Complexité du système	8
I.2.2.Vue structurelle ou statique	10
I.2.3.Vue temporelle ou dynamique	10
I.2.4.Approche systémique et ingénierie système.....	11
I.3. Performance d'un système	13
I.3.1.Définition	13
I.3.2.Mesure et évaluation.....	14
I.4. La sûreté de fonctionnement dans l'évaluation de la performance du système	15
I.4.1.Définition de la Sûreté de Fonctionnement	15
I.4.2.Composantes de la SdF	16
I.4.2.1.Fiabilité	16
I.4.2.2.Maintenabilité.....	16
I.4.2.3.Disponibilité	17
I.4.2.4.Sécurité.....	17
I.4.2.5.Durabilité	17
I.4.3.Métriques de la Sûreté de Fonctionnement	17
I.4.4.Analyse de la Sûreté de Fonctionnement	18
I.5. Les approches de Sûreté de Fonctionnement	20

I.5.1.Approches qualitatives ou quantitatives	20
I.5.2.Approches inductives ou déductives	21
I.5.3.Approches statiques/dynamiques	21
I.6. L'analyse et la modélisation fonctionnelle	22
I.6.1.Acquisition des informations	22
I.6.2.Méthodes fonctionnelles	23
I.6.3.Méthodes statistiques	27
I.6.4.Méthodes de simulation	27
I.7. L'analyse de dysfonctionnement	27
I.7.1.AMDEC	28
I.7.2.Analyse Préliminaire des Risques (APR)	32
I.7.3.HAZOP (Hazard and operability)	34
I.7.4.Arbre de fautes (AF) ou Arbre de Défaillance (AdD)	36
I.7.5.Analyse par Arbre d'Évènements	38
I.7.6.Diagramme de Fiabilité (DF)	40
I.8. L'analyse de dysfonctionnement par les outils de la théorie stochastique	40
I.8.1.Outils de calculs probabilistes	41
I.8.2.Réseaux Bayésiens	41
I.8.3.Réseaux de Petri stochastiques	42
I.8.4.Graphes de Markov	45
I.8.5.Simulation de Monte-Carlo	47
I.9. Conclusion	48

Chapitre II : Sûreté ferroviaire au niveau du Passage à Niveau: Problématique et état de l'art

II.1. Introduction.....	50
II.2. Les modèles de risques de sûreté ferroviaire	51
II.2.1.Données requises pour la modélisation.....	51

II.2.2.Importance du comportement humain	52
II.2.3.Le modèle de risque SELCAT	54
II.2.4.Modèle du risque collision par réseau de Petri Stochastiques (RdPS).....	59
II.2.4.1.Modélisation du côté ferroviaire	60
II.2.4.2.Modélisation du côté routier	60
II.2.4.3.Modélisation du système de protection du PN	61
II.2.4.4.Modélisation du système global.....	62
II.2.4.5.Dynamique du modèle.....	62
II.2.4.6.Simulation du risque collision	63
II.2.5.Approche d'évaluation du Passage à Niveau par analyse fonctionnelle....	64
II.2.6.Autres approches	67
II.3. Conclusion et discussion sur les limites des modèles	70
II.4. Proposition d'une approche fondée sur le Retour d'Expérience et l'approche Bayésienne	72
 Chapitre III : Sûreté de Fonctionnement des Passages à Niveau ONCF	
III.1. Introduction	77
III.2. Notions du risque	78
III.2.1.Notion de gravité	78
III.2.2.Notion de fréquence d'occurrence.....	79
III.2.3.Notion de fréquence d'exposition.....	79
III.2.4.Classification du risque.....	80
III.2.4.1.Risque négligeable	80
III.2.4.2.Risque acceptable	81
III.2.4.3.Risque Tolérable	81
III.2.4.4.Risque indésirable	81
III.2.4.5.Risque résiduel	81
III.3. Définition de l'analyse des risques.....	81
III.3.1.Démarche de l'analyse des risques	82

III.3.2.Méthodes de l'analyse des risques	86
III.4. Les facteurs influençant la sécurité d'un système.....	88
III.4.1.Les facteurs génériques	89
III.4.2.Les facteurs spécifiques du domaine d'activité	89
III.4.3.Les facteurs du comportement humain.....	89
III.5. Système de gestion de la sécurité de l'ONCF.....	90
III.6. Analyse des risques à l'ONCF	94
III.6.1.Evaluation des risques au niveau de l'ONCF.....	94
III.7. Les Passage à Niveau de l'ONCF	95
III.7.1.Classement des PN.....	96
III.7.2.Passage à Niveau pour piétons et particuliers	98
III.8. Analyse des risques des Passage à Niveau ONCF	99
III.8.1.Risques identifiés.....	99
III.8.2.Amélioration de l'évaluation des risques adoptée par l'ONCF	101
III.9. Conclusion	102

Chapitre IV: Les Réseaux Bayésiens

IV.1. Généralités.....	106
IV.2. Structure du Réseau Bayésien (RB)	107
IV.3. Théorème de Bayes.....	108
IV.4. Notion de causalité et relations entre les noeuds	109
IV.4.1.Cas de deux variables discrète	109
IV.4.2.Cas de deux variables discrète et continue	110
IV.4.3.Cas de deux variables discrète et continue	111
IV.5. Calculs d'inférences dans un Réseau Bayésien	111
IV.6. Exemples de Réseau Bayésien	112
IV.6.1.Exemple 1 : machine dans un atelier	112
IV.6.2.Exemple 2 : Détection de fraude d'une carte bancaire	115
IV.7. Les approches d'apprentissage des Réseaux Bayésiens	119

IV.7.1.Apprentissage des paramètres	120
IV.7.1.1.Apprentissage des paramètres avec une base de données complète.....	120
IV.7.1.2.Apprentissage des paramètres avec une Base de Données incomplète.....	121
IV.7.2.Apprentissage de la structure du graphe avec des données complètes ...	122
IV.7.2.1.Algorithmes basés sur la recherche d'indépendances conditionnelles	123
IV.7.2.2.Algorithmes basés sur un score	124
IV.7.3.Apprentissage de la structure du graphe avec des données incomplètes	125
IV.8. Les Réseaux Bayésiens dynamiques	126
IV.9. Diagramme d'influence	127
IV.10. Conclusion	129

Chapitre V : Le Modèle Bayésien d'évaluation du risque collision au niveau du PN

V.1. Analyse fonctionnelle du système Passage à Niveau	133
V.2. Analyse de dysfonctionnement du système Passage à Niveau.....	134
V.3. Structure du Réseau Bayésien à partir de l'Arbre de Fautes.	137
V.3.1.Conditions pour une mutation de l'AF au RB.....	137
V.3.2.Limites constatées de l'AF dans l'analyse du risque collision	139
V.4. Base de données des Incidents des PN.....	141
V.4.1.Acquisition de la base de donnée des incidents PN	141
V.4.2.Revue des statistiques sur les incidents aux PN	142
I.4.2.1.Emplacement.....	142
I.4.2.2.Type et fonction des véhicules en cause	142
I.4.2.3.Signalisation et systèmes d'avertissement.....	143
I.4.2.4.Statistiques annuelles et conditions temporelles.....	143
V.4.3.Retour d'Expérience (REX) des incidents PN	144
V.4.4.Traitement et exploitation des données des incidents PN	146

V.5. Modèle bayésien des incidents aux PN ONCF	147
V.5.1.Les différents types de noeuds	147
V.5.2.Apprentissage de la structure.....	148
V.6. Simulations sur le modèle Bayésien.....	150
V.6.1.Simulation n°1 : PN gardés 100%.....	150
V.6.2.Simulation n°2 : Signalisation, Viabilité, Visibilité 100%	152
V.6.3.Simulation n°3 : Imprudence 0%	154
V.6.4.Simulation n°4 : Erreurs humaines 0%	155
V.7. Validation du modèle établi	156
V.8. Conclusions	161

Chapitre VI : Le Modèle Bayésien d'évaluation du risque accident au niveau du TRAMWAY Rabat/Salé

VI.1. Présentation du Tramway RABAT/SALE	165
VI.1.1.Introduction	165
VI.1.2.Le réseau du Tramway de Rabat/Salé.....	166
VI.1.2.1.Les lignes du Tramway	167
VI.1.2.2.Les stations du Tramway	168
VI.1.2.3.L'aménagement de la plateforme du Tramway	169
VI.1.2.4.Qualité urbaine et environnementale du Tramway.	169
VI.2. Analyse des accidents du Tramway.....	170
VI.2.1.Les champs de la base de données.....	171
VI.2.2.Analyse des statistiques des accidents du Tramway	173
VI.2.2.1.Emplacements	173
VI.2.2.2.Type des tiers en cause.....	175
VI.2.2.3.Statistiques mensuelles des accidents	175
VI.2.2.4.Gravité des accidents survenus.....	176
VI.2.2.5.Répartition des accidents par lignes	176
VI.2.2.6.Répartition des accidents par type de voie	177

VI.2.2.7.Répartition des accidents par heure de journée	177
VI.2.3.Revue et exploitation de la base de donnée Tramway	178
VI.3. Modèle bayésien des accidents Tramway.....	180
VI.3.1.Les différents types de noeuds	180
VI.3.2.Apprentissage de la structure	181
VI.4. Simulations sur le modèle Bayésien	183
VI.4.1.Simulation n°1 : Evitabilité des accidents par le conducteur du Tramway améliorée à 80%	183
VI.4.2.Simulation n°2 : Respect du code de la route 100% par les tiers.....	185
VI.4.3.Simulation n°3 : Visibilité bonne à 100%.....	186
VI.4.4.Simulation n°4 : Evitabilité des accidents 80% et 50% des accidents de types corporel 1 et matériel 1.....	187
VI.5. Conclusion	189
Conclusions.....	191
Bibliographie	194

Liste des figures

Chapitre I

- Fig.1 Système compliqué et système complexe
- Fig.2 Mesures et pilotage de la performance
- Fig.3 Durées moyennes associées à la Sûreté de Fonctionnement
- Fig.4 Analyse de sûreté de fonctionnement
- Fig.5 Description d'un système
- Fig.6 Diagramme bête à corne
- Fig.7 Diagramme de pieuvre
- Fig.8 Bloc Diagramme Fonctionnel
- Fig.9 Analyse de dysfonctionnement
- Fig.10 Organigramme de la méthode AMDE (NF EN 60812)
- Fig.11 Logigramme de l'étude des déviations HAZOP
- Fig.12 Exemple d'Arbre de Défaillance
- Fig.13 Arbre d'événement « tuyau de gaz arraché »
- Fig.14 Diagramme de fiabilité
- Fig.15 Outils de la théorie stochastique
- Fig.16 Exemple de Réseau Bayésien
- Fig.17 Exemple de réseau de Petri
- Fig.18 Exemple de modèle de Markov

Chapitre II

- Fig.1 Répartition des causes des accidents au niveau des Passages à Niveau en GB
- Fig.2 Niveaux de détails des modèles de risques des PN (SELCAT)
- Fig.3 Illustration des trois composantes du modèle de risque des PN SELCAT
- Fig.4 Arbre de cause des accidents au niveau du PN type AHB
- Fig.5 Modèle élémentaire Rdp du côté ferroviaire
- Fig.6 Modèle élémentaire Rdp du côté routier
- Fig.7 Modèle élémentaire du système de protection du PN
- Fig.8 Modèle global du système PN avec Rdp
- Fig.9 Résultats du modèle Rdp du PN pour N=6
- Fig.10. Analyse fonctionnelle du Passage à Niveau
- Fig.11 Analyse fonctionnelle du PN type AHB sans détecteur d'obstacle
- Fig.12 Analyse fonctionnelle du PN type AHB avec détecteur d'obstacle
- Fig.13 Profils des vitesses moyennes d'approches du PN
- Fig.14 Schéma du modèle de risque du système ferroviaire sous Réseau Bayésien
- Fig.15 Schéma du modèle de risque du PN sous Réseau Bayésien

Chapitre III

- Fig.1 Classification des risques
- Fig.2 Zone ALARP
- Fig.3 Méthodes d'analyses des risques qualitatives
- Fig.4 Facteurs d'influence humains du risque ferroviaire [EN50126]
- Fig.5 Roue de Deming d'amélioration continue
- Fig.6 Architecture du système de gestion de la sécurité ferroviaire de l'ONCF
- Fig.7 Processus « Gestion des Risques »
- Fig.8 Principe de l'évaluation des risques adopté par l'ONCF

Chapitre IV

- Fig.1 Exemple de Réseau Bayésien
- Fig.2 Réseau Bayésien classique avec observation « machine en arrêt »
- Fig.3 Réseau Bayésien classique avec observation « P (panne de courant)=0.5 »
- Fig.5 Inférence du graphe du Réseau Bayésien pour détecter la fraude par carte de crédit
- Fig.6 Inférence du graphe du Réseau Bayésien suite observation Age = 30-50, Sex = Homme, Achat Bijoux = Oui.
- Fig.7 Réseau Bayésien dynamique
- Fig.8 Diagramme d'influence sous Réseau Bayésien

Chapitre V

- Fig.1 Décomposition fonctionnelle du système PN
- Fig.2 Système d'évaluation du type d'incident au niveau du PN
- Fig.3 Arbre de Faute du risque collision au PN
- Fig.4 Transformation depuis l'Arbre de Fautes (AF) au réseau Bayésien (RB)
- Fig.5 Présentation des portes logiques OU et ET dans l'AF et le RB
- Fig.6 Répartition des incidents par type de véhicule (2000 à 2008)
- Fig.7 Collisions annuelles (2000 à 2008)
- Fig.8 Répartition des collisions par mois (2000 à 2008)
- Fig.9 Structure par apprentissage du Réseau Bayésien des incidents PN
- Fig.10 Réaffectation des associations du Réseau Bayésien des incidents PN
- Fig.11 Résultats de l'apprentissage du Réseau Bayesian des incidents PN ONCF (217 incidents)
- Fig.12 Définition du nœud cible "Type Incidents" et simulation PN gardés 100%
- Fig.13 Estimation des incidents PN (127) suite à la simulation des PN gardés 100%
- Fig.14 Nœuds signalisation conforme 100%, viabilité bonne 100%, visibilité bonne 100% et imprudence 0%
- Fig.15. Résultat de l'inférence du graphe causal après simulation signalisation conforme 100%, viabilité bonne 100%, visibilité bonne 100% et imprudence 0%
- Fig. 16 Résultats de l'inférence du graphe causal après simulation de l'imprudence 0%
- Fig. 17 Résultats de l'inférence du graphe causal après simulation de l'imprudence 0%
- Fig. 18 Résultats de l'inférence du graphe causal après simulation de l'imprudence 0%, accident 0%, et pannes 0%
- Fig.19 Résultats de l'inférence du graphe causal de la base de données 2007
- Fig.20 Résultats de l'inférence du graphe causal de la base de données 2008
- Fig.21 Reproduction des mêmes états des modalités des nœuds du modèle RB (2008)

Fig.22 Simulation des modalités du nœud ‘type incident’ dans le modèle RB (2007)

Chapitre VI

Fig.1 Répartition du budget de lancement du Tramway Rabat/Salé

Fig.2 Répartition géographique des deux lignes du Tramway Rabat/Salé

Fig.3 Plan des deux lignes L1 et L2 du Tramway Rabat/Salé

Fig.4 Caractéristiques du réseau du Tramway Rabat/Salé

Fig.5 Répartition des collisions par mois (2011 à mai 2012)

Fig.6 Répartition des accidents par type de tiers (juin 2011 à mai 2012)

Fig.7 Statistiques des accidents mensuels (juin 2011 à mai 2012)

Fig.8 Répartition des accidents par gravité (juin 2011 à mai 2012)

Fig.9 Répartition des accidents par ligne (juin 2011 à mai 2012)

Fig.10 Répartition des accidents par voie (juin 2011 à mai 2012)

Fig.11 Répartition des accidents par heure de journée (juin 2011 à mai 2012)

Fig.12 Système d'évaluation du type d'accident avec le Tramway

Fig.13 Structure par apprentissage du Réseau Bayésien des accidents du Tramway

Fig.14 Réaffectation des associations du Réseau Bayésien des accidents du Tramway

Fig.15 Résultats de l'apprentissage du Réseau Bayesian des accidents Tramway

Fig.16 Simulation évitabilité des accidents par le conducteur du Tramway améliorée à 80%

Fig.17 Résultats de l'inférence du graphe causal après simulation évitabilité 80%

Fig.18 Nœud comportement tiers avec 100% respect du code de la route

Fig.19 Résultats de l'inférence du graphe causal après simulation non respect du code 0%

Fig.20 Simulation visibilité bonne à 100%

Fig.21 Résultats de l'inférence du graphe causal après simulation de la visibilité bonne à 100%

Fig.22 Simulation de l'évitabilité 80%, accidents C1 50% et accidents M1 50%

Fig.23 Résultats de l'inférence du graphe causal après simulation de l'évitabilité 80%, accidents C1 50% et accidents M1 50%

Liste des tableaux

Chapitre I

Tab.1 : Tableau d'analyse fonctionnel
Tab.2 : Tableau AMDEC
Tab.3 : Exemple de cotation de 1 à 4 pour une analyse AMDEC
Tab.4 : Tableau type de la méthode APR

Chapitre II

Tab.1 : Objectifs fournis par les différents niveaux du modèle SELCAT

Chapitre III

Tab.1 : Echelles de gravité selon la norme NF EN 50126
Tab.2 : Echelles de fréquence d'occurrence selon la norme NF EN 50126
Tab.3 : Matrice Gravité/Occurrence selon la norme NF EN 50126
Tab.4 : Définition des niveaux de SIL
Tab.5 : Classification des gravités des risques
Tab.6 : Exemple de classification de gravité pour les risques ONCF
Tab.7 : Exemple de liste de classement des PN

Chapitre IV

Tab.1 : Table de probabilité conditionnelle avec nœud et parent discrets
Tab.2 : Table de probabilité conditionnelle avec nœud continu et parent discret
Tab.3 : Algorithmes d'apprentissage en fonction de la structure et l'observabilité
Tab.4 : Nombre de GDA existants en fonction du nombre de nœuds

Chapitre V

Tab.1 : Base de données brute des Incidents PN
Tab.2 : Extrait de la nouvelle base de données (217 incidents entre 2007-2008)
Tab.3 : Caractéristiques des nœuds du Réseau Bayésien
Tab.4 : Valeurs simulées et calculées des probabilités des modalités 'type d'incident' dans les modèles RB 2007 et RB 2008

Chapitre VI

Tab.1: Extrait de la base de données des accidents Tramway Rabat/Salé
Tab.2 : Extrait de la nouvelle base de données améliorée (juin 2011 à mai 2012)
Tab.3: Modalités des nœuds du Réseau Bayésien

Liste des photos

Chapitre II

Photo.1 Collision entre un train et un bus scolaire

Photo.2 Passage à Niveau automatique à demi-barrières

Chapitre III

Photo.1 Passage à Niveau non gardé

Photo.2 Passage à Niveau gardé

Photo.3 Ligne de visibilité restreinte

Photo.4 Passage à Niveau mal conçu

Photo.5 Zone de croisement dégradée

Chapitre IV

Photo.1 Tramway Rabat/Salé à la place AL JOULANE

Photo.2 Tracé latéral du Tramway

Photo.3 Croisement du Tramway avec les piétons

Photo.4 Collision du Tramway avec une voiture légère

Photo.5 Croisement du Tramway de type giratoire avec la route

Introduction générale

Le transport par voie ferrée urbain et non urbain (tramway, train) fait l'objet de développements de plus en plus importants au Maroc en raison de leur qualité de transport de masse peu polluant, et des avantages qu'il procure : coût de transport à la portée des voyageurs en comparaison avec le coût excessif des carburants et frais d'acquisition et d'entretien des voitures, diminution de l'encombrement et de la pollution automobile dans les villes, principalement dans les artères menant aux quartiers administratifs, touristiques et industriels, mais aussi gain de temps de transport, vu que ce mode de transport utilise une voie dédiée.

Les évolutions de technologie de ce mode de transport visent à assurer les performances de rapidité, de possibilité de circulations hétérogènes (train à grande vitesse, train marchandise, croisement avec les usagers de la route, etc.), mais aussi de garantir la qualité de service attendue par les clients en termes de confort, proximité, fréquence des trains, informations, etc.). Aussi, les concepteurs ont recours massivement aux technologies innovantes pour répondre à ces besoins et aussi pour répondre aux contraintes économiques liées à la mondialisation des marchés.

Ce développement de transport ferroviaire s'accompagne évidemment d'une amélioration continue de la sécurité, qui reste une des préoccupations principales dans ce domaine de transport, où les accidents continuent à engendrer d'importants dégâts, et causer un nombre élevé de victimes.

L'occurrence d'accidents peut entraîner une perte de confiance des utilisateurs de ce mode de transport, et une mauvaise image de marque des organismes gérant ces modes de transport vis à vis de l'opinion publique. Cette dernière refuse d'être exposée à ces risques mortels en toute légitimité.

La maîtrise des risques de transport ferroviaire, implique d'une part l'identification et la prévision des risques, et d'autre part, la réduction de ces risques en agissant sur les moyens de diminution de leurs occurrences, leurs gravités, l'atténuation de leurs conséquences grâce à des moyens d'évitement et de protection contre les risques.

Au Maroc, le réseau ferroviaire de l'Office National des Chemins de Fer (ONCF) comporte plus de 521 Passages à Niveau (PN), soit une moyenne de 25 PN par 100 Km de voie ferrée, dont 80% environ ne sont pas gardés, et enregistre une dizaine de collisions par an. Chaque année, l'ONCF en cofinancement avec quelques organismes et les autorités locales, investit pour éliminer les Passages à Niveau les plus risqués. A cet effet, l'ONCF a déployé un vaste programme de suppression de ces PN au cours de son plan de développement et dont l'objectif est d'en réduire le nombre de 50% (256 PN) à l'horizon 2025 et de 100% dans les agglomérations à forte densité.

Un autre réseau ferroviaire récemment mis en service dans la ville de Rabat, est le Tramway. Ce réseau qui s'étend sur une longueur de 20 Km a été conçu pour répondre à la demande en transport dans l'agglomération et contribuer à la résolution des problèmes de fluidité du trafic, grâce à ce mode de transport propre, rapide, économique, confortable et accessible. Le Tramway a pour objectif à terme de transporter au minimum 60 millions de voyageurs par an en pleine exploitation.

L'insertion urbaine du Tramway n'a pas été sans effet sur la ville, les accidents entre le Tramway et les usagers de la route qu'ils soient des piétons ou véhicules continuent à avoir lieu, et on enregistre une dizaine d'accidents par mois de différentes gravités.

Dans ce contexte, le présent travail vise à développer un outil d'évaluation et d'analyse des risques au niveau des Passages à Niveau pour le réseau ferroviaire de l'ONCF, et au niveau de l'emprise de passage du Tramway dans les deux villes, basé en premier lieu sur une analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle de ces deux systèmes, puis amélioré par une modélisation du risque par Réseaux Bayésiens (RB).

En effet, l'approche Bayésienne dans l'évaluation des dysfonctionnements et la quantification des risques encourus, constitue une approche dynamique d'analyse, permettant ainsi la prise en compte des aspects comportemental et temporel du système (événements liés au facteur humain ou matériel, événements aléatoires des accidents, conséquences non maîtrisées des accidents etc.).

Cette approche Bayésienne basée sur les probabilités conditionnelles permet d'établir une prévision à partir des données recueillies du passé REX (Retour d'EXpériences). A cet effet, le modèle proposé nécessite comme données d'entrée la

connaissance parfaite du système étudié, résultant des études fonctionnelles et dysfonctionnelles, ainsi que l'acquisition des données qui peuvent être soit de nature événementielle sous forme brute: états, historiques des événements etc., soit sous forme de lois mathématiques décrivant les fonctions de distribution des événements.

Le premier chapitre de ce présent rapport présente l'intérêt de la conception, l'analyse et la maîtrise du fonctionnement des systèmes qui peuvent être complexes, sous une approche systémique, dont l'un des grands avantages est la mise en évidence des interactions arborescentes au sein du système qui traduisent son comportement. Nous aborderons aussi dans ce chapitre et dans le cadre de l'ingénierie système, les différents concepts d'analyse de sûreté de fonctionnement des systèmes dans le but d'améliorer leurs performances.

Le deuxième chapitre aborde les modèles d'analyse de la sûreté ferroviaire, en particulier au niveau des Passages à Niveau (PN). La plupart de ces approches d'analyse ont concerné le développement des techniques de modélisation des risques, que ce soit sous forme arborescente ou autre [SELC08] [Ghaz08] [Simo10] etc. Nous évoquerons aussi dans ce chapitre quelques limites constatées de ces modèles à appréhender le système dans sa globalité et tenir en compte de toutes les interactions entre ses composantes, vu que ces modèles ont traités soit les aspects techniques et technologiques, soit les aspects relevant de la composante humaine.

Pour comprendre la démarche de gestion de la sécurité ferroviaire, en particulier au niveau de l'ONCF, nous présenterons dans le troisième chapitre, les méthodes et outils adoptés par l'ONCF pour l'identification, l'évaluation et la maîtrise des risques. Nous traiterons l'exemple des risques au niveau des Passages à Niveau, qui reste l'endroit le plus dangereux dans le réseau ferroviaire, où les accidents continuent à avoir lieu engendrant des dégâts matériels et humains. Nous présenterons finalement, et pour mieux connaître le fonctionnement du PN, ses principales réglementations, caractéristiques et définitions.

Pour souligner l'intérêt et les avantages que peut procurer notre modèle de risque, le quatrième chapitre sera consacré à une présentation des Réseaux Bayésiens, leurs principes, les calculs et méthodes d'inférence et d'apprentissage de leurs structures et paramètres. Ces Réseaux Bayésiens peuvent à la fois représenter les relations de

dépendances entre un événement indésirable (la défaillance d'un système ou un accident) et les causes de cet événement, ou aussi permettre la découverte par apprentissage, de l'ensemble des relations probabilistes présentes dans les données de Retour d'EXpérience si elles sont disponibles, permettant ainsi d'identifier les liens entre les facteurs de risque.

Dans le cinquième chapitre, et dans le cadre de l'analyse des risques au niveau du Passages à Niveau, nous expliquerons également notre démarche d'analyse de fonctionnement et de dysfonctionnement du PN. Nous expliquerons notre méthodologie d'acquisition auprès de l'ONCF, des connaissances et informations relatives à la sinistralité, pour construire une première base de données sur laquelle s'appuient la modélisation et l'analyse proprement dite du système PN. Nous présenterons aussi notre démarche pour transformer cette base de données brute en une base de données exploitable par notre outil de modélisation par Réseaux Bayésiens. Nous justifierons aussi le recours à l'approche Bayésienne comme outil stochastique de modélisation complet et cohérent pour l'acquisition, la représentation et l'utilisation des connaissances dans la construction du modèle permettant l'évaluation des risques au niveau du croisement de la route et la voie ferrée.

Nous présenterons aussi dans ce chapitre, le modèle Bayésien construit du risque collision au niveau du Passage à Niveau, ainsi que les différents résultats d'inférences entre les nœuds du graphe. Nous allons mettre aussi des évidences ou des observations, à travers différents cas de simulation des états des nœuds de notre modèle, pour estimer l'impact de ces observations sur le risque redouté, qui est la collision. Cet aspect fort de notre modèle à faire des prévisions par simulations à partir des données recueillies du passé (REX), nous permettra d'évaluer quantitativement la pertinence de quelques actions visant la réduction des accidents au droit des PN, et donc évaluer la performance des actions sécurité à entreprendre (efficacité, efficience et effectivité).

Le sixième chapitre sera consacré à l'analyse des risques du système de transport Tramway de Rabat/Salé. Ce nouveau cas d'étude et d'analyse par Réseaux Bayésiens prendra en considération les particularités du Tramway, qui est un mode de transport urbain, empruntant le même environnement de circulation que les voitures et piétons.

En guise de conclusion, nous aborderons les apports scientifiques et méthodologiques de notre modèle dans l'amélioration des performances des Passages à Niveau, et la réduction des risques au niveau du Tramway, notamment :

- le modèle de sûreté de fonctionnement et de performance des actions sécurité,
- la connaissance des probabilités d'états ou d'occurrence d'événements au niveau des PN et Tramway,
- les éléments de stratégies de gestion de risques,
- l'outil d'aide à la décision pour la détermination des actions prioritaires et pertinentes,

Nous développerons également dans cette conclusion, quelques perspectives de recherches visant à l'amélioration de la prise en compte de toutes les contraintes liées à l'environnement du système PN et Tramway, notamment l'introduction du facteur coût dans le modèle de risque.

Chapitre I

La Sûreté de Fonctionnement des systèmes

Sommaire

I.1. Introduction	8
I.2. Notion de système.....	8
I.2.1.Complexité du système	8
I.2.2.Vue structurelle ou statique	10
I.2.3.Vue temporelle ou dynamique.....	10
I.2.4.Approche systémique et ingénierie système.....	11
I.3. Performance d'un système.....	13
I.3.1.Définition	13
I.3.2.Mesure et évaluation.....	14
I.4. La sûreté de fonctionnement dans l'évaluation de la performance du système	15
I.4.1.Définition de la Sûreté de Fonctionnement.....	15
I.4.2.Composantes de la SdF.....	16
I.4.2.1.Fiabilité	16
I.4.2.2.Maintenabilité	16
I.4.2.3.Disponibilité	17
I.4.2.4.Sécurité	17
I.4.2.5.Durabilité	17
I.4.3.Métriques de la Sûreté de Fonctionnement	17
I.4.4.Analyse de la Sûreté de Fonctionnement	18
I.5. Les approches de Sûreté de Fonctionnement	20
I.5.1.Approches qualitatives ou quantitatives	20
I.5.2.Approches inductives ou déductives	21
I.5.3.Approches statiques/dynamiques.....	21

I.6. L'analyse et la modélisation fonctionnelle.....	22
I.6.1.Acquisition des informations.....	22
I.6.2.Méthodes fonctionnelles	23
I.6.3.Méthodes statistiques.....	27
I.6.4.Méthodes de simulation	27
I.7. L'analyse de dysfonctionnement	27
I.7.1.AMDEC	28
I.7.2.Analyse Préliminaire des Risques (APR)	32
I.7.3.HAZOP (Hazard and operability)	34
I.7.4.Arbre de fautes (AF) ou Arbre de Défaillance (AdD)	36
I.7.5.Analyse par Arbre d'Évènements	38
I.7.6.Diagramme de Fiabilité (DF)	40
I.8. L'analyse de dysfonctionnement par les outils de la théorie stochastique	40
I.8.1.Outils de calculs probabilistes.....	41
I.8.2.Réseaux Bayésiens.....	41
I.8.3.Réseaux de Petri stochastiques	42
I.8.4.Graphes de Markov	45
I.8.5.Simulation de Monte-Carlo.....	47
I.9. Conclusion.....	48

I.1. Introduction

Les démarches d'analyse des systèmes et leur intégration dans leur environnement se heurtent à leur complexité intrinsèque. Le comportement de ces systèmes ou du moins d'une de ses parties est, dans la plupart des cas, imprévisible en raison des dysfonctionnements pouvant affecter aléatoirement leurs constituants, mais aussi des erreurs humaines des opérateurs en interaction avec le système.

L'approche systémique fournit une démarche méthodologique pour la conception et la maîtrise du fonctionnement des systèmes qui peuvent être complexes.

La sûreté de fonctionnement focalise sur l'analyse de défaillance du système. Les différents concepts d'analyse de sûreté de fonctionnement des systèmes complexes seront abordés dans ce chapitre dans le cadre de l'ingénierie système.

La maîtrise des risques dont les fondements reposent sur l'approche systémique, s'attache à l'analyse et la gestion des différents modes de fonctionnement ou de dysfonctionnement du système, qui peuvent affecter la sécurité des biens et des personnes.

I.2. Notion de système

I.2.1. Complexité du système

De nombreuses définitions ont été données dans la littérature scientifique et dans différents domaines pour établir la notion de système. [Vese81] présente un système comme un « ensemble déterminé d'éléments discrets (composants, constituants) interconnectés ou en interaction ».

Cette définition a l'avantage d'une certaine genericité et peut être étendue pour exprimer la complexité du système. Formé d'éléments en interaction dynamique, un système correspond à une portion d'entité réelle, définie par une frontière établie en fonction d'un but, qui se distingue de son contexte ou de son milieu tout en procédant à des échanges avec son environnement [Wall77].

Un système peut être considéré de plusieurs façons :

- depuis son environnement, comme élément spécifique de type « boîte noire » avec des entrées et des sorties qui permettent d'en étudier le fonctionnement,
- de l'intérieur, par la mise en évidence :
 - ✓ de ses caractéristiques physiques (par décomposition organique en sous-systèmes et composants),
 - ✓ de ses modes d'organisation (relationnelles, hiérarchiques, ...),
 - ✓ de ses propriétés (autonomie, robustesse, vulnérabilité, ...),
 - ✓ de son comportement (dynamique d'évolution, productivité, ...).

Plusieurs formes de classification qui guident les méthodes de modélisation en résultent et s'appuient sur de nombreuses typologies et des caractéristiques de toutes sortes issues des champs :

- fonctionnels (ce que fait le système),
- structurels (qui fait quoi dans le système),
- comportementaux (comment évolue le système),
- technologiques ou physiques (de quoi est fait le système).

Un système peut être complexe à cause de la nature des interactions entre les éléments qui le composent.

La complexité est décrite de plusieurs façons, on retiendra la définition de [Moig99] qui présente un tel système comme « un ensemble d'éléments en relation dont les interactions font émerger de nouvelles propriétés qui ne figurent pas dans les éléments eux-mêmes ».

Il faut encore faire la distinction entre système complexe et système compliqué. S'il peut exister dans les deux cas un nombre élevé de composants, dans un système compliqué, les relations entre les composants sont simples, de type arborescence [Cler77]. De ce fait, le système est décomposable en éléments plus simples qui peuvent être analysés séparément pour comprendre le système global (figure 1). Par contre, dans un système complexe, les relations entre les composants qui le constituent comportent des «boucles», le système est non décomposable sous peine d'altérer la compréhension.

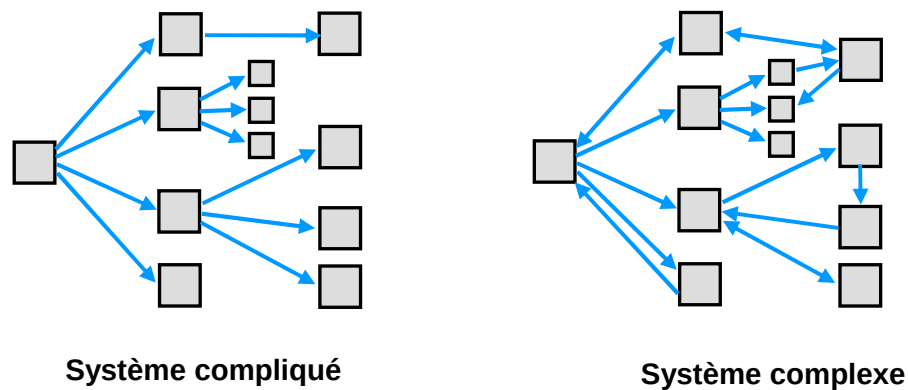


Fig. 1 Système compliqué et système complexe

On distingue la complexité liée à l'architecture du système de celle propre aux interférences entre composants ou avec l'environnement du système. En analyse de système, cette double notion impose de considérer le système sur les plans structurels et temporels.

I.2.2. Vue structurelle ou statique

La structure d'un système peut être définie de trois manières :

- Fonctionnelle : résulte de la décomposition de ses fonctions opérationnelles en une hiérarchie de sous fonctions.
- Organique : consiste à définir le système par une décomposition itérative des différentes hiérarchies de ses constituants jusqu'aux composants physiques élémentaires.
- Organisationnelle : consiste à déterminer ses modes d'organisation en intégrant les aspects hiérarchiques et relationnels.

I.2.3. Vue temporelle ou dynamique

La dynamique du système caractérise à la fois son fonctionnement (par exemple, la transformation des données d'entrée en données de sortie) et son évolution (adaptation du système à la mission assurée ou à l'environnement).

Cette dynamique peut exister sous trois formes temporelles :

- continue (variation de caractéristiques continues),

- discrète à dates fixes,
- discrète propre au système (observée à l'instant de discontinuités de fonctionnement).

Cette dynamique fait apparaître la notion de boucle de pilotage du système. Une partie des paramètres gouvernant le fonctionnement du système peut être utilisée pour son pilotage. Le pilotage est fonction de l'évolution de paramètres propres au système ou de certaines caractéristiques environnementales sur lesquelles il influe.

La notion de boucle de pilotage induit trois fonctions majeures :

- la récupération d'informations à partir de capteurs correctement positionnés,
- la mesure de l'écart entre les paramètres courants et les paramètres à atteindre (conduisant au calcul de facteurs de correction),
- la régulation du système, réalisée par injection de nouveaux paramètres déduits des facteurs de correction.

Le pilotage du système peut être effectué par anticipation ou interaction, le système est alors contrôlé en boucle ouverte par des informations prises sur ses entrées.

Il peut aussi être régulé selon des principes de rétroaction, le système est alors contrôlé en boucle fermée par des informations prises sur ses sorties.

I.2.4. Approche systémique et ingénierie système

Qualifiée de théorie du système général par [Moig94], la systémique et les sciences dont elle dérive, reposent sur la notion de système qu'il convient de définir. La définition de [Rosl75] semble être la plus satisfaisante : « un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisé en fonction d'un but ». La systémique s'attache à comprendre un système complexe selon :

- L'analyse globale du système plutôt que l'analyse des éléments du système pris séparément.
- La mise en évidence des interactions au sein du système qui traduisent le comportement du système et ses arborescentes (relations hiérarchiques) ou rétroalimentantes (relations de bouclage).

- L'organisation du système en différentes parties qui évoluent et se transforment pour atteindre un but qui leur est propre (notion de téléologie ou télénomie). La conjonction de ces parties apporte de nouvelles propriétés au système, dites propriétés émergentes, et permet la représentation du système en plusieurs niveaux organisationnels (sous systèmes) dépendants les uns des autres. Le système peut alors être structuré de manière organisationnelle et fonctionnelle.

L'approche systémique vise donc à percevoir et comprendre les systèmes dans leur complexité, leur dynamique et leur évolution.

La croissance de complexité des systèmes impliquerait souvent de considérer le système dans une vue d'ensemble, ce qui est rarement possible. L'ingénierie système préconise alors d'opérer un découpage conduisant à mener de front plusieurs démarches d'étude (le système est décomposé en éléments) qui juxtaposent des espaces maîtrisés individuellement.

L'approche systémique permet de rendre intelligible un système qualifié de complexe par la construction d'un modèle de ce système. Cette opération de modélisation permet d'induire des connaissances sur un système complexe, dans l'objectif d'entreprendre des actions futures sur ce système.

[Moig99] définit une démarche de modélisation en neuf niveaux, chacun étant positionné dans un référentiel Espace, Temps, Forme, et marquant une finalité donnée pour le système global. Ainsi, pour modéliser progressivement un système, le modélisateur peut considérer les niveaux suivants du système:

- passif et il est reconnaissable par ses frontières avec l'environnement,
- actif, il est alors caractérisé par des entrées et sorties,
- actif et régulé (relations de bouclage),
- s'informe, l'information faisant suite à une boucle de rétroaction,
- décide de son activité,
- a une mémoire des informations,
- coordonne ses activités d'information, de décisions et d'opérations,
- capable d'imaginer et s'auto organiser,
- capable de s'auto-finaliser et donc de s'adapter (modélisation de la conscience).

L'approche systémique dans le domaine des processus industriels et organisationnels, utilise un cadre méthodologique qui est l'Ingénierie Système.

Cette démarche est mise en avant en France par l'AFIS [Afis01] (Association Française d'Ingénierie Système) et, de manière internationale par l'INCOSE (International Council on Systems Engineering).

L'approche systémique est un processus collaboratif et multidisciplinaire de résolution de problèmes. Il prend en compte tous les domaines et disciplines impliqués dans le cycle de vie du système complexe, de la conception à la mise en exploitation et au démantèlement, en considérant les différents besoins, pour développer une solution optimisée à la fois économique, performante et satisfaisant tous les points de vue des différentes parties prenantes.

[Blai03] [Cauf06] ont abordé quatre aspects caractérisant la complexité des systèmes homme-machine basés sur des techniques d'automatisation :

1. les aspects fonctionnels,
2. les aspects comportementaux,
3. les aspects structurels,
4. les aspects technologiques.

Les connaissances liées au mauvais fonctionnement d'un système nécessitent d'être également prises en compte dans les activités de l'ingénierie système. Du fait des défaillances pouvant apparaître dans un système, des comportements imprévisibles peuvent émerger et affecter les performances et la sécurité du système, des personnes et de l'environnement en interaction avec le système.

Dans le but de prévoir, évaluer et maîtriser ces comportements, l'ingénierie système s'appuie sur les disciplines de sûreté de fonctionnement et maîtrise des risques.

I.3. Performance d'un système

I.3.1. Définition

La performance est définie suivant différents auteurs avec des caractéristiques différentes, elle est considérée comme étant une notion complexe qui qualifie et/ou quantifie le résultat de l'engagement du système. Ces caractéristiques sont construites à

partir des résultats directement produits et de la manière avec laquelle ces résultats ont été obtenus, elle peut revêtir plusieurs formes et concerner différents traits représentatifs du système, dont l'efficacité, l'efficience et l'effectivité, constituent trois principaux critères d'évaluation [Est11].

L'efficacité désigne le fait que l'engagement du système permet d'atteindre le résultat prévu. Les mesures quantifient le rapport entre les résultats fournis et les objectifs assignés. L'efficacité est orientée vers la qualité de la prestation fournie.

L'efficience ajoute la notion de coût (effort, temps etc.) requis pour atteindre ce résultat. Les mesures quantifient le rapport entre les résultats fournis et les moyens engagés.

L'effectivité désigne le degré d'atteinte des objectifs fixés à moindre coût, tout en améliorant la satisfaction et la motivation des membres de l'organisation. Le concept d'effectivité est fortement lié à la satisfaction vis-à-vis des résultats obtenus.

I.3.2. Mesure et évaluation

L'analyse systémique propose un modèle d'évaluation de la performance issu du modèle de pilotage basé sur la commande par des leviers d'actions avec des consignes ou objectifs [Est11].

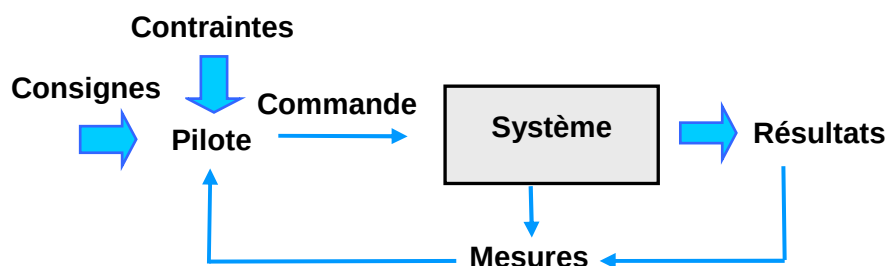


Fig. 2 Mesures et pilotage de la performance

Il existe plusieurs types d'évaluation de la performance [Est11]:

- *Evaluation a posteriori* : elle suppose que le système ait déjà été conçu, l'objectif étant de le piloter par la performance en comparant la mesure avec l'objectif défini. La comparaison permet de définir les actions à entreprendre dans le système.

- **Evaluation a priori** : elle a pour objectif de concevoir le système, puis de prévoir son comportement, en utilisant souvent des outils de simulation pour analyser la performance.

La mesure de la performance nécessite la mise en place d'indicateurs convenablement sélectionnés.

Un indicateur est une donnée quantitative qui permet de caractériser une situation évolutive, une action ou les conséquences d'une action, de façon à les évaluer et à comparer leurs états à différentes dates [Noye07].

Un tableau de bord définit l'ensemble des indicateurs, renseignés périodiquement et destinés au suivi de fonctionnement d'un système, de l'état d'avancement d'un programme ou d'une politique et à l'évaluation de leur efficacité.

I.4. La sûreté de fonctionnement dans l'évaluation de la performance du système

La complexité croissante des systèmes industriels, la réduction de leurs coûts de conception et d'exploitation ainsi que leur utilisation de plus en plus importante dans la vie quotidienne font, de la Sûreté de Fonctionnement (SdF), un domaine incontournable dans le développement de tout système industriel.

La Sûreté de Fonctionnement (SdF) est basée sur :

- des méthodes et des outils servant à caractériser et à maîtriser les effets des aléas, des pannes et des erreurs,
- la quantification des caractéristiques de composants et de systèmes pour exprimer la conformité dans le temps de leurs comportements et de leurs actions.

I.4.1. Définition de la Sûreté de Fonctionnement

La définition de la Sûreté de Fonctionnement est considérée comme étant la conjugaison de ces quatre définitions [Vill88] [Mort01] [Lapr96] [Proc96] :

- la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité,
- la science des défaillances,

- la confiance justifiée dans le service délivré,
- le maintien de la qualité dans le temps.

La Sûreté de Fonctionnement ne se réduit pas uniquement à une de ces performances de Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité que l'on retrouve dans l'acronyme FMDS, mais elle se construit à travers toutes ces caractéristiques.

La définition « Science des défaillances » suppose la connaissance, l'évaluation, la prévision, la mesure et la maîtrise des défaillances. La sûreté de fonctionnement apparaît ainsi comme l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données.

La définition « Confiance justifiée dans le service délivré » dépend principalement de la perception des utilisateurs. Le service délivré par un système est le comportement perçu par son ou ses utilisateurs, sachant qu'un utilisateur est aussi un système (humain ou physique) qui interagit avec tout l'ensemble.

La définition « Maintien de la qualité dans le temps » prend en compte la conformité aux exigences explicites ou non explicites.

I.4.2. Composantes de la SdF

La fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité, la sécurité et la durabilité sont les paramètres fondamentaux de la Sûreté de Fonctionnement. Ceux-ci permettent de définir les objectifs attendus d'un système et d'évaluer sa qualité de service attendu en vue de cibler les points critiques à améliorer [Vill88].

I.4.2.1. Fiabilité

La fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée donnée. Elle est caractérisée par la probabilité $R(t)$ que l'entité E accomplisse des fonctions, dans les conditions données pendant l'intervalle de temps $[0, t]$, sachant que l'entité E n'est pas en panne à l'instant 0.

$$R(t) = \text{Prob} \{E \text{ non défaillante sur } [0; t]\}$$

I.4.2.2. Maintenabilité

La maintenabilité est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est

réalisée dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits. Elle est caractérisée par la probabilité $M(t)$ que l'entité E soit en état, à l'instant t , d'accomplir ses fonctions, sachant que l'entité était en panne à l'instant 0.

$$M(t) = \text{Prob} \{E \text{ est réparable sur } [0, t]\}$$

I.4.2.3. Disponibilité

La disponibilité est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir les fonctions requises dans les conditions données et à un instant donné. Elle est caractérisée par la probabilité $A(t)$ que l'entité E soit en état, à l'instant t , d'accomplir les fonctions requises dans des conditions données.

$$A(t) = \text{Prob} \{E \text{ non défaillante à l'instant } t\}$$

I.4.2.4. Sécurité

La sécurité est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. Elle est caractérisée par la probabilité $S(t)$ que l'entité E ne laisse pas apparaître dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.

$$S(t) = \text{Prob} \{E \text{ évite des événements critiques ou catastrophiques sur } [0, t]\}$$

I.4.2.5. Durabilité

La durabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint.

I.4.3. Métriques de la Sûreté de Fonctionnement

Les grandeurs présentées ci-après caractérisent des durées moyennes associées à la Sûreté de Fonctionnement:

MTTF (Mean Time To Failure) est la durée moyenne de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (I.1)$$

MTTR (Mean Time To Repair) est la durée moyenne de réparation :

$$MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] dt \quad (I.2)$$

MUT (Mean Up Time) est la durée moyenne de fonctionnement après réparation.

MDT (Mean Down Time) est la durée moyenne d'indisponibilité après défaillance.

MTBF (Mean Time Between Failure) est la durée moyenne entre deux défaillances :

$$\text{MTBF} = \text{MDT} + \text{MUT} \quad (\text{I.3})$$

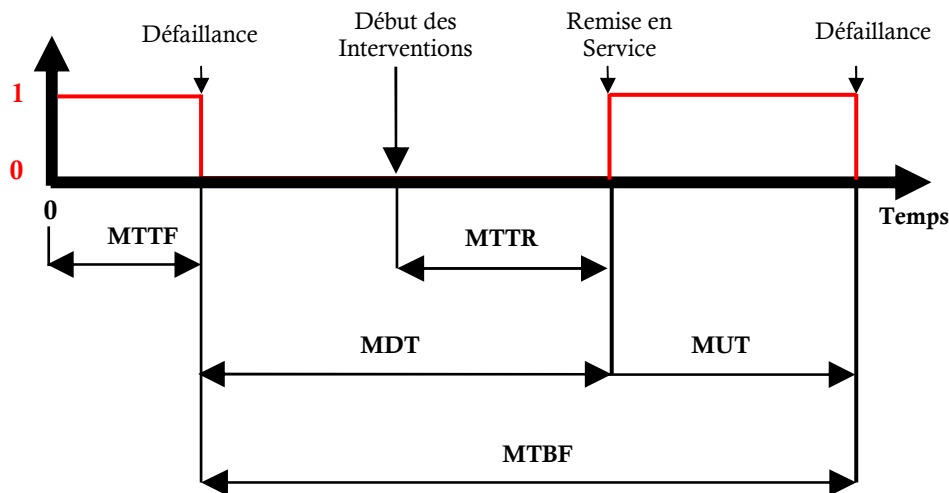


Fig.3 Durées moyennes associées à la Sûreté de Fonctionnement

I.4.4. Analyse de la Sûreté de Fonctionnement

L'analyse de la Sûreté de Fonctionnement s'appuie sur la connaissance des modes de fonctionnement normal du système, résultat d'une première étape d'analyse fonctionnelle et de comportement qui engage des outils adaptés. Elle nécessite ensuite la connaissance des modes de dysfonctionnement avec l'identification des phénomènes intrinsèques et extrinsèques au système, susceptibles d'affecter son fonctionnement.

La figure 4 ci après illustre la démarche générale d'une étude de Sûreté de Fonctionnement [Bouc11a]. Il s'agit d'un processus itératif comportant toujours plus ou moins les mêmes différentes étapes :

1. définition précise du système à étudier,
2. définition du but de l'étude à réaliser,

3. analyse fonctionnelle du système : étape indispensable car, avant d'essayer de comprendre comment un système tombe en panne, il faut avoir compris comment il fonctionne.

4. analyse et évaluation dysfonctionnelles : identification et hiérarchisation des risques, bien entendu, les risques à prendre en compte sont directement liés aux enjeux de l'étude considérée. Cependant, lorsque le système étudié présente un comportement complexe, il est indispensable d'aller plus loin et de procéder à une modélisation servant de support à des analyses qui, selon le cas, pourront être purement qualitatives, semi-quantitatives ou purement quantitatives.

Les résultats théoriques sont confrontés aux connaissances pratiques des spécialistes du terrain afin de mettre en évidence les éléments qui pourraient les choquer et procéder aux rectifications nécessaires. Cette étape peut être le point de départ d'une nouvelle itération si elle conduit à la remise en cause de la conception du système en cours d'analyse.

5. Les résultats de cet analyse de Sûreté de Fonctionnement à la suite de la discussion avec les spécialistes des synthèses et décisions aboutissent à des actions et spécifications visant à maîtriser les dysfonctionnements, programmes de tests, politique de maintenance, évaluation du risque résiduel, etc.

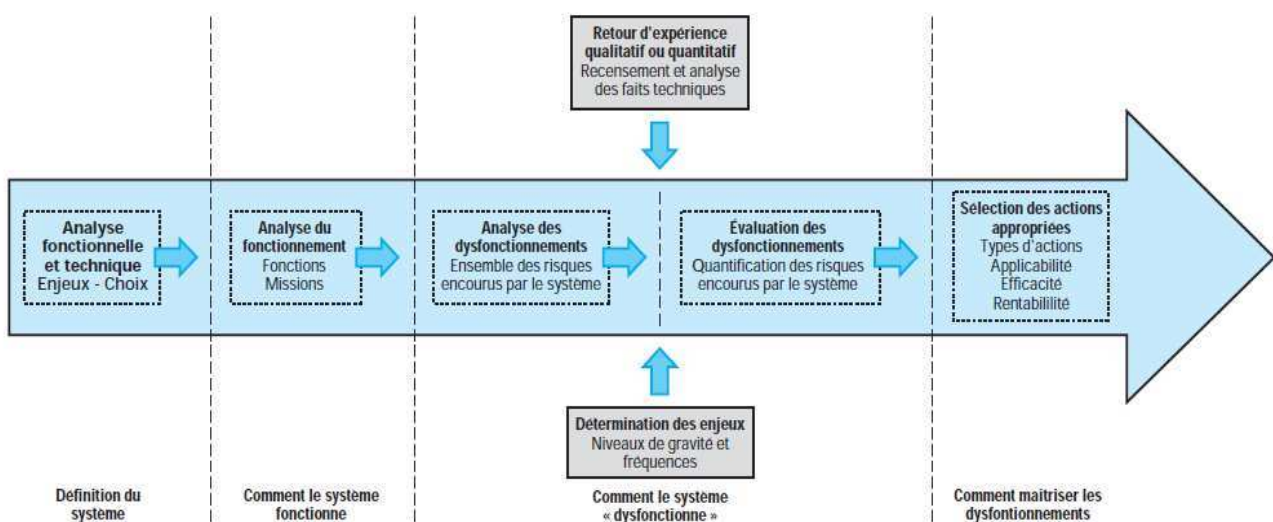


Fig.4 Analyse de Sûreté de Fonctionnement

I.5. Les approches de Sûreté de Fonctionnement

La Sûreté de Fonctionnement regroupe un ensemble de techniques mises en oeuvre pour identifier, analyser, gérer et, le cas échéant, réduire les risques liés aux systèmes.

En effet, la Sûreté de Fonctionnement est une discipline qui s'appuie sur un support méthodologique applicable aux systèmes technologiques tout au long de leur cycle de vie:

- expression du besoin, conception, industrialisation, production, utilisation,
- diffusion, maintenance, voire même retrait de service.

Ces activités bénéficient du support de méthodologies rigoureuses et d'outils pratiques et puissants. Les méthodes de la sûreté de fonctionnement ont toutes au moins trois points communs, qui peuvent être résumés en trois types d'action :

- identifier les processus pouvant affecter la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité ou la sécurité,
- modéliser ces différents processus afin de faciliter la compréhension des mécanismes mis en jeu,
- valoriser les résultats des analyses en utilisant les modèles obtenus pour apprécier le niveau de sûreté de fonctionnement du système étudié, en relever les éventuelles insuffisances par rapport aux objectifs de performances poursuivis, en hiérarchiser les points forts et les points faibles.

Trois modes de classification de ces approches sont couramment rencontrés :

I.5.1. Approches qualitatives ou quantitatives

- *Approches qualitatives* : les résultats renseignent sur les caractéristiques du système : points faibles du système, fausses redondances, influence d'un élément donné sur la fiabilité du système, repérage des chemins critiques, test (pour les chemins critiques) des méthodes d'élimination, ...

- **Approches quantitatives** : les résultats sont ceux de calcul de fiabilité, disponibilité, ... par exemple, la probabilité d'occurrence d'une combinaison d'événements.

I.5.2. Approches inductives ou déductives

- **Approches inductives** : basées sur une démarche descendante, elles considèrent un événement initiateur (défaillance technique, dysfonctionnement organisationnel, ...) dont elles cherchent à caractériser les conséquences sur le système et son environnement. Ces approches partent donc des causes pour en déduire les conséquences.
- **Approches déductives** : basées sur une démarche ascendante, elles considèrent un événement redouté (arrêt du système, anomalie de fonctionnement, ...) dont elles cherchent à expliquer les causes, le plus souvent sous forme de séquences d'événements.

I.5.3. Approches statiques/dynamiques

- **Approches statiques** : elles permettent d'analyser le système d'un point de vue structurel sans tenir compte des évolutions au cours du temps et s'appuient sur un modèle mathématique booléen du système qui fournit, par exemple, les combinaisons de défaillances entraînant le dysfonctionnement du système mais sans représenter les interrelations temporelles qui l'affectent.
- **Approches dynamiques** : les méthodes dynamiques permettent la prise en compte des aspects comportemental et temporel.

Les données d'entrée de ces méthodes sont de deux ordres :

- ✓ connaissance du système résultant généralement d'une étude fonctionnelle,
- ✓ données de nature événementielle, sous forme brute : états, historiques, ... ou sous forme de modèle statistique : lois mathématiques décrivant les fonctions de distribution des événements.

Les résultats établis en sortie sont :

- ✓ des modèles de comportement du système (vis-à-vis des défaillances, réparations, sollicitations, service, ...) :

- modèles de sûreté de fonctionnement,
- modèles mixtes sûreté de fonctionnement/performance, ...,
- ✓ des grandeurs établies à partir des modèles et pouvant revêtir différentes formes:
 - probabilités d'états ou d'occurrence d'événements,
 - quantificateurs FMDS, MTBF, etc.
 - métriques évoluées de performance et de coût,
- ✓ des éléments de stratégies d'actions :
 - de maintenance : contrôle, fréquence d'entretien, ...,
 - de gestion de risques : protection, évitement, ...

I.6. L'analyse et la modélisation fonctionnelle

L'analyse et la modélisation du système sous l'angle technique et fonctionnel, constituent une étape essentielle dans la démarche d'évaluation.

I.6.1. Acquisition des informations

Le premier niveau d'analyse porte sur l'acquisition des informations et le recueil des connaissances pour construire une première base de connaissances sur laquelle s'appuient la modélisation et l'analyse proprement dite du système. Ces méthodes peuvent être :

- informelles, c'est-à-dire qu'il n'existe aucune sémantique ou syntaxe guidant l'élaboration de l'information,
- semi formelles, s'appuyant sur une amorce de syntaxe (arbres...) et/ou de sémantique (questionnaires guidés...). On trouve à ce niveau une large panoplie d'outils de type :
 - ✓ interviews,
 - ✓ questionnaires et « check-lists »,
 - ✓ méthodes de classification (catalogues),
 - ✓ grilles d'évaluation.

L'étape suivante est généralement celle de la première modélisation. Le système global peut être considéré, selon la méthode retenue, sous forme d'activité, de données ou de processus (figure 5).

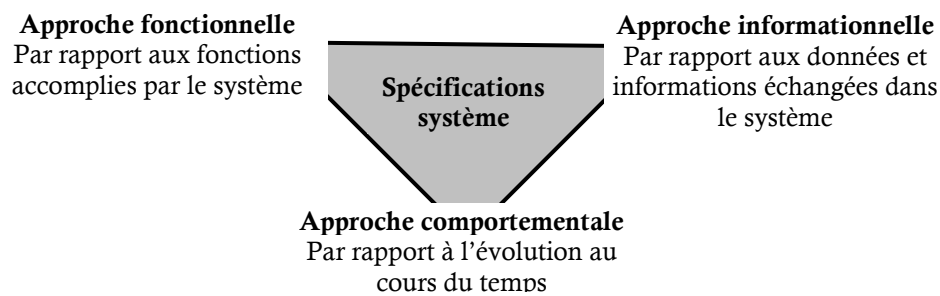


Fig. 5 Description d'un système

Les méthodes d'analyse peuvent être distinguées suivant trois types présentés ci-après :

I.6.2. Méthodes fonctionnelles

Ces méthodes permettent l'identification des fonctions à assurer. Elles sont basées sur une approche structurée de manière hiérarchique, descendante et modulaire. À partir de raffinements successifs, ces méthodes, qui s'appuient très souvent sur un formalisme graphique, conduisent à des spécifications.

Chaque niveau peut ensuite être décomposé en respectant les entrées-sorties du niveau supérieur. La décomposition se poursuit jusqu'à l'obtention du niveau de détail jugé suffisant pour l'analyse.

Parmi les méthodes d'analyse figurant dans cette catégorie, on peut citer les méthodes [Bren01] [Zwin09]:

- APTE (Application des Principes d'Entreprise), qui est une méthode très simple et très utilisée dans l'industrie,
- ASA (Analyse Structurée d'Automate),
- FAST (Function Analysis System Technique),
- FBS (Function Breakdown Structure), PBS (Product Breakdown Structure) et WBS (Work Breakdown Structure) ,
- SADT (Structured Analysis and Design Technique), SA (Structured Analysis) et SART (Structured Analysis and Real Time).

D'autres outils, basés sur les mêmes principes, sont disponibles pour l'analyse de systèmes particuliers. Citons, par exemple :

- l'approche Merise [Math02] pour le traitement des systèmes d'information, basée sur la séparation des données et des traitements à effectuer en plusieurs modèles conceptuels et physiques ,
- la méthode Grai [Robo93] pour le traitement des systèmes décisionnels, s'appuyant sur un modèle conceptuel élaboré selon différents points de vue à partir des théories sur les systèmes, les systèmes hiérarchisés et les systèmes d'organisation.
- La méthode UML (Unified Modeling Language), permet aussi une représentation des situations ou des systèmes à base d'objets ou d'agents. Largement utilisée dans divers domaines même si elle est issue du développement informatique, UML est un des standards de modélisation qui permet de spécifier, visualiser, construire et documenter tout type de processus et/ou d'organisation suivant différentes vues sans formalisme strict [Terr05] [Baue05].

Le premier travail à effectuer pour l'analyse fonctionnelle est de formaliser le besoin exprimé par l'utilisateur. Pour ce faire, on utilise la connaissance des milieux extérieurs et les phases d'utilisation du produit pour ensuite définir le besoin auquel répond le système selon le diagramme de la Bête à cornes [Laro11].

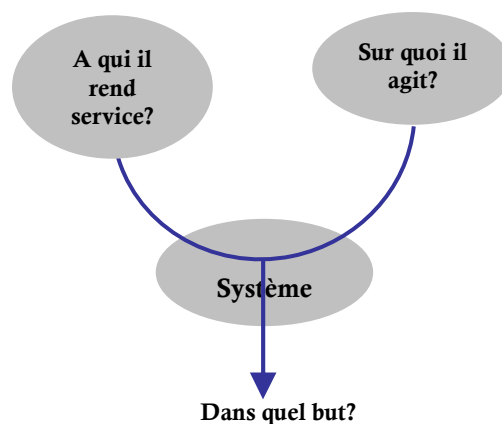


Fig. 6 Diagramme bête à corne

Lorsque un système est situé dans son milieu environnant (ME), il rend des services de deux natures :

- les services qui sont sa raison d'être : c'est la Fonction Principale (FP),
- les services imposés : ce sont les Fonctions Contraintes (FC).

Pour identifier ces différentes fonctions, on utilise le diagramme Pieuvre (Fig.7). Ce diagramme doit être réalisé pour les différentes phases d'utilisation du système étant donné que le milieu environnant peut varier en fonction de l'utilisation du système.

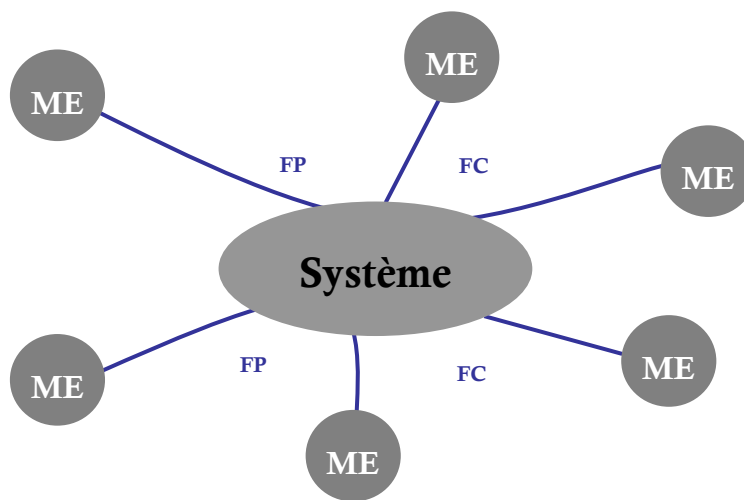


Fig. 7 Diagramme de pieuvre

Pour une analyse plus détaillée du fonctionnement du système, il est possible de réaliser un Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF), qui permet une analyse qualitative en déterminant les chemins qui conduisent à la réussite de la mission du système et la recherche des composants apparaissant dans le plus grand nombre de ces chemins et les scénarios qui conduisent à l'échec de la mission.

Ce BDF se construit graphiquement en suivant les étapes suivantes (Figure 8):

- présenter tous les éléments composant le système et ayant des relations de contact,
- présenter les milieux extérieurs,
- Tracer les relations externes ou internes entre les milieux extérieurs et les composants du système (flux ouverts et bouclés) .

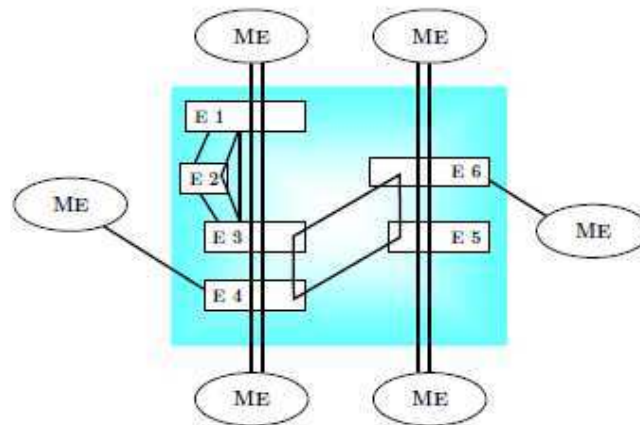


Fig. 8 Bloc Diagramme Fonctionnel

La méthode a ses limites d'application car il faut s'assurer de l'indépendance entre les blocs et ne permet pas de modéliser des systèmes dynamiques [Miha07].

Ce BDF conduit généralement à un Tableau d'Analyse Fonctionnelle (TAF) (Tab.1). Il permet de synthétiser dans un tableau l'ensemble des données représentées graphiquement dans le Bloc Diagramme Fonctionnel [Laro11].

Elément	Fonctions élémentaires	Fonctions de base					Fonctions de conception				
		FP1	FP1	FC1	FC2	FC3	S1	S2	S3	S4	S5
E1	Fonctions de contact - avec élément du ME - avec autre élément			X				X		X	
E2	Fonctions de flux - Issus du ME - Entre éléments		X						X		
Etc.											
		Total JUSTE NÉCESSAIRE					Total FONCTION DE CONCEPTION				

Tab. 1 Tableau d'analyse fonctionnel

I.6.3. Méthodes statistiques

Basées sur l'observation d'événements, ces méthodes visent à établir, par des techniques mathématiques, des hypothèses qui permettent de prédire des événements dans des situations analogues.

Des méthodes plus élaborées permettent d'établir des indicateurs spécifiques et sont bien adaptées à la structure d'éléments de tableaux de bord.

On peut citer en particulier des méthodes comme [Leco01] [Chez03]:

- le diagramme de Pareto et la méthode ABC,
- les lois statistiques (Bêta, Normale, Poisson, Weibull, Théorème de la limite centrale...).

I.6.4. Méthodes de simulation

Ces méthodes sont utilisées lorsque le nombre de données à traiter rend le calcul analytique complexe. Elles permettent de représenter virtuellement le comportement du système soumis à des contraintes choisies dans un environnement donné.

Ces méthodes peuvent être génériques comme celles basées sur les systèmes à événements discrets utilisées dans le cadre de la simulation de flux avec des outils de type Réseau de Petri[Lade89], elles peuvent aussi être propres à des disciplines comme, par exemple, la méthode des éléments finis, très utilisée dans le domaine de la conception mécanique.

Citons, parmi les méthodes de simulation dynamique, la simulation de Monte Carlo [Koll99] qui prend en compte la dynamique d'événements et permet d'établir des données statistiques, méthode que nous retrouverons, elle aussi, en évaluation de sûreté de fonctionnement.

I.7. L'analyse de dysfonctionnement

Les méthodes utilisées pour l'analyse dysfonctionnelle se présentent sous des aspects divers : formes tabulaires, arborescence, réseaux, graphes, ... Elles permettent une analyse qualitative des phénomènes et situations examinées, analyse qui peut être souvent étendue à des aspects quantitatifs [Bouc11b] (figure 9).

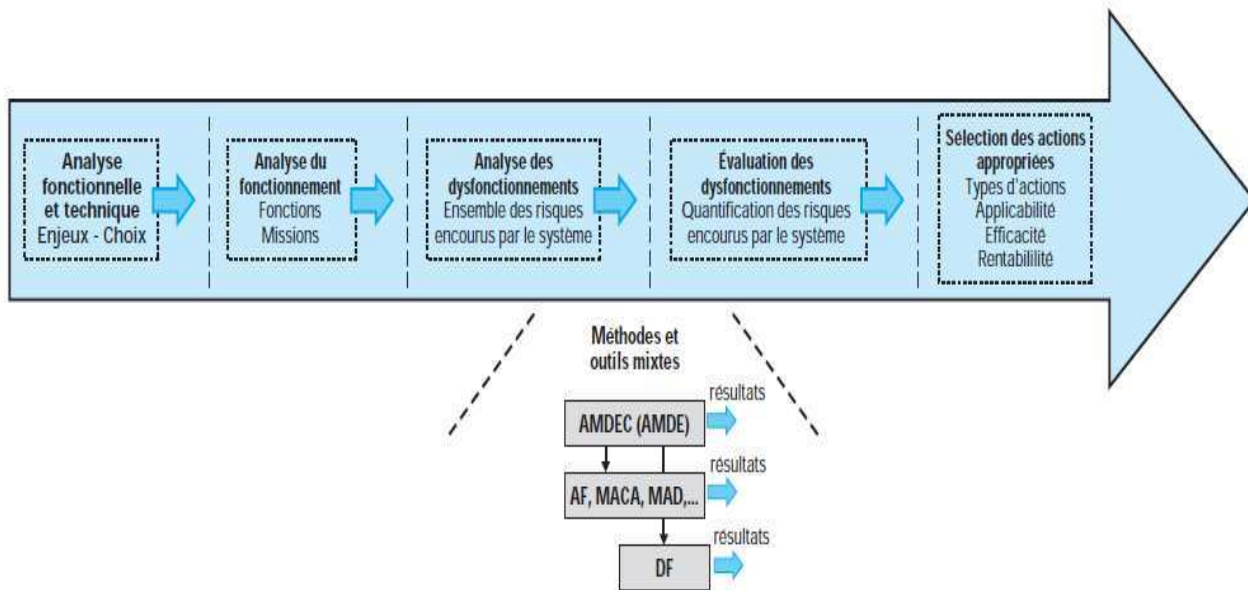


Fig.9 Analyse de dysfonctionnement

Les principales méthodes considérées à ce niveau sont évoquées ci-après avec leur positionnement dans la classification proposée ci-dessus.

1.7.1.AMDEC

L'analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC), extension de l'AMDE (analyse des modes de défaillances et de leurs effets), est une méthode ascendante qui, à partir d'un recensement des défaillances susceptibles d'affecter un système et de leur criticité, permet d'évaluer les effets de chaque mode de défaillance des composants du système sur les différentes fonctions de celui-ci et d'identifier ceux influant les caractéristiques FMDS (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité, Sécurité) du système [Rido99].

L'AMDE est établie à partir des définitions suivantes qui sont mises en évidence pour chaque mode de défaillance :

- une défaillance est la cessation de l'aptitude d'un élément ou d'un système à accomplir une fonction requise,
- un mode de défaillance est l'effet par lequel une défaillance est observée sur un élément du système,

- une cause de défaillance est constituée par les événements qui conduisent aux défaillances,
- l'effet d'un mode de défaillance regroupe les conséquences associées à la perte de l'aptitude d'un élément à remplir une fonction requise,
- les moyens de détection représentent les actions permettant de détecter la défaillance (les tests périodiques, les inspections, les alarmes, etc.).

Pour évaluer la criticité d'une défaillance, l'AMDEC apparaît comme une suite logique à l'AMDE. La criticité évalue pour chaque mode de défaillance [Gari94]:

- la probabilité d'occurrence,
- la gravité : associe pour chaque mode de défaillance, une classe des effets (mineurs, significatifs, critiques ou catastrophiques etc.),
- le risque de la non-détection : qui est d'autant plus important qu'aucune barrière matérielle ou logicielle n'est prévue pour éviter la défaillance,

La criticité d'une défaillance est égale au produit de la probabilité d'occurrence, de la gravité et du risque de non-détection. L'AMDEC reprend en effet les principales étapes de l'AMDE et ajoute une évaluation quantitative de la criticité.

Le principal avantage de l'AMDEC est son aptitude à détecter les défaillances des éléments conduisant à la défaillance globale du système. Elle constitue un outil précieux pour l'identification de défaillances potentielles et les moyens d'en limiter les effets ou d'en prévenir l'occurrence.

Par contre, dans le cas de systèmes particulièrement complexes comptant un grand nombre de composants et d'interactions, l'AMDEC est très difficile à maîtriser, compte tenu du volume important d'informations à traiter et l'impossibilité de décrire des défaillances multiples.

La démarche générale de l'AMDEC a été définie dans la norme NF EN 60812 intitulée « Techniques d'analyses de la fiabilité du système - Procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) ». Elle se résume sous forme d'un organigramme représenté en figure 10 [Laro11].

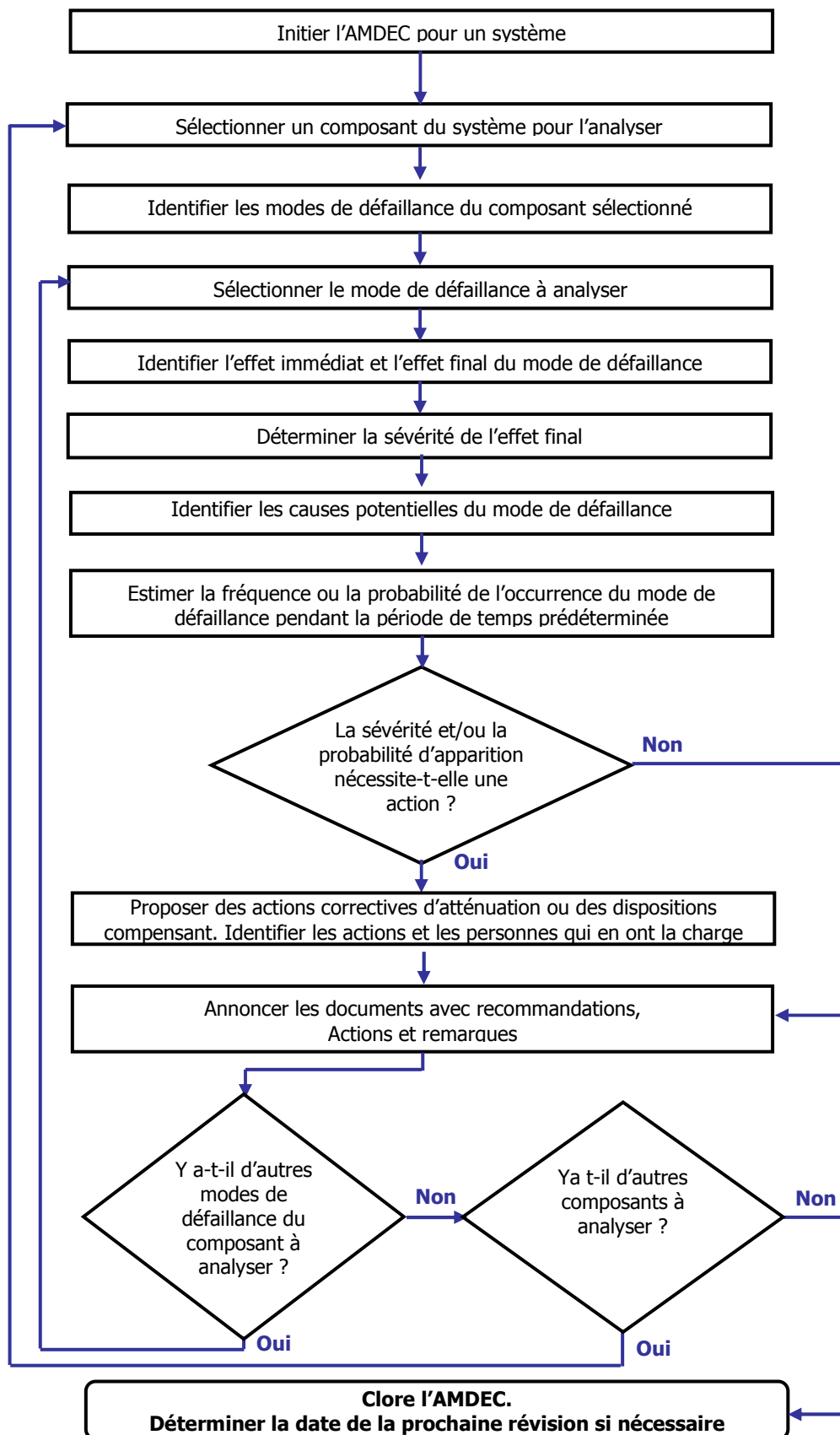


Fig.10 Organigramme de la méthode AMDE (NF EN 60812)

Dans un premier temps, le groupe initialise l'étude AMDE en mettant au point les supports de l'étude :

- définir le système étudié, ses limites et les différents composants,
- réaliser le tableau qui permet d'analyser le système sous une forme structurée et claire,
- mettre au point les barèmes de fréquence, de gravité et de non-détection qui seront utilisées pour calculer la criticité.

N°	Fonction	Mode de défaillances	Causes	Effet sur système et/ou sous-systèmes	O	G	D	C	Remarques

Tab. 2 Tableau AMDEC

En plus de l'analyse AMDE, il est possible de coter les différentes fonctions afin d'en déterminer leur criticité. Cela permet de classer les fonctions et d'étudier plus en détail les fonctions critiques afin d'améliorer la fiabilité du système.

La criticité de chaque fonction d'un système est déterminée à partir des échelles de probabilité d'occurrence (O), de gravité (G) et de détection (D). La criticité (C) est calculée par :

$$C = O \times G \times D \quad (I.4)$$

Chaque critère peut prendre une note entre 1 et 4 ou 5 ou 10 ou autre. Cette cotation est déterminée par le groupe de travail lors de l'initialisation de l'étude.

Un exemple d'une cotation de 1 à 4 est présenté dans le Tableau 3

Cote	Echelle d'occurrence (O)	Echelle de gravité (G)	Echelle de non-détection (D)
1	Evènement très rare	Evènement sans influence	Evènement détecté à coup sûr
2	Evènement possible	Evènement critique	Evènement détectable
3	Evènement fréquent	Evènement catastrophique	Evènement difficilement détectable
4	Evènement très fréquent	Evènement mortel	Evènement indétectable

Tab. 3 Exemple de cotation de 1 à 4 pour une analyse AMDEC

Plusieurs autres méthodes s'appuient, de manière analogue à l'AMDEC, sur une représentation tabulaire de la connaissance, par exemple les méthodes d'analyse préliminaire des dangers (APD), des risques (APR) [Vill88], d'analyse opératoire des dangers (HAZOP Hazard and Operability) [Klet97] [Royer09], toutes essentiellement qualitatives.

I.7.2. Analyse Préliminaire des Risques (APR)

L'analyse Préliminaire de Risque (Danger) a été développée au début des années 1960 dans les domaines aéronautique et militaire.

L'APR ou la variante APD (Analyse Préliminaire des Dangers) est généralement utilisée pour l'identification des risques d'un système et l'évaluation de la gravité des conséquences liées aux risques [Vill88] [Mort02-2]. Il est recommandé d'utiliser l'APR pour analyser les risques dès la première phase de conception des systèmes et de compléter cette analyse durant la vie de ces systèmes car elle sert de référence tout au long de la vie de ces systèmes.

L'APR a principalement trois objectifs :

- ✓ Identifier les dangers et leurs causes,
- ✓ Evaluer et accepter les risques en vue d'une hiérarchisation,
- ✓ Proposer les mesures adéquates en vue de maîtriser ces risques et les rendre à des seuils acceptables.

Cette démarche APR est généralement une première étape indispensable lorsqu'on traite les aspects de sécurité d'un système. Elle l'est beaucoup moins s'il n'est question que de la fiabilité, maintenabilité ou disponibilité du système. Elle est basée essentiellement sur une liste (établie par les experts dans le domaine) des éléments ou circonstances qui peuvent se conjuguer pour provoquer un incident : entités dangereuses, situations dangereuses, accidents potentiels,...

Le principal avantage de l'Analyse Préliminaire des Risques est de permettre un examen relativement rapide des situations dangereuses dans des systèmes. Par rapport aux autres méthodes présentées ci-après, elle apparaît comme relativement économique en terme de temps passé et ne nécessite pas un niveau très détaillé de description du système étudié.

La méthode APR repose [Mort02-2]:

- sur les enchaînements : élément dangereux + événement = situation dangereuse, situation dangereuse + événement = accident,
- sur les cotations des fréquences des événements à l'origine des situations dangereuses ou des accidents,
- sur la gravité des conséquences des accidents.

Exemple : élément dangereux (stockage de gaz inflammable) + événement (fuite) = situation dangereuse ; situation dangereuse + événement (flamme) = accident (explosion, incendie).

Pour un système de transport comme le chemin de fer (trains, tramways, etc.), on peut considérer d'abord l'énergie cinétique du mobile comme source de danger. Il en découle des situations dangereuses comme:

- obstacle sur la voie parcourue, (événement = chute d'un objet sur la voie, véhicule routier sur la voie, etc.) ;
- personnes sur les voies parcourues par une circulation, (événement = véhicule routier avec conducteur ou passager franchissant ou immobilisé sur un passage à niveau qui se ferme, traversée non autorisée de voie par des tiers ou par des voyageurs ou par des agents ou animaux, autorisation de traverser donnée à tort, etc.).

Sous système Du équipement	Phase	Entité dangereuse	Événement causant une situation dangereuse	Situation dangereuse	Événement causant un accident	Accident	Effets ou conséquences	Gravité	Occurrence (fréquence)	Mesures de prévention ou de protection	Application des mesures
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Tab. 4 Tableau type de la méthode APR [Mort02-2].

En revanche, l'APR permet uniquement d'identifier des points critiques devant faire l'objet d'études plus détaillées et ne permet pas de caractériser l'enchaînement des événements susceptibles de conduire à une défaillance ou accident majeur pour les systèmes. L'APR peut aussi et même doit être complétée par la plupart des analyses de risques fonctionnelles telles que l'AMDEC ou l'Arbre de Défaillance.

I.7.3. HAZOP (Hazard and operability)

La méthode HAZOP (Hazard and operability) est un outil formalisé inventé en 1965 en Grande-Bretagne par la société ICI (Imperial chemical industries). La méthode a été utilisée pour analyser les risques potentiels associés à l'exploitation d'une installation industrielle et s'adressait particulièrement à la phase d'ingénierie de détail de nouvelles installations chimiques ou pétrochimiques.

La méthode HAZOP est définie comme suit [Roye09]: « Application d'un examen critique formel et systématique aux intentions du procédé et de l'ingénierie d'une installation neuve ou existante afin d'évaluer le potentiel de danger lié à la mauvaise utilisation, ou au mauvais fonctionnement, d'éléments d'équipement et leurs effets sur l'installation dans son ensemble».

La méthode HAZOP vise l'identification des dysfonctionnements de nature technique et opératoire dont l'enchaînement peut conduire à des événements non souhaités. Il s'agit donc de déterminer, pour chaque sous ensemble ou élément d'un système bien défini, les conséquences d'un fonctionnement hors du domaine d'utilisation pour lequel ce système a été conçu.

La méthode HAZOP est traduite en français dans la norme [CEI 61882] et sa mise en œuvre nécessite la constitution d'un groupe de travail rassemblant autour d'un animateur et une équipe pluridisciplinaire ayant une connaissance approfondie de l'installation décrite sur des plans détaillés. La méthode consiste à décomposer le système considéré en sous-ensembles, appelés « noeuds », puis à l'aide de mots-clés, ou mots guides, spécifiques à la méthode, faire varier les paramètres du système par rapport à ses points de consignes, appelées « intentions du procédé » [Roye09].

On obtient ainsi une déviation dont l'équipe examinera les causes possibles et en déduira leurs conséquences potentielles pour l'ensemble du système, d'où l'emploi fréquent de « analyse des déviations » pour caractériser la méthode HAZOP.

L'équipe se concentre alors sur les déviations conduisant à des risques potentiels pour la sécurité des personnes, des biens et de l'environnement. Elle examine et définit ensuite les actions recommandées pour éliminer, en priorité, la cause et/ou éliminer ou atténuer les conséquences.

Cette phase de l'étude de déviations constitue le coeur de la méthode HAZOP. Par un mécanisme itératif sur chacun des noeuds, l'association systématique paramètres/mots-clés doit permettre de couvrir de façon exhaustive toutes les dérives potentielles ou problèmes imaginables dans l'installation étudiée. Le logigramme de l'étude des déviations HAZOP est présenté à la figure 11 [Royer09]:

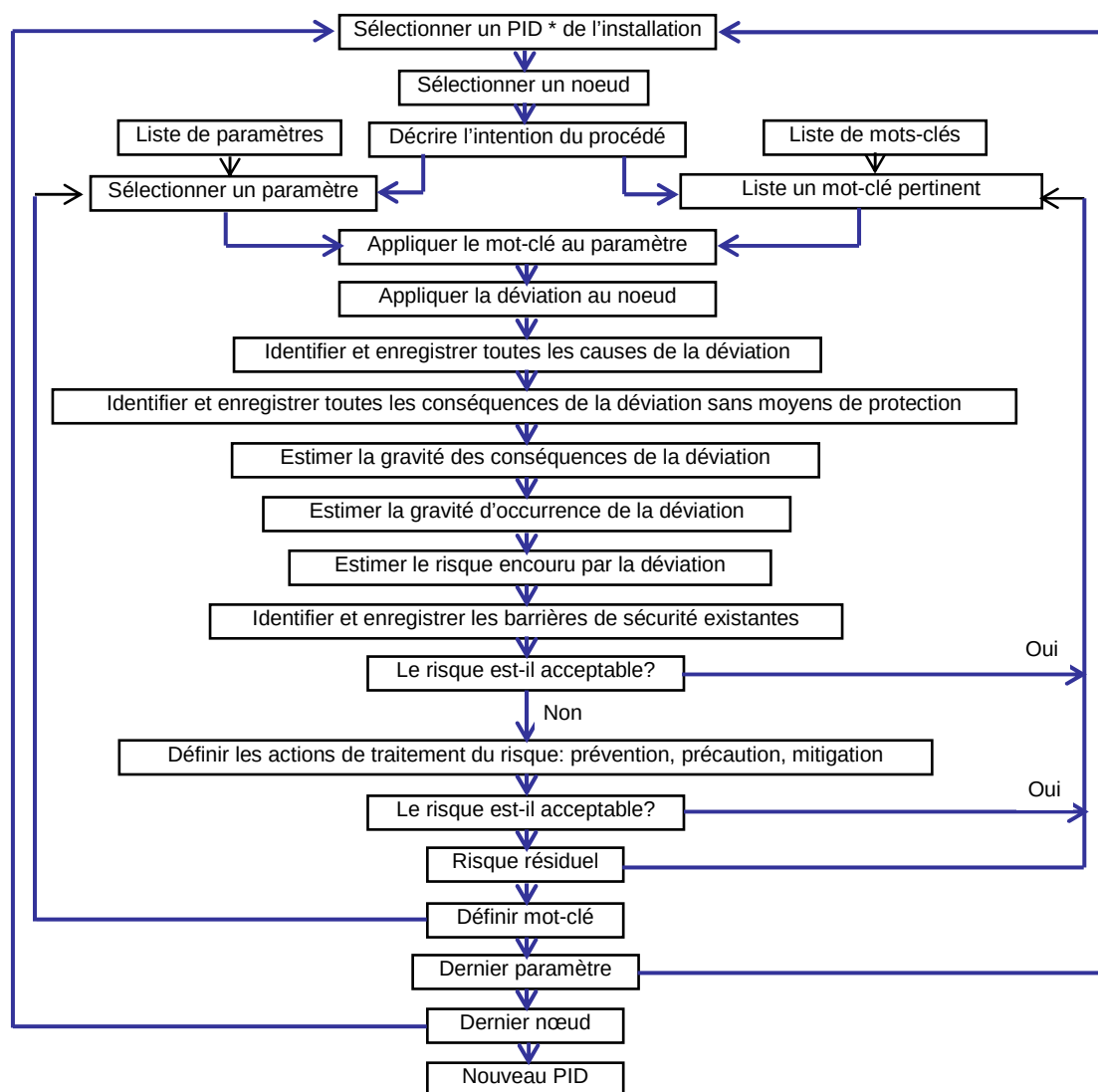


Fig. 11 Logigramme de l'étude des déviations HAZOP

(*) PID : Piping and Instrumentation Diagram.

L'analyse des déviations fait l'objet d'un enregistrement sous forme de tableaux des déviations, base indispensable pour la mise en place ultérieure des actions recommandées par le groupe de travail.

La méthode HAZOP est parfois qualifiée de « lourde » vu les deux étapes clés qui peuvent être effectivement consommatrices de temps, à savoir :

- la mobilisation d'une équipe pluridisciplinaire pendant de longues périodes,
- les nombreux documents à collecter pour modéliser l'installation,

I.7.4. Arbre de fautes (AF) ou Arbre de Défaillance (AdD)

La méthode de l'Arbre de Fautes [Mort02] appelé aussi la méthode de l'arbre des causes ou la méthode de l'Arbre de Défaillances (AdD), est une méthode graphique descendante qui permet de combiner des éléments par leurs états des événements et des fonctions d'un système.

Cette méthode déductive (de l'effet vers ses causes) a pour objet la recherche de toutes les combinaisons de défaillances élémentaires pouvant aboutir à un Evènement Redouté (ER), parfois identifié par une AMDEC. A partir de cet « évènement sommet », on construit en utilisant le symbolisme logique de l'algèbre de Boole, une arborescence (schéma graphique en forme d'arbre inversé) représentant l'enchaînement logique des «évènements intermédiaires» jusqu'à la mise en cause des «évènements élémentaires» (défaillance d'un composant). Il est ainsi possible d'identifier toutes les défaillances élémentaires pouvant conduire à l'évènement redouté, puis de quantifier son taux de défaillance λ obtenu à partir des taux de défaillances λ_i de chaque composant mis en cause.

L'arbre est formé de niveaux successifs tels que chaque évènement résulte d'évènements des niveaux inférieurs liés par certaines relations logiques. La décomposition est arrêtée lorsqu'elle met en oeuvre des évènements de base, non décomposables, indépendants et pouvant être caractérisés par des taux d'occurrence.

L'analyse par un arbre des défaillances est fondée sur les principes suivants :

- un évènement est une combinaison d'évènements de base non décomposables,
- les évènements de base sont indépendants,
- la probabilité d'occurrence des évènements de base peut être évaluée.

Les liens entre les différents événements sont réalisés grâce à des opérateurs logiques, (ET, OU, ...). Cette méthode utilise une représentation graphique qui permet de présenter les résultats dans une structure arborescente.

Dans l'exemple de la figure 12, pour que l'événement redouté se réalise, il faut que l'un des événements E1 ou E2 se réalise. Pour que l'événement E1 se réalise, il faut que l'un des événements de base e_1 ou e_2 se réalise, et pour que l'événement E2 se réalise, il faut que les deux événements de base e_3 et e_4 se réalisent en même temps.

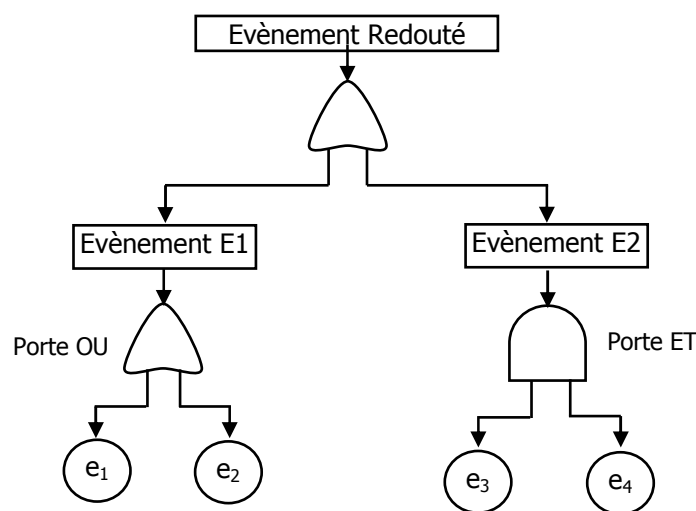


Fig. 12 Exemple d'Arbre de Défaillance

Ainsi, l'événement redouté peut s'écrire:

$$ER = E1 \text{ OU } E2 = (e_1 \text{ OU } e_2) \text{ OU } (e_3 \text{ ET } e_4) \quad (I.5)$$

Et l'utilisation des lois de l'algèbre booléenne permet de mettre l'expression booléenne de l'événement redouté sous la forme:

$$ER = E1 + E2 = (e_1 + e_2) + (e_3 \times e_4) \quad (I.6)$$

Les objectifs de l'analyse par Arbre de Fautes sont résumés en quatre points :

- La recherche des événements élémentaires, ou leurs combinaisons qui conduisent à un E.R.
- La représentation graphique de la logique de défaillance entre les événements conduisant à un événement redouté, ce qui implique qu'il y aura autant d'arbres de défaillances à construire que d'E.R. retenus.

- L'analyse qualitative : cette analyse permet de déterminer les faiblesses du système. Elle est faite dans le but de proposer des modifications afin d'améliorer la fiabilité du système. La recherche des éléments les plus critiques est faite en déterminant les chemins qui conduisent à un E.R. Ces chemins critiques représentent des scénarii qui sont analysés en fonction des différentes modifications qu'il est possible d'apporter au système.
- L'analyse quantitative : connaissant la probabilité des événements élémentaires, il est possible d'évaluer la probabilité d'apparition de l'E.R. L'objectif est en particulier de définir la probabilité d'occurrence des divers événements analysés. Les calculs reposent sur : les équations logiques tirées de la structure de l'arbre de défaillances et des probabilités d'occurrence des événements élémentaires.

L'arbre de défaillances est une méthode statique basée sur la logique booléenne pour représenter le système étudié. Elle est adaptée à des systèmes à configuration statique, c'est-à-dire des systèmes dont les relations fonctionnelles entre leurs composants restent figées.

Les méthodes les plus adaptées à la modélisation et à l'analyse des systèmes dynamiques sont les modèles états transitions tels que les graphes d'états (les graphes de Markov et les réseaux Bayésiens) et les approches basées sur les réseaux de Petri.

I.7.5. Analyse par Arbre d'Évènements

L'analyse par Arbre d'Évènements est une technique d'identification et d'analyse de la fréquence des dangers moyennant un raisonnement inductif pour convertir différents événements initiateurs en conséquences éventuelles relatives au fonctionnement ou à la défaillance du système selon les dispositifs techniques, humains, et organisationnels.

À l'inverse de l'analyse par Arbre de Défaillances, l'analyse par Arbre d'Évènements suppose la défaillance d'un composant ou d'une partie du système et s'attache à déterminer les événements qui en découlent.

L'analyse par Arbre d'Évènements se déroule en plusieurs étapes préliminaires [Mazo08]:

- Considération d'un évènement initiateur ;
- Identification des fonctions de sécurité prévues pour contrôler son évolution ;
- Construction de l'arbre ;
- Description et exploitation des séquences d'évènements identifiées.

Il serait plus pertinent d'élaborer un Arbre d'Évènements à l'issue d'une première analyse identifiant les accidents potentiels à l'image de l'APR. Les fonctions de sécurité doivent être assurées par des barrières ayant pour objectif d'empêcher le processus de matérialisation d'un accident provoqué par un évènement initiateur.

La construction de l'arbre consiste à envisager soit le bon fonctionnement soit le dysfonctionnement de la première fonction de sécurité en partant de l'évènement initiateur. La suite de la méthode consiste à examiner le développement de chaque branche en considérant systématiquement le fonctionnement ou la défaillance de la fonction de sécurité jusqu'à l'atteinte d'un accident potentiel.

On peut ajouter un aspect quantitatif à l'arbre d'événement en indiquant les probabilités des événements pris en compte. A chaque alternative on indique la probabilité de la branche supérieure (l'autre étant son complément à 1). La propagation des probabilités d'occurrence des événements initiateurs permet de calculer la probabilité de l'évènement redouté. La figure 13 ci après illustre l'exemple de l'arbre d'événement d'un tuyau de gaz arraché [Mort02].

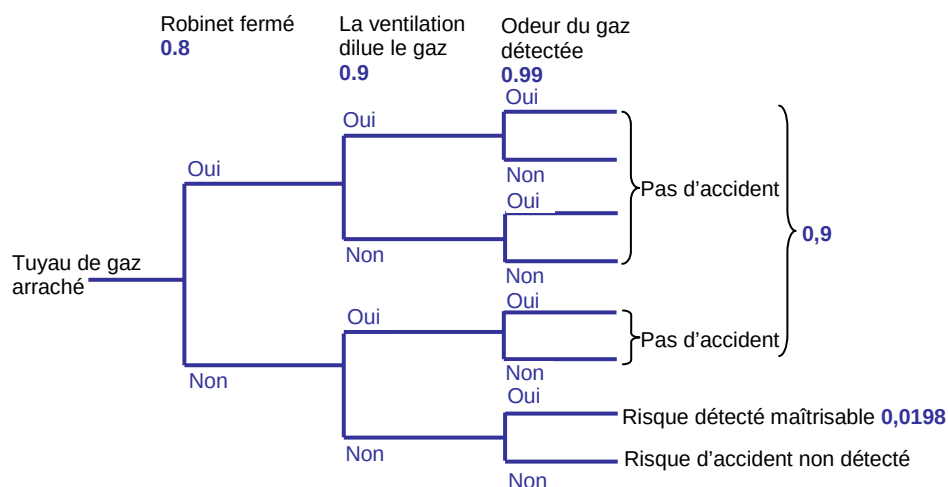


Fig.13 Arbre d'événement « tuyau de gaz arraché »

I.7.6. Diagramme de Fiabilité (DF)

Le diagramme de fiabilité permet de déterminer la fiabilité globale d'un système et présente l'intérêt d'offrir une modélisation quasi directe de sa vue fonctionnelle [Biro97] [Page80] [Zwin99].

Les diagrammes sont constitués d'une entrée E et d'une sortie S. La représentation consiste en la juxtaposition série, parallèle ou mixte de blocs associés aux entités de base du système, représentent généralement des composants, des sous-systèmes ou des fonctions et traduisant les conditions d'accomplissement du service à fournir par le système (figure 14). Le comportement des entités est binaire (fonctionnement /défaillance). Un bloc est considéré comme un interrupteur fermé lorsque l'entité est en état de fonctionnement ou un interrupteur ouvert lorsque l'entité est en état de panne. Le système est déclaré en état de fonctionnement si le "signal" qui entre dans le diagramme est récupéré à la sortie, sinon le système est en panne.

D'une part, le DF permet une analyse qualitative en déterminant les chemins qui conduisent à la réussite de la mission du système et la recherche des composants apparaissant dans le plus grand nombre de ces chemins et les scénarios qui conduisent à l'échec de la mission, pour éviter les incidents. D'autre part, le DF permet une analyse quantitative qui a pour objectif en particulier de définir la probabilité de bon fonctionnement du système. Les calculs reposent sur les probabilités de réussite des missions des constituants du système.

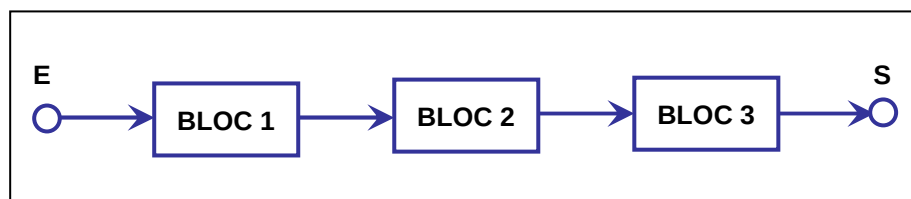


Fig. 14 Diagramme de fiabilité

I.8. L'analyse de dysfonctionnement par les outils de la théorie stochastique

Ces méthodes concernent le traitement de problèmes stochastiques, c'est-à-dire de problèmes aléatoires dépendant du temps. Il s'agit le plus souvent de méthodes dynamiques. Plusieurs formes successives ou alternatives de traitement sont possibles suivant les objectifs, engageant plusieurs caractéristiques d'outils (figure 15).

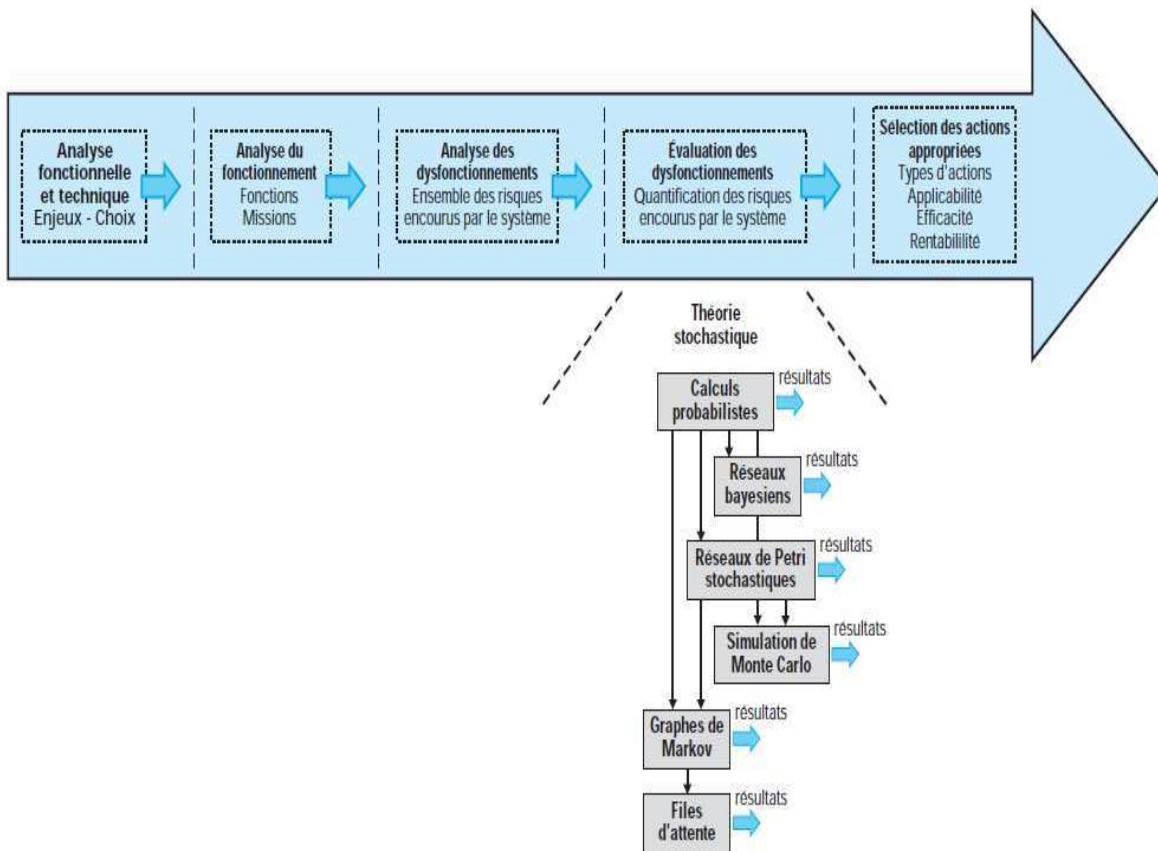


Fig.15 Outils de la théorie stochastique

I.8.1. Outils de calculs probabilistes

Il s'agit d'un ensemble d'outils utilisant les différents théorèmes généraux du calcul des probabilités (totales, composées, conditionnelles...), ces calculs permettent d'établir l'occurrence d'événements et les moyens de caractérisation des variables aléatoires pour simuler des lois de processus stochastiques [Mélé01] [Poir92].

I.8.2. Réseaux Bayésiens

Les réseaux bayésiens [Naim04] [Todd03], issus de la théorie des graphes, sont des graphes acycliques orientés. Ils sont constitués de nœuds n_i associés à des événements possédant un nombre fini d'états mutuellement exclusifs e_i , et des arcs a_{ij} indiquant la causalité entre les nœuds connectés.

Les réseaux bayésiens sont particulièrement utilisés dans un but d'aide à la décision et plus précisément dans l'élaboration de stratégies de maintenance des systèmes

complexes au travers du diagnostic de fautes lié à l'observation d'un état de panne du système [Maal03].

Les réseaux bayésiens peuvent représenter les relations de dépendances entre un événement indésirable (la défaillance d'un système ou un accident) et les causes de cet événement de manière plus générale qu'un arbre de défaillance, par exemple, ces causes n'étant pas obligatoirement binaires (fonctionnement ou défaillance) ou connectés par des portes logiques. Les causes de l'événement redouté peuvent être regroupées en facteurs organisationnels, en facteurs humains et en facteurs techniques [Raus04] (Figure 16).

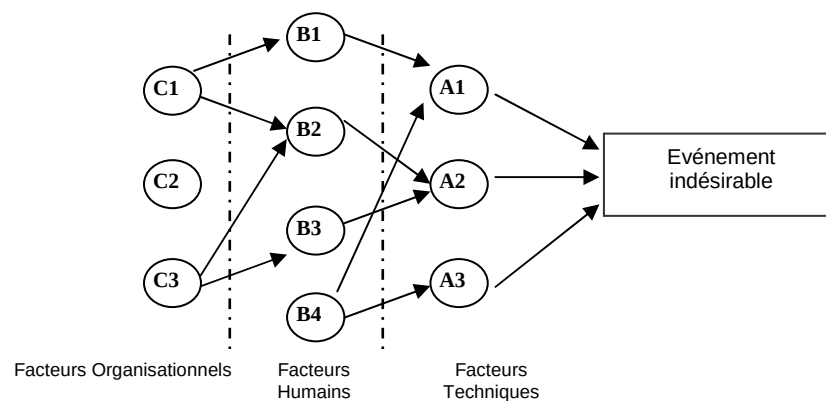


Fig.16 Exemple de Réseau Bayésien

I.8.3. Réseaux de Petri stochastiques

Les réseaux de Petri sont un outil d'analyse de la structure et du comportement des systèmes dynamiques à événements discrets [Lade89] [Dutu97].

Basés sur la description des relations existant entre les conditions et les événements intervenant sur le système, ils s'appuient sur une représentation mathématique qui s'ouvre à différentes formes d'analyse. Un réseau de Petri est un graphe orienté constitué de places, de transitions et d'arcs [Miha07]:

- les places sont représentées graphiquement par des cercles et peuvent être marquées par une ou plusieurs marques appelées jetons. L'ensemble des jetons associés aux différentes places constitue le marquage de réseau et correspond à un état du système modélisé,

- les transitions sont représentées par des rectangles et agissent, sous certaines conditions, sur le marquage du réseau,
- les arcs sont représentés par des flèches qui lient une place à une transition (arc amont) ou inversement une transition à une place (arc aval). Un poids (entier positif) peut leur être affecté. Par défaut, il est égal à 1.

D'une manière formelle, le réseau de PETRI (Rdp) est défini par $R = (P, T, A, W, M_0, \text{Pré}, \text{Post})$ [Laro11]:

- $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$, ensemble des places, $\text{Card}(P) = m$
- $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$, ensemble des transitions, $\text{Card}(T) = n$
- l'ensemble des arcs a_i de A , tel que $a_i \in A$;
- l'ensemble des poids w_i affectés aux arcs a_i , tel que $w_i \in W$, souvent égaux à 1 pour les réseaux déterministes ou évalués à partir des probabilités pour les réseaux stochastiques,
- le marquage initial M_0 avec ses jetons J .
- $\text{Pré}(p_i, t_i)$ est l'application d'incidence avant, de type $P \times T \rightarrow N$ correspond aux arcs allant d'une place vers une transition,
- $\text{Post}(p_i, t_i)$ est l'application d'incidence arrière, de type $T \times P \rightarrow N$ correspond aux arcs allant d'une transition vers une place.

L'ensemble des places, transitions et arcs constitue la partie statique de la structure du réseau de Petri. La partie dynamique du réseau (évolution) est obtenue par des franchissements de transition qui affectent son marquage. Dans le modèle réseau de Petri d'un système, le marquage du réseau représente l'état du système. Le comportement du système est simulé par les franchissements de transitions qui changent l'état du système. Pour qu'une transition soit franchie, il faut qu'elle soit valide ou sensibilisée, c'est à dire que toutes les places amont de la transition doivent posséder un nombre de jetons au moins égal au poids de l'arc qui les relie à la transition. Elle peut alors être franchie et ce franchissement consiste à retirer un nombre de jetons égal au poids de l'arc amont de chacune des places amont associées et à ajouter un nombre de jetons égal au

poids de l'arc aval dans chacune des places aval associées. Le nouveau marquage du réseau correspond au nouvel état atteint par le système.

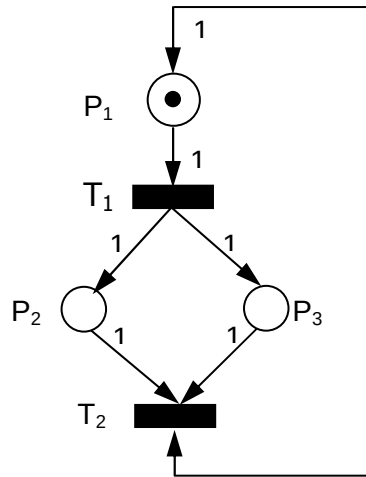


Fig. 17 Exemple de réseau de Petri

Le principal avantage des RdP est la possibilité d'analyser le comportement d'un système en présence de défaillances. Cette modélisation dynamique permet d'obtenir des mesures en terme de fiabilité, en assignant des valeurs numériques aux paramètres du modèle. Un RdP permet de modéliser d'une part le fonctionnement normal d'un système et d'autre part les occurrences de défaillances.

Les RdP stochastiques sont une extension des réseaux de Pétri pour lesquels est associée à chaque transition une variable aléatoire temporelle avec sa fonction de densité de probabilité. Trois classes des RdP stochastiques sont définies [Miha07] :

RdP stochastiques classique: Les délais associés à chaque transition sont des variables aléatoires qui suivent des lois de distribution exponentielle. A ce RdP stochastique, on peut associer une chaîne de Markov équivalente. Le graphe de Markov est obtenu directement à partir du graphe d'accessibilité du RdP stochastique en étiquetant chaque arc par un taux de transition d'un marquage à un autre. Le taux de transition est le paramètre de la loi exponentielle qui détermine le délai de franchissement de la transition respective. Pour les différents états, le calcul de probabilités instantanées est obtenu à partir du graphe de Markov.

RdP stochastiques généralisés : Dans les RdP stochastiques généralisés, les délais associés aux transitions temporisées suivent des lois de distribution exponentielle et certaines transitions sont immédiates (franchies dès la validation). Un RdP stochastique généralisé comprend deux types d'états : les états tangibles, pour lesquelles toutes les transitions sensibilisées sont temporisées et les états virtuels pour lesquelles il existe une transition immédiate sensibilisée. Une fois que les états virtuels sont éliminés, l'évaluation du marquage reste un processus markovien homogène.

RdP stochastiques déterministes : Dans les RdP stochastiques déterministes, les délais associés aux transitions temporisées suivent des lois de distribution exponentielle ou autre et certaines transitions sont immédiates. Pour ce type de RdP stochastiques, l'évaluation statistique est obtenue, généralement, à l'aide de la simulation Monte Carlo, afin de déterminer les probabilités des différents états car il n'existe pas d'expression analytique dans le cas général. Les RdP stochastiques permettent deux formes d'exploitation:

- l'analyse directe du graphe des marquages conséquents qui permet de caractériser les propriétés générales et spécifiques (analyse de points de vue) du modèle (le traitement du graphe de marquage est une analyse qualitative),
- l'exploitation du processus stochastique associé (markovien, semi markovien, avec points de régénération...) qui permet d'évaluer le comportement en régime permanent et transitoire du modèle (fréquence moyenne de franchissement de transition (événement), temps moyen de séjour dans les états tangibles...), cette approche est quantitative.

I.8.4. Graphes de Markov

Les graphes de Markov sont connus pour leurs utilisations et mises en oeuvres pour le traitement probabiliste des systèmes se comportant dynamiquement. Ils entrent dans la classe des approches analytiques par états basées sur l'identification des différents états (méthode de l'espace d'états) [Vill88] [Noye02] du système concerné puis sur l'analyse de la dynamique d'évolution entre ces états [Sign05].

Cette approche Markovienne consiste à représenter le fonctionnement d'un système par un ensemble de composants pouvant se trouver dans un nombre fini d'états

de fonctionnement et de panne. Le graphe des états permet de visualiser les différents états d'un système qui sont représentées par des cercles et relier entre eux par des arcs orientés qui correspondent aux transitions (pannes et réparations) entre états.

Les sommets du graphe correspondent aux différents états du système qui sont représentés par des cercles. Ils sont reliés par des arcs orientés affectés d'un taux (ou de probabilités) de transition non nuls associés aux événements correspondant aux conditions de transitions (pannes λ et réparation μ) qui font évoluer le système d'un état à un autre (Figure 18). Pour un système à n composants, si chaque composant a deux états (fonctionnement et panne), le nombre maximum d'états est 2^n .

Les graphes de Markov sont couramment utilisés pour étudier la fiabilité des systèmes réparables [Gira06] [Sign05]. Le modèle associe une représentation graphique et une écriture matricielle (matrice de transition).

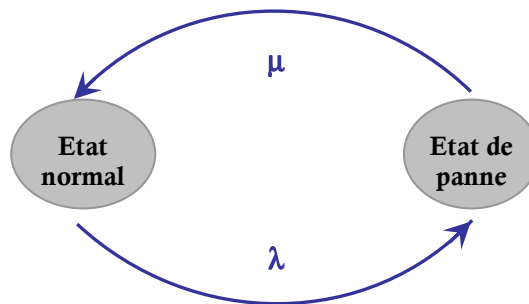


Fig.18 Exemple de modèle de Markov

Les traitements relèvent de calcul matriciel: à chaque instant t , la probabilité d'occupation d'un état du système ne dépend que de la distribution initiale (à $t = 0$) d'occupation des états et de la matrice de transition.

Les résultats sont quantitatifs : probabilités d'occupation d'états, fréquence d'événements etc, en régime transitoire ou permanent.

Une structure de coût (bénéfices, pénalités...) peut être associée aux temps d'occupation d'états ou aux événements déclencheurs de changement d'états permettant d'établir facilement différentes caractéristiques économiques.

Bien que l'approche Markovienne soit très flexible et puissante, elle n'en souffre pas moins de quelques limitations [Sign05], qui proviennent principalement de

l'impossibilité à utiliser d'autres lois que des lois exponentielles et de l'explosion combinatoire du nombre des états lorsque le nombre de composants élémentaires augmente, car tous les états possibles et toutes les transitions entre les états doivent être pris en compte dans le processus de modélisation. Cela limite sa mise en oeuvre rigoureuse aux petits systèmes.

I.8.5. Simulation de Monte-Carlo

Appelée Monte-Carlo par von Neumann par allusion aux jeux de hasard, le principe de la simulation de Monte-Carlo consiste à remplacer le calcul analytique par du calcul statistique en réalisant un grand nombre d'histoires du système étudié [Sign08]. L'approche consiste à créer un grand nombre de scénarii en répétant l'attribution d'une valeur numérique aux variables dépendant du déroulement des processus stochastiques.

Le principe de la simulation Monte Carlo est de développer un modèle analytique basé sur des tirages aléatoires. Le modèle est évalué en utilisant des données sur le système, pour prévoir son comportement, habituellement par de multiples simulations. Chaque évaluation (ou simulation d'un cycle) est basée sur des conditions aléatoires pour les paramètres d'entrée, puis un traitement statistique est effectué sur la distribution de probabilités des résultats successifs obtenus (calcul de moyenne, de la dispersion, etc.).

L'inconvénient de cette méthode est qu'il est obligatoire d'augmenter le nombre des simulations pour affiner l'évaluation des résultats.

Les étapes de réalisation de la simulation Monte Carlo sont les suivantes:

- définition du système en utilisant un modèle,
- génération des numéros aléatoires,
- génération des variables aléatoires,
- évaluation du modèle,
- analyse statistique des résultats,
- étude de l'efficacité et de la convergence de la simulation,

I.9. Conclusion

Le premier point abordé dans ce chapitre se focalise sur la définition de la notion de complexité et sur le rôle de la systémique dans l'analyse des systèmes complexes.

Il a été souligné aussi dans ce chapitre, la nécessité d'utiliser les approches de la systémique pour appréhender la complexité des systèmes, et d'utiliser leurs concepts théoriques pour l'analyse du comportement des systèmes complexes, en vue de leur compréhension.

Cette considération s'applique nécessairement aux études de sûreté de fonctionnement et de maîtrise des risques qui traitent les systèmes complexes hommes-machine en intégrant leurs défaillances potentielles. Les défaillances humaines et techniques qui apparaissent au sein de ces systèmes, mènent à des comportements difficilement prévisibles qui doivent pourtant être évités ou maîtrisés.

La sûreté de fonctionnement, ses concepts, ses moyens et ses méthodes sont ensuite présentés dans ce chapitre. Ainsi ces méthodes permettent une analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle des systèmes, et la modélisation des comportements de fonctionnement et de dysfonctionnement des systèmes complexes, selon une approche systémique, est à privilégier et à envisager dès la conception des systèmes. Cette approche intègre l'ensemble des interactions qui peuvent exister dans un système évoluant dans un environnement particulier.

Pour l'étude et l'évaluation de la sûreté ferroviaire, objet de nos travaux de recherche, où les multiples interactions avec son milieu environnant rendent ce système complexe, l'approche systémique permettrait une approche macroscopique de ce système dans son contexte général et de manière transversale.

Dans le chapitre suivant, nous allons aborder quelques approches d'analyse et de modélisation de la sûreté du système de transport ferroviaires, en particulier au niveau du Passage à Niveau, lieu de croisement entre la voie ferrée et la route, qui est considéré comme le point le plus sensible de la sûreté ferroviaire. Nous expliquerons aussi les limites de ces modèles à appréhender toute la complexité du Passage à Niveau, et à permettre à l'analyste sécurité de percevoir les causes possibles des dysfonctionnements de ce système aussi bien sous l'angle technique, économique que comportement humain.

Chapitre II

Sûreté ferroviaire au niveau du Passage à Niveau: Problématique et état de l'art

Sommaire

II.1. Introduction	50
II.2. Les modèles de risques de sûreté ferroviaire.....	51
II.2.1.Données requises pour la modélisation.....	51
II.2.2.Importance du comportement humain	52
II.2.3.Le modèle de risque SELCAT	54
II.2.4.Modèle du risque collision par réseau de Petri Stochastiques (RdPS).....	59
II.2.4.1.Modélisation du côté ferroviaire.....	60
II.2.4.2.Modélisation du côté routier	60
II.2.4.3.Modélisation du système de protection du PN	61
II.2.4.4.Modélisation du système global	62
II.2.4.5.Dynamique du modèle	62
II.2.4.6.Simulation du risque collision	63
II.2.5.Approche d'évaluation du Passage à Niveau par analyse fonctionnelle....	64
II.2.6.Autres approches.....	67
II.3. Conclusion et discussion sur les limites des modèles	70
II.4. Proposition d'une approche fondée sur le Retour d'Expérience et l'approche Bayésienne.....	72

II.1. Introduction

Le Passage à Niveau est considéré comme le point le plus critique dans la sûreté ferroviaire, car contrairement aux autres parties du réseau, les manoeuvres d'exploitation sécuritaire dépendent dans une large mesure du comportement correct des usagers de la route.

Malgré ce fait, le souci majeur de l'organisme ferroviaire ONCF a été toujours de réduire le risque de collision aux Passages à Niveau pour deux principales raisons : la première est que la collision entre un véhicule routier et un train peut provoquer le déraillement du train et ainsi causer la mort ou des blessures aux passagers et à l'équipage de bord. La deuxième est que l'ONCF opère selon des règles et des règlements stricts, et donc la ligne ferroviaire est plus facile à contrôler que les routes, où un grand nombre de conducteurs et de piétons agissent librement en enfreignant les règles de circulation avec peu d'impunité.

La photo 1 ci après illustre une collision entre un train voyageur et un bus de transport écolier survenu dans la région de Marrakech le 21 mai 2012 au niveau d'un Passage à Niveau non protégé. Le bilan est lourd : 5 morts et 16 blessés.



Photo. 1 Collision entre un train et un bus scolaire

Plusieurs documents élaborés sur la sécurité aux Passages à Niveau, les terminologies appropriées, la comparaison des facteurs de risques opérationnels, les importantes questions sur les facteurs humains, la psychologie d'avertissement et de signalisation, les pratiques et théorie d'évaluation et de gestion des risques, ont pour but de réduire et maîtriser le risque au niveau de ce point névralgique du réseau ferroviaire.

Dans ce chapitre, nous évoquerons les approches d'analyse de la sûreté des Passages à Niveau. La plupart de ces études ont concerné le développement des techniques de modélisation des risques sous forme d'arborescence ou autres.

II.2. Les modèles de risques de sûreté ferroviaire

Les modèles de risque sont progressivement développés dans le secteur des transports, et particulièrement en chemins de fer, pour permettre que les décisions soient prises là où les risques sont majeurs et trouver la manière de les réduire ou de les éliminer avec le souci primordial d'efficience des décisions sécurité.

Le risque est essentiellement une combinaison de la probabilité (la fréquence d'un danger susceptible de se produire) et une conséquence (si le danger se produit, quelles sont les conséquences) et donc un certain nombre d'importantes données d'entrées sont indispensables avant de pouvoir modéliser :

- Comment ces véhicules routiers et les trains entrent en collision?
- Combien de personnes seront dans ce véhicule routier, ou à bord du train?
- Quelles sont les vitesses du train et ces véhicules?
- Quelles sont les caractéristiques du lieu de croisement ?
- Etc.

Il est donc nécessaire de disposer des données fiables des niveaux de trafic, des vitesses, des accidents antérieurs, des presque accidents, des accidents actuels, etc. Une fois ces informations disponibles, il est possible de créer un modèle de la probabilité et des conséquences des accidents au niveau des Passages à Niveau.

Un des grands avantages que peut offrir la modélisation du risque, est qu'on peut examiner à travers des analyses et des études de simulation du système de protection du Passage à Niveau et de sa technologie, l'effet sur le risque quantifié.

II.2.1. Données requises pour la modélisation

L'ensemble des études ou modèles d'analyse de la sécurité au niveau des Passages à Niveau, nécessitent une grande connaissance des caractéristiques géométriques et de la densité du flux de trafic au niveau de ces Passages à Niveau.

Parmi ces données nécessaires, on peut citer:

- Type du Passage à Niveau (protégé,non protégé, etc.)
- Densité du trafic routier (éventuellement en fonction de l'heure et de la journée),
- La densité du trafic ferroviaire (éventuellement en fonction de l'heure et de la journée),
- Les paramètres géométrique du croisement (Longueur de la route, longueur traversée ferroviaire),
- L'orientation du Passage à Niveau (Nord/Sud , Est/Ouest),
- Vitesses de circulation routière et ferroviaire,
- Les incidents antécédents,
- Les attitudes des conducteurs,
- L'historique des défaillances,
- Les caractéristiques de la route d'approche (visibilité, surface,vitesse limite, vitesse réduite),

Nous rappelons aussi que le secteur ferroviaire est régi par des lois et textes réglementaires propres à chaque pays, qui conditionnent les pratiques et techniques mises en œuvre, et que la mise à jour de ces textes et lois nécessite le développement d'une base de données de performance de sécurité des Passages à Niveau.

II.2.2. Importance du comportement humain

Un grand nombre de travaux de recherches [Mich11] [SELC08] [SETRA08] ont souligné l'importance de prendre en compte les actions et les erreurs humaines aux Passages à Niveau, et la nécessité d'une approche centrée facteur humain plutôt que le recours à des solutions purement technologiques. En effet, les Passages à Niveau sont considérés par la plus part comme un problème qui relève uniquement de la Direction des chemins de fer, alors que la majorité des risques résulte du comportement des usagers de la route (environ 68% selon les statistiques des accidents de la Grande Bretagne, illustrées dans la figure 1 ci après [SELC08]).

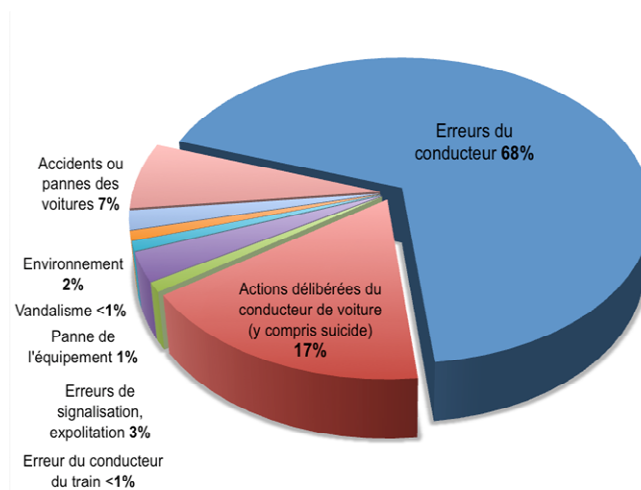


Fig. 1 Répartition des causes des accidents au niveau des Passages à Niveau en GB

D'autres travaux se sont intéressés à la psychologie des avertissements et des panneaux de signalisation au niveau du Passage à Niveau, et ont souligné les facteurs qui peuvent influencer le comportement humain et entraîner une incapacité à se conformer aux panneaux de signalisation et d'avertissement. Ils proposent aussi la détermination et l'évaluation des moyens opérationnels en terme de signalisation et de sensibilisation visant à modifier le comportement incorrect des usagers de la route.

Parmi les résultats de ces recherches psychologiques, il en ressort trois grands facteurs qui affectent le degré de respect des panneaux de signalisation et d'avertissement aux niveaux des Passages à Niveau par les usagers.

- **Le non respect des signalisations :** de nombreuses études ont constaté que des panneaux d'avertissement sont plus susceptibles d'être inefficaces si le temps d'attente pour se conformer à ces signalisations est perçu élevé par les usagers de la route. Réduire ce temps d'attente est un moyen très efficace d'accroître la sécurité.

- **La perception du niveau de risque:** elle a une forte influence sur la décision prise par l'utilisateur de la route à respecter ou non les signalisations. Plus la perception du danger est grande, plus l'utilisateur respecte les panneaux d'avertissement.

Plusieurs facteurs peuvent influencer le niveau de perception du risque par l'utilisateur de la route, on peut citer sa familiarisation avec le Passage à Niveau, présence de panneaux de publicité à côté des signaux d'avertissement qui peuvent dévier l'attention du

conducteur, l'aspect géométrique du signal d'avertissement (taille, couleur, forme, emplacement, etc.) peut ne pas communiquer la gravité du risque.

- **Les facteurs de décision personnelle, sociale et culturelle** : certains usagers de la route peuvent ignorer la signalisation d'être prudent à l'approche d'un Passage à Niveau, non pas parce qu'ils ont sur-évalué le temps d'attente, ou parce qu'ils ont sous-estimé le danger, mais parce qu'ils ont une tolérance élevée du risque qui les rend disposés à prendre des actions risquées tels que ignorer l'alarme et s'engager à l'intérieur du Passage à Niveau.

En effet, certains usagers de la route peuvent reconnaître l'existence d'un danger (train qui s'approche) mais tentent de maîtriser les risques en se comportant de manière sûre, par exemple traverser le passage avec une grande vitesse, tant que les barrières sont encore en cours de fermeture. L'entourage affecte aussi les notions individuelles d'acceptabilité des règles et normes car il n'est pas surprenant qu'un usager de la route soit influencé par l'attitude d'un autre usager de la route qui se conforme ou non aux panneaux d'avertissement.

II.2.3. Le modèle de risque SELCAT

Le projet SELCAT [SELC08] « Safer European Level Crossing Appraisal and Technology » qui a été initié par l'Union Européenne en 2006, a examiné au cours de 22 mois d'études, les théories et les pratiques de modélisation des risques, et son application au Passage à Niveau par les divers partenaires du monde entier de ce projet. Le but du projet SELCAT est de:

- Fournir une base de connaissance pour l'amélioration de la sécurité au niveau des Passages à Niveau, par l'analyse des résultats des études sécurité relatives aux transports routier et ferroviaire,
- Fournir un aperçu sur les recherches de sécurité ferroviaire existantes et planifiées dans 15 pays des 3 continents : Europe, Asie et Afrique,
- Analyser les bases de données des incidents et accidents relatives aux Passges à Niveau du monde entier,
- Proposer un standard pour le reporting des accidents au niveau de l'Europe,

- Concevoir un système d'information commun relatif aux accidents des Passages à Niveau,
- Examiner l'efficacité des technologies existantes et nouvelles pour améliorer la sécurité et les performances du système de Passage à Niveau,
- Examiner l'efficacité des méthodes de classification des solutions technologiques visant à améliorer la sécurité du système route/voie ferrée.

A l'issue de ce travail d'harmonisation et de comparaison des différentes approches et études de sécurité des différents pays membres de ce projet, il en ressort les conclusions et directives importantes telles que:

- Les techniques de modélisation du risque sont de plus en plus disponibles pour être utilisées comme outils de décision afin d'identifier les activités à risques élevés et où les ressources limitées et investissements doivent être mieux gérés.
- Tels outils peuvent être conçus pour permettre la modélisation du risque au niveau d'un site de Passage à Niveau et des comparaisons peuvent être faites entre les différents lieux, types de Passages à Niveau, groupes géographiques, pays, etc.
- Avant de développer de tels outils, il est essentiel de recueillir les informations concernant les spécificités des lieux, les statistiques du flux du système routier/ferroviaire, de préférence sur plusieurs années, afin de fournir une base fiable pour la modélisation. Lorsque certaines de ces informations ne sont pas disponibles, d'autres techniques de collecte de ces informations peuvent être utilisées (brainstorming, ingénierie appliquée aux jugements et décisions, techniques d'apprentissage etc.).
- La sécurité au niveau des Passages à Niveau n'est pas principalement une activité ferroviaire, mais elle concerne les deux secteurs routier et ferroviaire qui ont besoin de travailler en partenariat afin d'établir des actions dont la mise en œuvre effective relève de leur responsabilité conjointe.

Le modèle générique du Passage à Niveau et l'outil de décision des actions sécurité prioritaires et efficaces permettent de calculer les impacts suivants:

- La sûreté mesurée en termes d'accidents mortels et blessures mineures ou majeures,

- Le coût en termes d'investissement sécurité,
- La performance en terme de retard des trains et des usagers de la route.

L'approche développée par SELCAT pour la modélisation du risque a classifié le type d'informations qui peuvent être fournis dans une grille verticale allant de 0 à 4, selon la complexité du modèle à établi, comme indiqué dans la figure 2 ci-dessous :

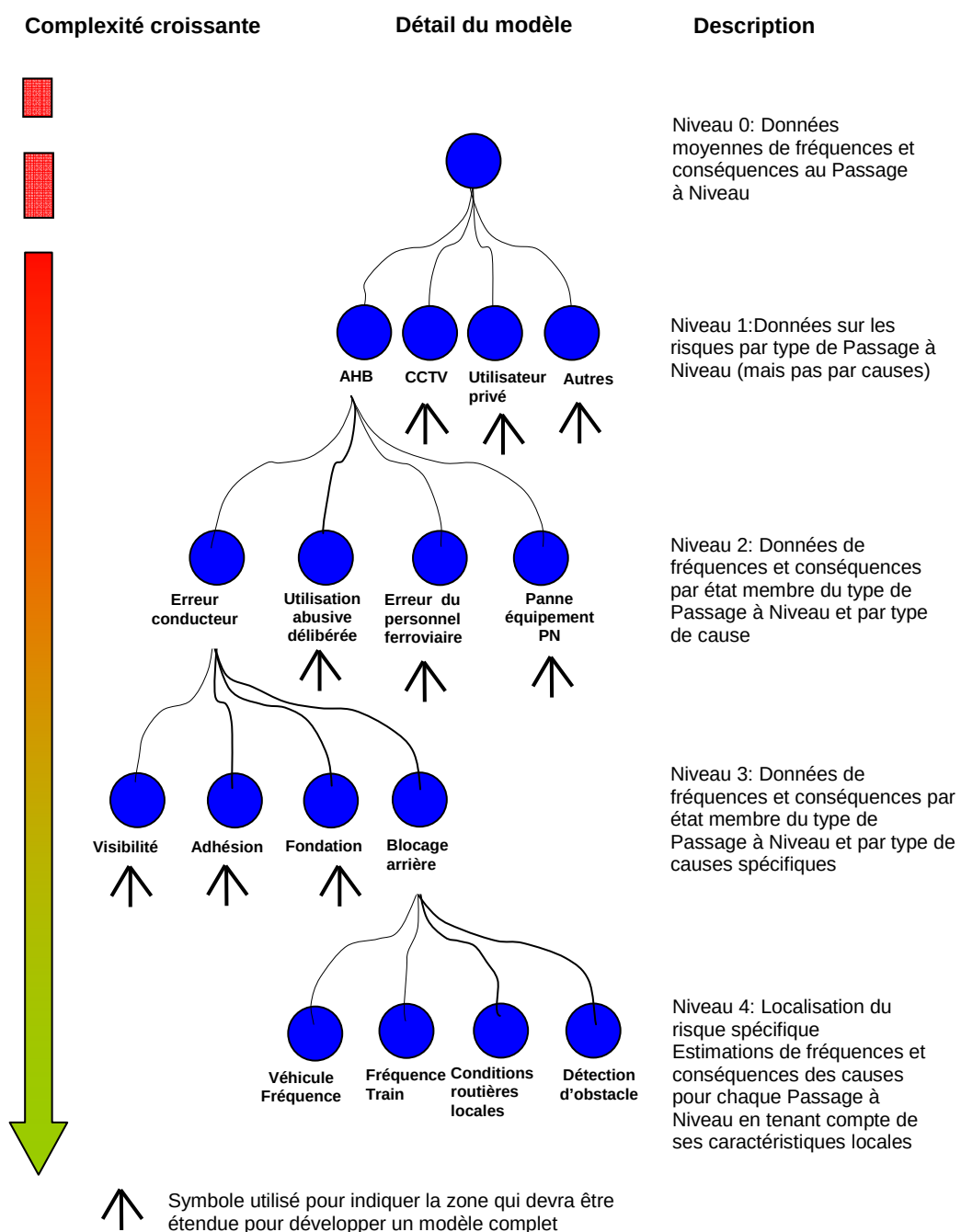


Fig. 2 Niveaux de détails des modèles de risques des PN (SELCAT)

Les cinq niveaux de modélisation de 0 à 4 reflètent le degré d'informations ou de détails nécessaires pour permettre aux décideurs et ingénieurs sécurité d'accomplir les actions désirées en terme de gestion et maîtrise du risque.

Objectifs	Niveaux de modélisation				
	niveau 0	niveau 1	niveau 2	niveau 3	niveau 4
Evaluation de la contribution des passages à niveau dans l'ensemble du risque ferroviaire.	√ √ √	√ √ √	√ √ √	√ √ √	√ √ √
Evaluer les avantages de la mise à niveau d'un type de PN à autre type existant.		√ √	√ √	√ √	√ √ √
Identifier les types de PN qui présentent les risques élevés.		√ √ √	√ √ √	√ √ √	√ √ √
Evaluer les causes génétiques des risques à différents types de PN.			√ √ √	√ √ √	√ √ √
Informen une stratégie nationale des moyens de traitement des risques pour chaque type de PN.			√	√ √	√ √ √
Identifier pour chaque type de PN, les sources de risques dominants.			√	√ √	√ √ √
Evaluer les causes spécifiques du risque pour différents types de PN.			√	√ √	√ √ √
Mettre en œuvre une stratégie nationale pour remédier aux principales causes de risque pour chaque type de PN.			√	√ √	√ √ √
Evaluer le risque à un PN spécifique.					√ √ √
Identifier les PN spécifiques qui présentent des niveaux de risques disproportionnés.					√ √ √
Informen une stratégie pour mettre à niveau un PN spécifique.					√ √ √
Identifier le moyen le plus efficace pour remédier aux risques des PN spécifiques.					√ √ √
Evaluer les performances des actions sécurité qui peuvent être atteints à partir de différents niveaux d'investissement.					√ √ √
Priorisation du programme d'amélioration de la sécurité des PN.					√ √ √

Tab. 1 Objectifs fournis par les différents niveaux du modèle SELCAT

Le modèle de risque SELCAT des Passages à Niveau possède trois composantes comme indiqué dans la figure 3 ci dessous:

1. *Les Arbres de défaillance*, qui sont utilisés pour estimer la fréquence des collisions entre les trains et véhicules routiers aux Passages à Niveau,

2. *Les arbres d'événements*, qui exploreront la manière dont l'événement peut dégénérer (déraillement du train, heurt des obstacles, incendie, etc.)

3. *L'ensemble des conséquences prévues* estimant ainsi les impacts probables des accidents.

Arbre d'événements (simplifié)

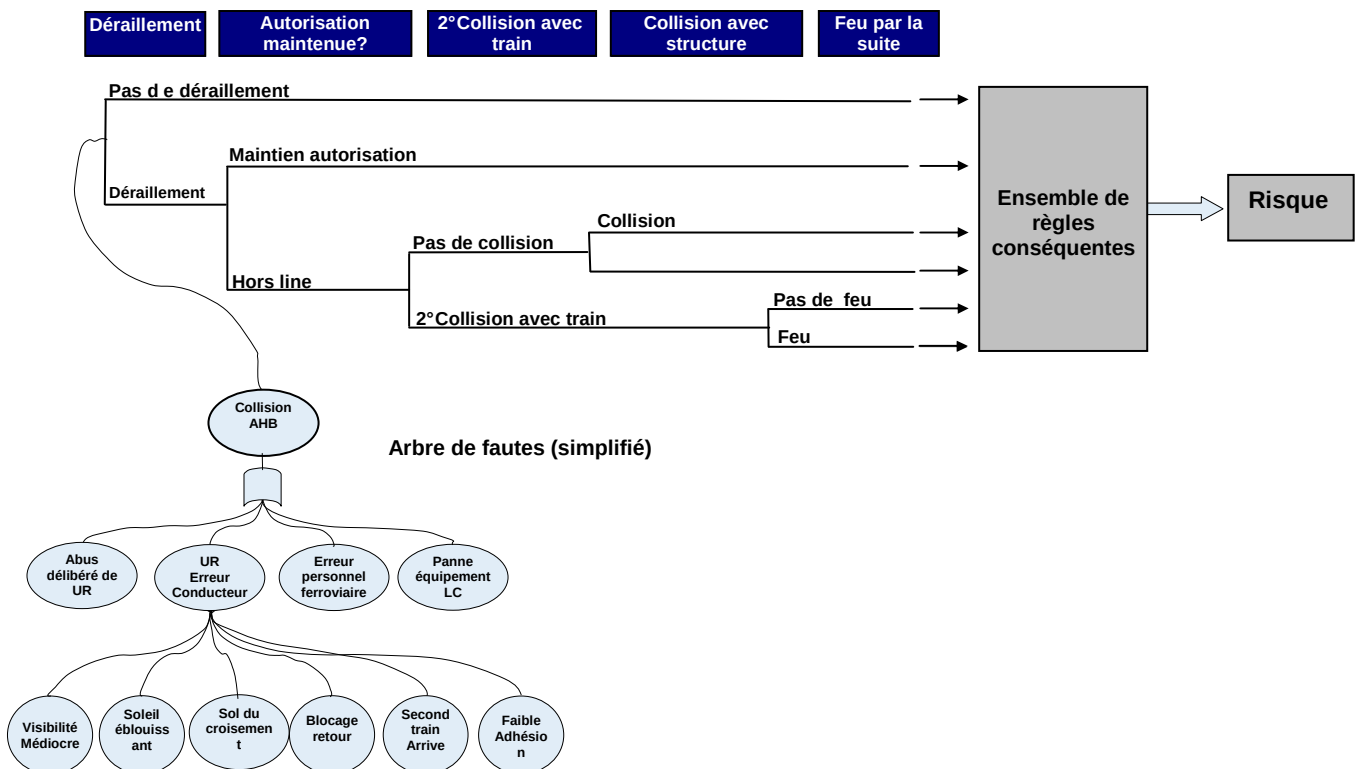


Fig. 3 Illustration des trois composantes du modèle de risque SELCAT des PN

La première étape de l'élaboration du modèle est d'identifier les causes des accidents qui peuvent contribuer au risque collision aux Passages à Niveau. Ces causes sont regroupées en quatre types de causes génériques:

- L'abus délibéré des usagers de la route,
- L'erreur du gardien du Passage à Niveau ou de la signalisation,
- La défaillance de l'équipement du Passage à Niveau,
- L'erreur non intentionnée de l'utilisateur de la route, pour des raisons de visibilité, ou viabilité du PN, conditions climatiques etc.

La figure 4 ci dessous montre l'ensemble des causes identifiées pour le risque accident au Passage à Niveau de type semi-barrières automatiques « AHB :Automatic Half Barriers ».

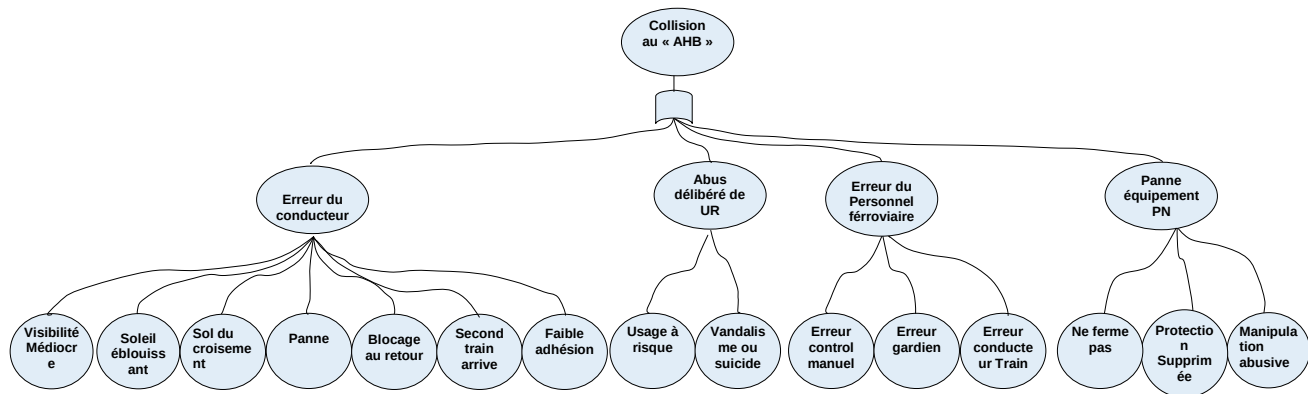


Fig. 4 Arbre de causes des accidents au niveau du PN type AHB

II.2.4. Modèle du risque collision par réseau de Petri Stochastiques (RdPS)

[Ghaz08] a proposé un modèle basé sur les réseaux de Petri (RdP) pour évaluer le risque collision au niveau du Passage à Niveau, causé par la formation de bouchons au niveau du trafic sur la voie routière croisant la ligne ferroviaire, aux moments des embouteillages.

Le modèle proposé considère un PN de type protégé, sur un croisement d'une ligne ferroviaire à voie unique avec une voie routière à double sens, et équipé d'un système de détection de trains (pédales d'annonce), de feux de signalisation et de deux demi-barrières.

Il a été constaté à plusieurs reprises, quand le PN est ouvert (barrières en position haute et feux routiers au vert), et lorsqu'un bouchon se forme à la sortie du PN, les automobilistes à l'entrée du PN ne s'arrêtent pas avant la barrière protégeant l'entrée du PN, mais accèdent à la Zone de Croisement (ZC) du PN, au risque de rester bloqués sur la voie ferrée. En principe, ce genre de comportement des conducteurs est interdit par le code de la route, puisque même si le PN est ouvert au trafic routier, l'automobiliste doit s'assurer de pouvoir quitter la zone de croisement du PN en toute sécurité avant de s'engager.

Dans le modèle de réseaux de Petri Stochastiques (RdPS) utilisé, le facteur temps est représenté explicitement sur les transitions, sous forme de délais fixes ou de

distributions probabilistes et l'utilisation des arcs inhibiteurs permet d'éviter la complexité du modèle.

Afin de développer un modèle de comportement complet de l'environnement du Passage à Niveau, il a été procédé à sa décomposition en sous-systèmes. Le modèle complet est finalement obtenu par l'intégration de l'ensemble de ces modèles élémentaires. Les trois modèles élémentaires qui constituent la dynamique du système PN et qui représentent chacun une partie de l'environnement du PN sont:

1. Le trafic routier,
2. Le trafic ferroviaire,
3. Le système de protection du PN.

II.2.4.1. Modélisation du côté ferroviaire

Le trafic ferroviaire de ce modèle a comme hypothèse qu'il s'agit d'une voie simple à sens unique, avec l'existence de deux types de trains : train fret et trains voyageurs caractérisés par des vitesses différentes. Le modèle élémentaire du coté ferroviaire est présenté sur la figure 5.

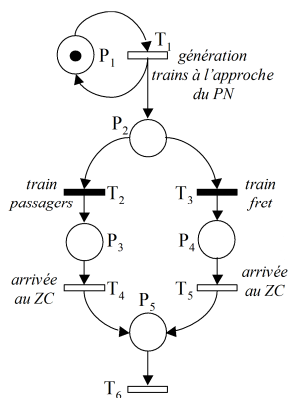


Fig. 5 Modèle élémentaire Rdp du côté ferroviaire

II.2.4.2. Modélisation du côté routier

Afin de déterminer le risque imputé exclusivement au problème de bouchon, le modèle est réalisé sous les hypothèses d'absence des autres comportements inadmissibles des usagers de la route (passage en chicane, accidents de circulation, etc.) et que la formation de bouchon se fait sur une seule direction de la route.

Le modèle élémentaire du coté routier est présenté sur la figure 6:

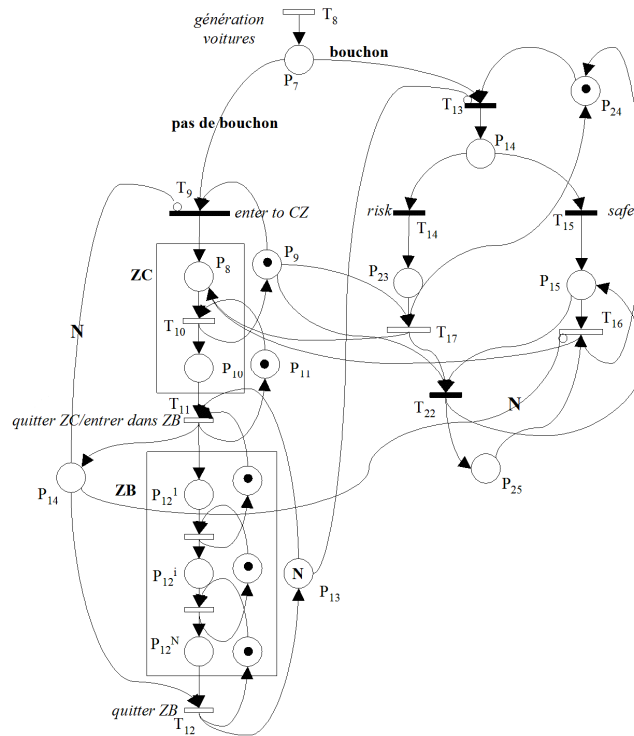


Fig. 6 Modèle élémentaire Rdp du côté routier

II.2.4.3. Modélisation du système de protection du PN

Le fonctionnement du système de protection du PN est modélisé comme suit pour mettre en évidence les états de fermeture et d'ouverture:

- Le PN est considéré fermé au trafic routier à partir du moment où les feux rouges sont allumés (début de descente des barrières),
- Il est considéré ouvert au trafic routier une fois que les feux rouges sont éteints et les barrières complètement remontées.

Le modèle élémentaire du système est présenté sur la figure 7 :

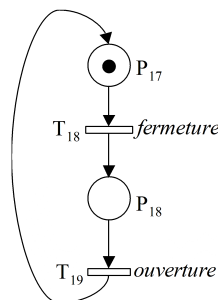


Fig. 7 Modèle élémentaire du système de protection du PN

II.2.4.4. Modélisation du système global

L'intégration des sous modèles en vue de l'établissement du modèle comportemental global se fait par l'introduction des deux interactions de comportements des sous systèmes:

- La première interaction : entre le trafic ferroviaire et le système de contrôle ferroviaire. Le PN commence à fermer le trafic après une temporisation de l'annonce de l'arrivée du train (pédale d'annonces).
- La deuxième interaction : entre le système de contrôle du PN et le trafic routier, traduite par l'interdiction du franchissement des transitions correspondant à l'entrée de véhicules dans la zone de croisement quand le Passage à Niveau est fermé.

Le modèle global est présenté sur la figure 8:

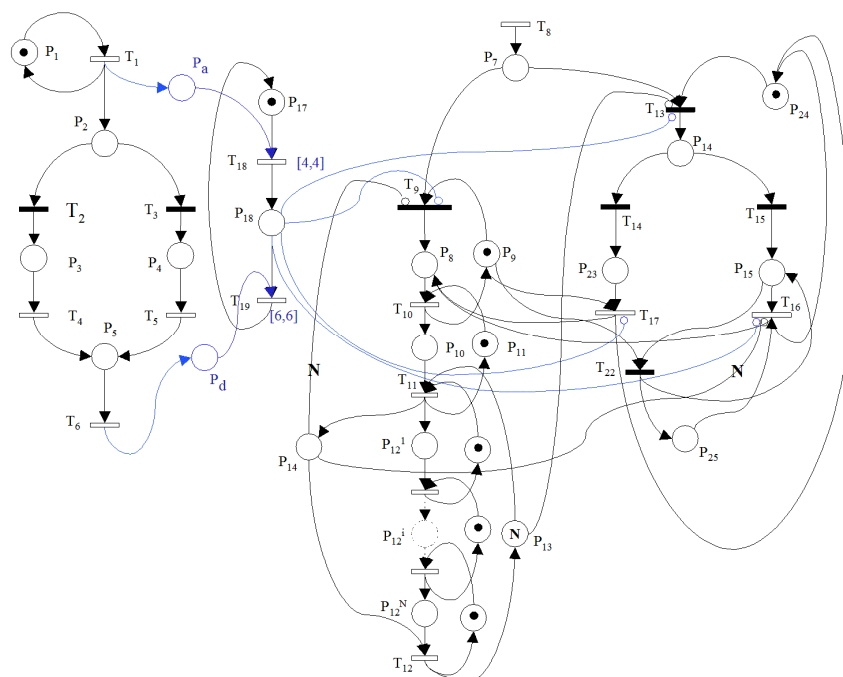


Fig. 8 Modèle global du système PN avec Rdp

II.2.4.5. Dynamique du modèle

La dynamique de ce modèle basé sur le réseau de Petri est assurée en affectant soit les dates d'occurrence des actions, soit la probabilité de leur occurrence :

- pour les actions dont la date relative de tir est fixe, comme par exemple la remontée des barrière, un intervalle est associé à la transition correspondante.
- pour les actions dont la durée tourne autour d'une moyenne connue, la loi normale tronquée autour de cette valeur moyenne est choisie.
- pour les actions qui ne présentent pas une certaine régularité, comme par exemple la génération de véhicules au niveau du PN, la loi de Poisson est utilisée.

II.2.4.6. Simulation du risque collision

La simulation effectuée a pour but d'étudier l'influence des paramètres suivants sur le risque collision:

- La longueur N de la file des véhicules sur la zone de bouchon,
- Le taux P_{risque} qui reflète la proportion de véhicules qui s'engagent sur la zone de croisement malgré la formation du bouchon,
- La durée D d'ouverture continue de la circulation dans chaque sens de circulation.

Pour chaque valeur de N , le risque collision est évalué en fonction des deux paramètres D et P_{risque} . Les résultats de la simulation montrent que pour une valeur fixée de N , une plage de valeurs de D permet d'avoir un risque de collision quasi nul, le risque augmente par intervalle de manière quasi-linéaire en fonction de D , avant de se stabiliser. L'influence pour une grande valeur de N sur le risque collision, devient de plus en plus prépondérante par rapport à celle de P_{risk} .

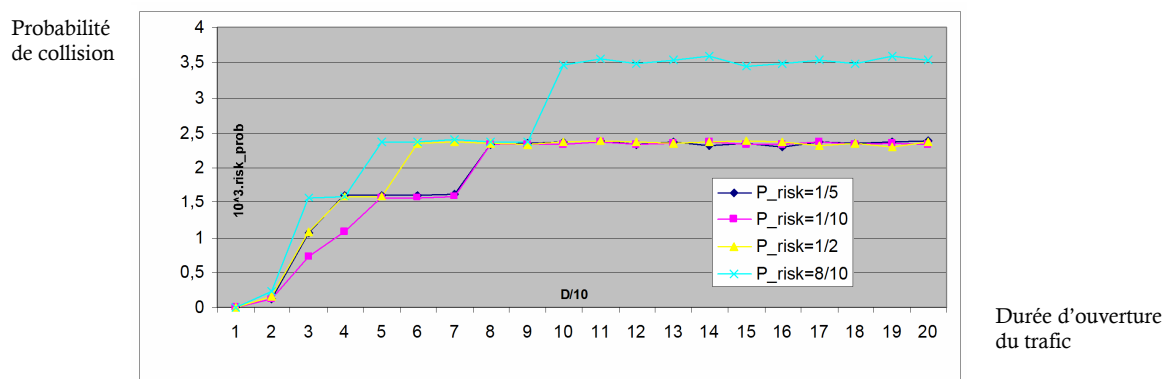


Fig. 9 Résultats du modèle Rdp du PN pour $N=6$

II.2.5. Approche d'évaluation du Passage à Niveau par analyse fonctionnelle

[Simo10] a proposé d'évaluer les performances des Passages à Niveau en analysant ses fonctions requises, qui consistent à gérer l'interface route/voie ferrée. Ces fonctions sont développées selon la figure 10 ci-dessous :

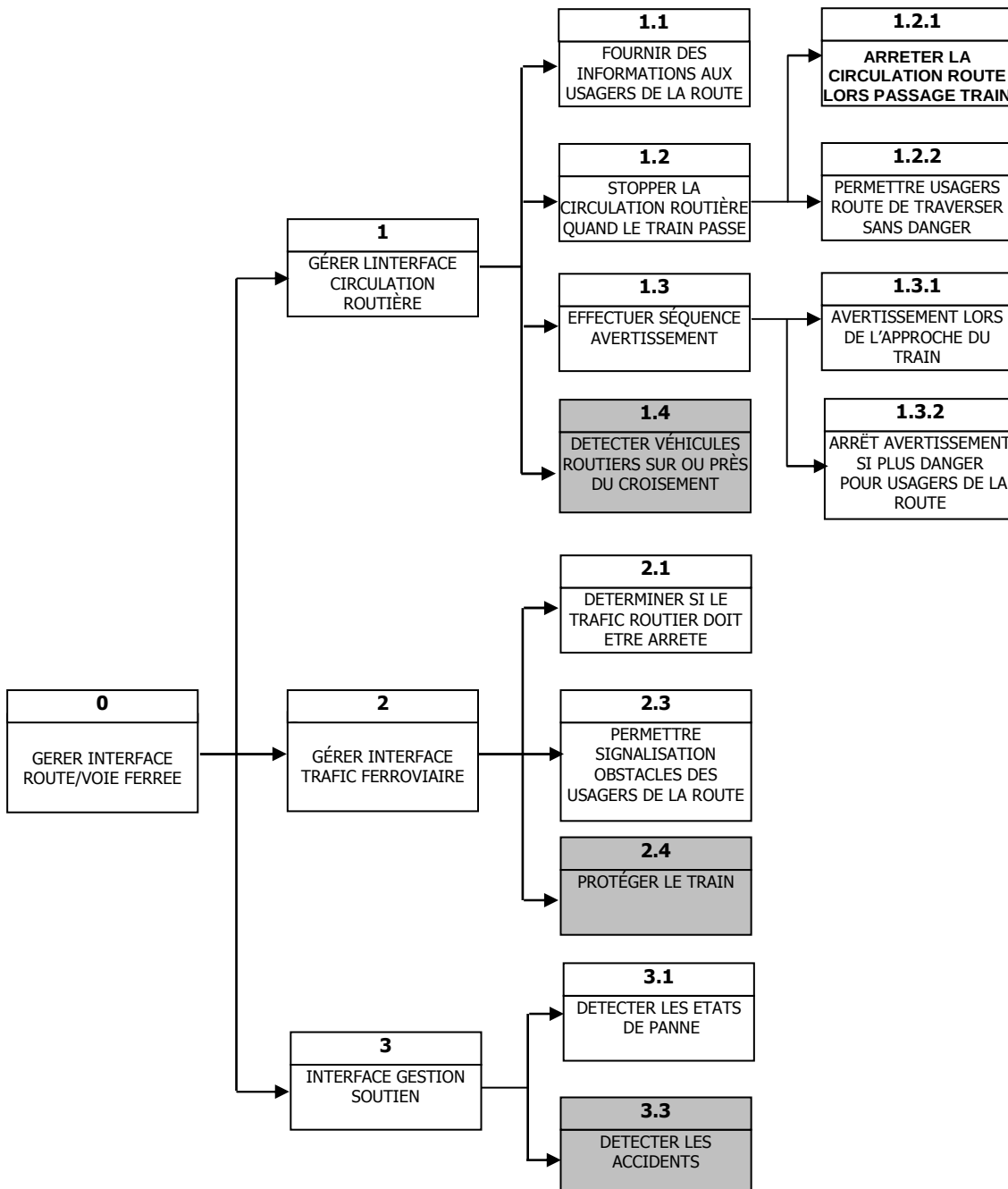


Fig. 10 Analyse fonctionnelle du Passage à Niveau

La détection d'obstacle à l'intérieur de l'enceinte du Passage à Niveau est une solution qui a été utilisée dans le monde entier. Plusieurs méthodes ont été développées

qui utilisent des faisceaux laser, radar, boucles inductives et l'échographie. La fonction de base d'un système de détection d'obstacle est de détecter si un véhicule routier obstrue la voie ferrée. A travers le système de signalisation, le conducteur du train est averti pour qu'il s'arrête à l'approche du Passage à Niveau, et évitant ainsi les collisions.

Cette analyse fonctionnelle et d'évaluation de la performance ont pris le cas du PN équipé de demi-barrières automatiques (Photo. 2) équipé ou non de détecteur d'obstacle. Ces types de barrières ont été conçues pour améliorer le trafic routier en minimisant le temps de fermeture de la route, et afin d'être plus économique en supprimant les barrières à fermeture manuelle. Le fonctionnement de ces passages est déclenché automatiquement par l'approche d'un train, une séquence d'avertissement commence immédiatement et est suivie par l'abaissement des barrières qui s'étendent sur la moitié de la chaussée seulement, permettant aux véhicules situés déjà sur le passage de quitter sans entrave.

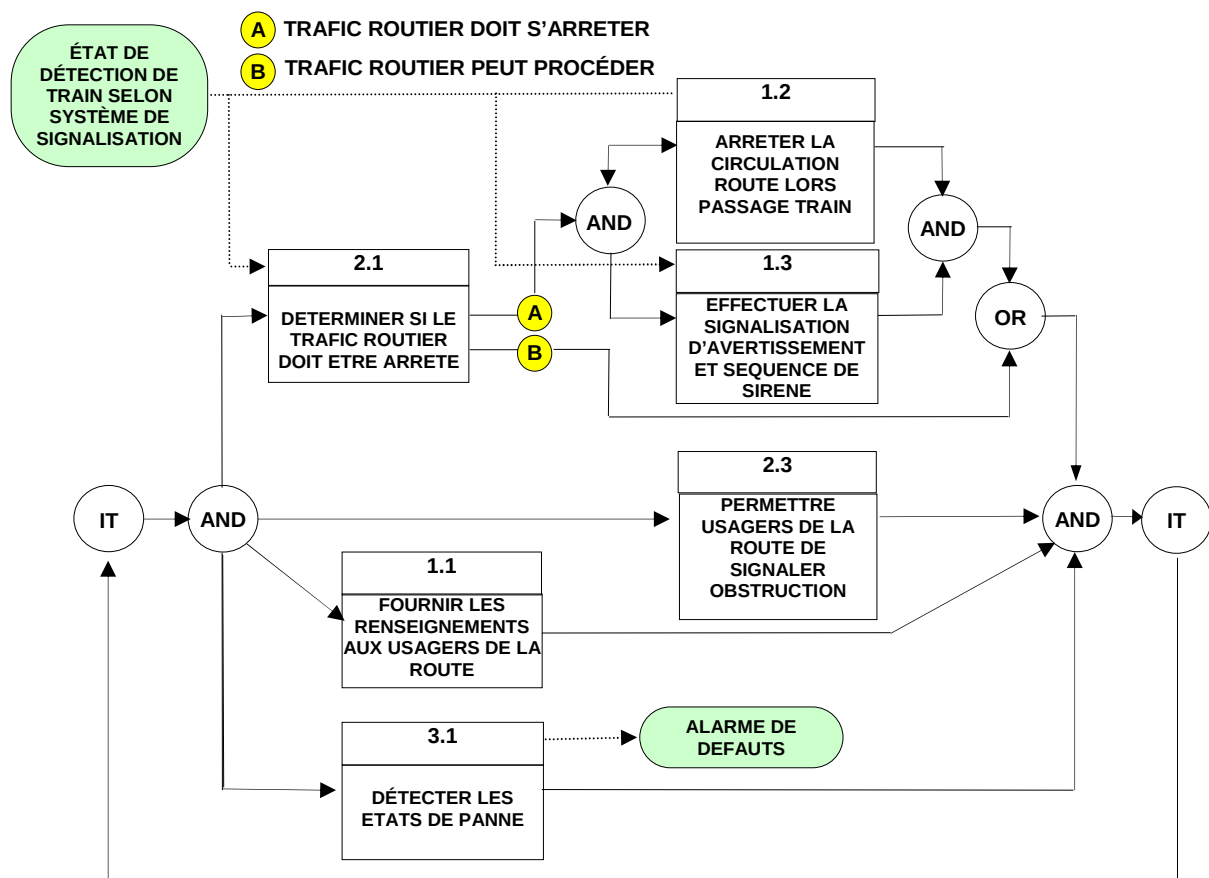


Fig. 11 Analyse fonctionnelle du PN type AHB sans détecteur d'obstacle

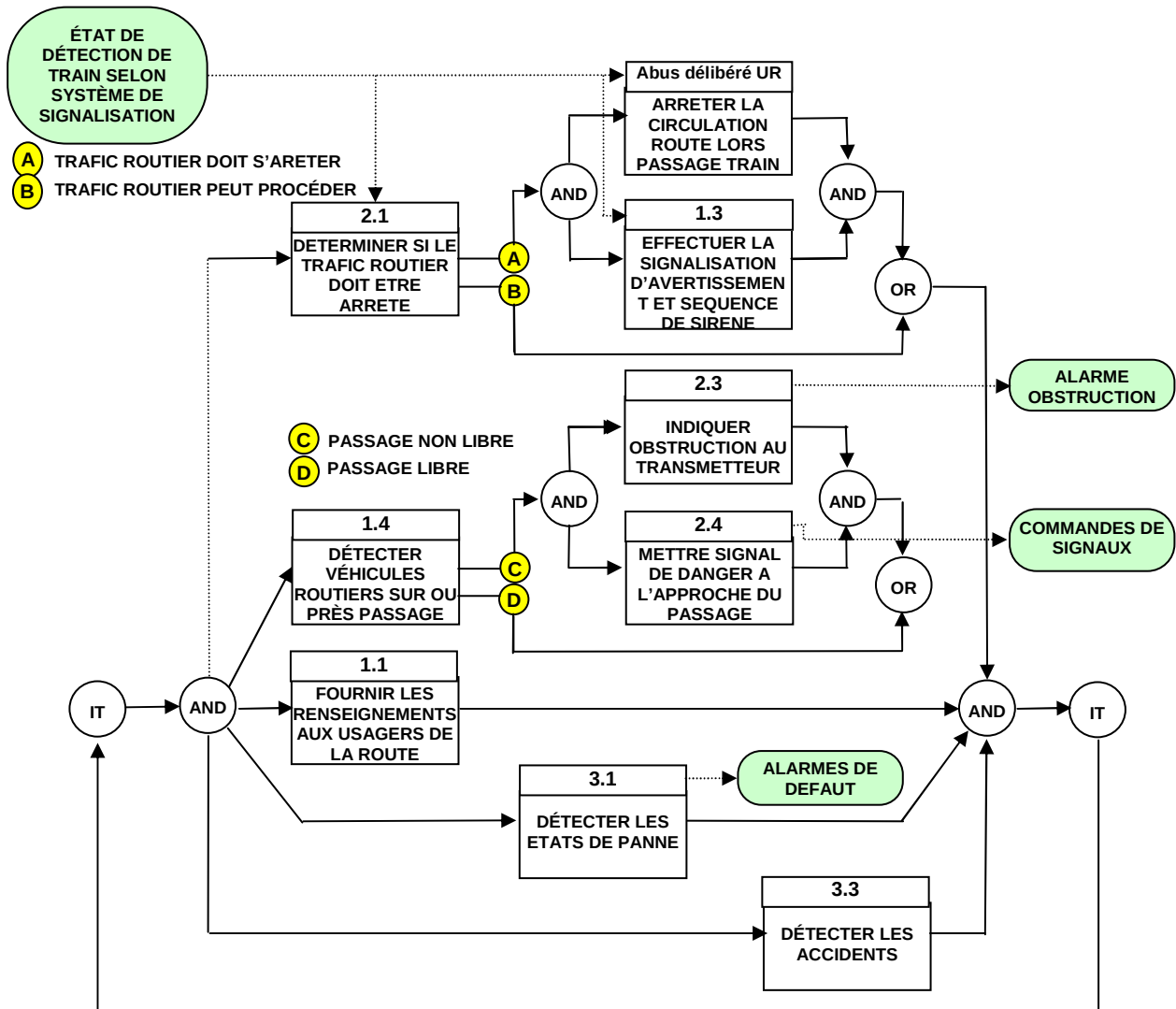


Fig. 12 Analyse fonctionnelle du PN type AHB avec détecteur d'obstacle



Photo. 2 Passage à Niveau automatique à demi-barrières (AHB)

Un indicateur de performance du PN à demi-barrière automatique est calculé selon la formule suivante [Simo10]:

$$P_i = A_i \times P_{fr} \times P_{nc} \quad (II.1)$$

A_i = disponibilité,

P_{fr} = probabilité de panne du dispositif semi barrière,

P_{nc} = probabilité qu'il n'ait pas de collision quand un véhicule est coincé à l'intérieur du Passage à Niveau.

L'indicateur de performance P_i est calculé à travers le modèle fonctionnel établi pour les deux variantes : le PN à demi barrière automatique est équipé ou non de détecteur d'obstacle (figures 11 et 12). Les résultats des calculs ont montré que cet indicateur de performance est passé de **75,3%** à **88,9%** en supposant que le détecteur d'obstacle est fiable et disponible à 100%.

II.2.6. Autres approches

[Xued10] a élaboré une méthode statistique basée sur une arborescence hiérarchique de régression HTBR (Hierarchical Tree-Based Regression), pour la prédiction des accidents entre train et véhicules au niveau des Passages à Niveau ferroviaires. En utilisant la base de donnée de « Fédéral Rail road Administration (FRA)» aux Etats Unies d'Amérique, cette recherche se focalise sur les accidents train véhicule au cours de 27 ans entre les années 1980 et 2006. Cette étude a été menée aux niveaux des Passages à Niveau équipés uniquement de panneaux d'arrêt, sans être équipés d'autres appareils de contrôle de trafic ou de contre mesures automatiques.

Le modèle HTBR développé pour prédire les fréquences des accidents entre train et véhicule a été utilisé au niveau de deux types de Passages à Niveau: PN équipé uniquement de croix d'avertissement et PN combinant à la fois le panneau de croix d'avertissement et le panneau STOP.

Les résultats de l'étude indiquent que les panneaux STOP constituent un moyen efficace de contre mesure pour améliorer la sécurité des Passages à Niveau. Les décideurs et ingénieurs de circulation peuvent utiliser ce modèle HTBR pour examiner la fréquence des accidents et évaluer l'efficacité potentielle du panneau STOP selon les spécifications de chaque Passage à Niveau.

L'étude du facteur humain, principalement les usagers de la route, qui reste déterminant dans la survenue des accidents et incidents au niveau du Passage à Niveau, vise à analyser le comportement des conducteurs lors du croisement avec la voie ferrée, et

ce dans le but d'évaluer le système de protection actuelle, ou l'effet de l'implémentation de nouvelles technologies de protection au niveau du PN.

Un exemple de cette étude de simulation [Mich11], a pour objet d'étudier le comportement des conducteurs, suite à l'installation par les autorités ferroviaires et routières australiennes, des dispositifs de contrôles actifs constitués de feux rouges clignotants, dans les PN situés dans les zones rurales et protégés uniquement par des panneaux «Céder» ou «Stop» . La simulation de conduite a montré que la vitesse moyenne des véhicules à l'approche du Passage à Niveau a diminué plus rapidement en réponse à des lumières clignotantes que des panneaux d'arrêt (Figure 13). Ce résultat confirme la pertinence de cette action sécurité, visant à continuer à améliorer la signalisation routière « STOP » par des feux rouges clignotants.

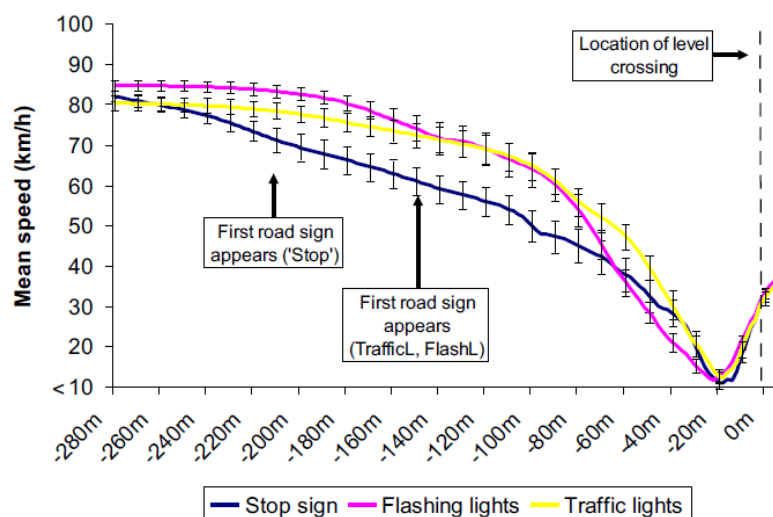


Fig. 13 Profils des vitesses moyennes d'approches du PN

D'autres travaux de recherche ont visé l'élaboration d'un outil d'aide à la décision dans le domaine de la sécurité ferroviaire [Wash06]. En effet, les exploitants ferroviaires sont parfois confrontés à des décisions difficiles concernant la sécurité du transport dans un contexte d'incertitude, surtout lorsqu'il s'agit d'investissements lourds. En particulier, un exploitant peut s'attendre à choisir parmi un éventail de technologies ou des contre-mesures pour remédier aux problèmes de sécurité perçues lorsque:

- Peu d'informations sont connues sur l'effet de la contre-mesure sur la sécurité,
- L'information est connue, mais de différentes régions, états ou pays où une généralisation directe ne peut être appropriée,
- La pertinence de la technologie à instaurer ou les contre-mesures sont relativement non prouvées,
- Les coûts des essais complets et minutieux de chacune des contre-mesures proposées sont excessifs.

L'importance d'une décision éclairée et réfléchie sur la base des connaissances d'ingénierie et de meilleures informations est impérative en raison de l'impact potentiel sur le nombre de blessures et de décès humains qui pourraient résulter de ces investissements.

Dans ce contexte, le travail de [Wash06] décrit la formalisation et l'application d'une méthodologie pour évaluer l'efficacité de 18 contre mesures pour améliorer la sécurité des PN en République de Corée. Pour ce faire, il vise à estimer la densité du 'Facteur de Modification de l'Accident' (FMA) à partir des avis d'experts. Dans ce cadre d'analyse complète, les avis collectifs sont combinés avec une connaissance à priori des densités pour 18 contre-mesures, afin d'obtenir une meilleure estimation de chaque densité dans un intervalle de crédibilité. Pour les 18 contre mesures analysées, il a été constaté que les trois contre mesures les plus performantes pour réduire les accidents sont :

1. les systèmes d'alerte des véhicules,
2. les systèmes de détection d'obstacle,
3. les délais des systèmes d'avertissement.

[Juta06] a examiné les relations entre les accidents et les caractéristiques des Passages à Niveau où ils ont eu lieu. Différents modèles statistiques de prédiction des accidents aux PN ont été cités dans son étude (distribution de Poisson, distribution binomiale négative, distribution de gamma, Formule de Peabody Dimmick, Formule de prédiction du Département des Transports au Etats Unis : USDOT, etc.). Une comparaison a été effectuée sur la capacité de ces modèles à prendre en considération les

aspects géométriques du PN et les caractéristiques du trafic ferroviaire et routier. [Juta06] compare aussi les modèles statistiques d'accidents développés aux Etats-Unis et leurs effets sur les accidents au niveau des PN Coréens, en utilisant les bases de données des accidents de la Corée.

II.3. Conclusion et discussion sur les limites des modèles

Nous avons passé en revue dans ce chapitre quelques modèles d'analyse des risques aux niveaux des PN, qui ont été élaborés sous différentes formes (lois statistiques de probabilités, modèles arborescents, modèles dynamiques de comportement des composantes matérielles, etc.).

La diversité des composants de l'environnement du système du PN a fait que ces modèles ont examinés soit:

1. les aspects techniques et technologiques relevant de l'infrastructure à travers une étude de leur sûreté de fonctionnement, c'est l'exemple de l'analyse fonctionnelle du PN type AHB avec ou sans la technologie de détecteur d'obstacle dans la zone de croisement du PN établie par [Simo10],
2. soit les facteurs humains dont les défaillances de comportements n'ont pas été toutes prises en considération à priori dans l'élaboration des modèles de risque, par exemple le modèle de réseau de Petri élaboré par [Ghaz08] qui simule le fonctionnement du Passage à Niveau dans son environnement global, et qui ne prend pas en considération toutes les possibilités de comportements dangereux de l'utilisateur de la route tel que le passage en chicane, la possibilité de dépassement en seconde file ou la probabilité de survenue d'une panne ou accident à l'intérieur de la zone de croisement etc.

De plus, les hypothèses prises dans les estimations des probabilités des événements de ces modèles, faute de la non disponibilité des valeurs réelles vu que les accidents liés aux comportements humains sont imprévisibles et la gravité de leurs conséquences ne suit aucune logique, ainsi que les hypothèses parfois restrictives visant à simplifier le modèle, rendent les résultats obtenus approximatifs. En effet, c'est le degré

de finesse de la modélisation qui permettra à l'analyste sécurité de percevoir les causes possibles des dysfonctionnements du système étudié et ceci aussi bien sous l'angle technique que comportement humain.

Les modèles qui s'appuient sur une représentation arborescente type Arbre de Défaillances, par exemple le modèle [SELC08], présentent les limites suivantes:

1. cette méthode est binaire, un événement peut soit se produire, soit ne pas se produire. Dans notre cas d'analyse des incidents aux Passages à Niveau, les événements représentés dans l'arbre peuvent avoir plusieurs état (par exemple, dans le comportement de l'utilisateur de la route, on peut rencontrer plusieurs situations : passage en chicane, suicide, accident, imprudence, panne etc., et chaque situation peut avoir une incidence sur la nature et la gravité de l'accident).
2. les événements intermédiaires dans la représentation graphique sont supposés être indépendants les uns des autres, ce qui est peu envisageable étant donné que le comportement humain dépend à la fois de l'utilisateur lui-même, mais aussi de l'état de l'environnement dans lequel il se trouve. Par exemple, un comportement abusif du conducteur de la voiture qui tente de traverser le PN malgré l'approche du train, peut être dû à sa confiance d'une vitesse faible d'approche du train, de la bonne viabilité du croisement, etc. Ces causes peuvent influencer la perception du risque chez l'utilisateur de la route, l'encourageant ainsi à adopter de tels comportements à risques.
3. Il est difficile de renseigner d'une manière mathématique toutes les différentes probabilités des événements qui constituent l'Arbre de Défaillance. En effet, les lois statistiques comme la loi de Poisson peut être approximative pour estimer l'arrivée des voitures à la zone de croisement, mais les fréquences des comportements abusifs des usagers de la route ne peuvent pas être estimées réellement, et souvent les probabilités sont données à titre approximatif en se basant sur les statistiques ou les observations.

La survenue d'incidents aux PN est un événement incertain dont les conséquences ne peuvent pas être toutes contrôlées. C'est pourquoi nous avons

besoin pour notre modèle d'un outil probabiliste graphique qui peut prévoir et quantifier le risque en relation avec les caractéristiques du PN.

II.4. Proposition d'une approche fondée sur le Retour d'Expérience et l'approche Bayésienne

Nous proposons pour notre analyse des risques du système ferroviaire, une approche qui consiste à élaborer un modèle plus proche de la réalité et donc capable de mieux appréhender la complexité du système. Cette modélisation sous angle systémique et plus proche du réel sera fondée sur le réseau Bayésien, dont les paramètres seront extraits des données du Retour d'Expérience des accidents.

Ce modèle permettrait à l'analyste sécurité de s'orienter vers une vision macroscopique, pour laisser aux techniciens experts la vision microscopique qui fera appel à toutes leurs compétences dans un second temps. Le modèle qu'on se propose d'établir et illustré dans la figure 14 ci après, devrait aller dans un premier temps à l'essentiel, c'est-à-dire que son objectif principal est de permettre aux analystes de risques de prédire les principaux points faibles ou failles du système ferroviaire, et ce pour y remédier.

Les aspects suivants des réseaux Bayésiens les rendent dans notre cas d'analyse des systèmes ferroviaires, préférables à d'autres modèles:

- Les réseaux Bayésiens donnent la possibilité de rassembler et de fusionner des connaissances de diverses natures dans un même modèle : retour d'expérience (données historiques ou empiriques), expertise, observations.
- La représentation graphique d'un réseau bayésien est explicite, intuitive et compréhensible par un non spécialiste, ce qui facilite à la fois la validation du modèle, ses évolutions éventuelles et surtout son utilisation.
- L'utilisation des connaissances : on peut se servir du même modèle du réseau Bayésien pour évaluer, prévoir, diagnostiquer, ou optimiser des décisions.

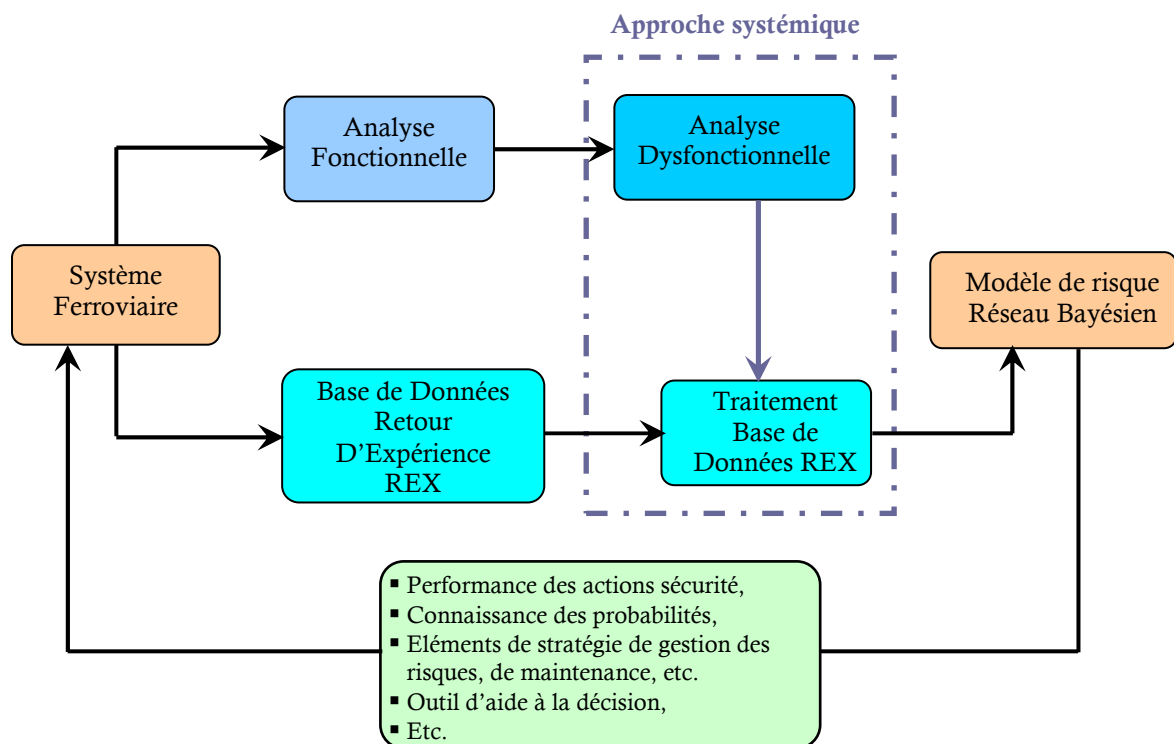


Fig. 14 Schéma du modèle de risque du système ferroviaire sous Réseau Bayésien

Nous proposons dans la suite de ce mémoire, d'illustrer davantage notre démarche d'élaboration du modèle d'analyse des risques à travers l'examen du système Passage à Niveau. L'analyse de ce système ferroviaire sous une vue systémique permettrait de remédier aux limites des méthodes classiques, qui sont le manque de prise en compte de l'environnement, la focalisation sur des aspects spécifiques, une vision qui peut être considérée comme essentiellement technique.

Afin de tenir compte de toutes les interactions entre ces différents composants du PN (infrastructure, environnement, comportement humain etc.), nous utiliserons donc pour cela une approche d'analyse qui combine à la fois les outils d'analyse des risques et un modèle graphique probabiliste fondé sur la théorie des Réseaux Bayésiens, dont les paramètres seront extraits des connaissances qu'on exploitera à partir d'une base de données du Retour d'Expérience (REX) des accidents antérieurs survenus aux niveaux des PN (Figure 15).

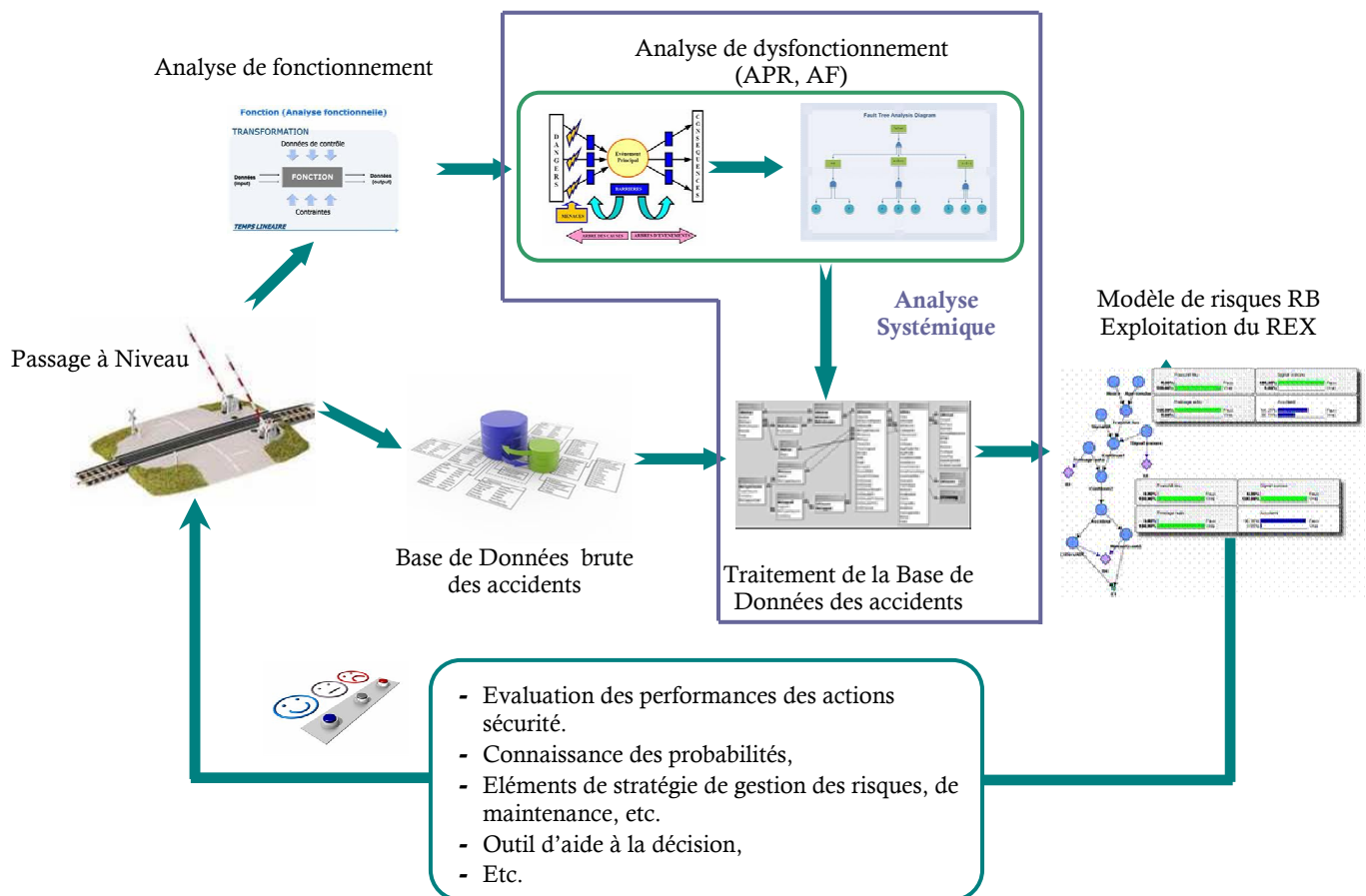


Fig. 15 Schéma du modèle de risque du PN sous Réseau Bayésien

La base de données brute des accidents survenus aux droits des PN sera traitée et améliorée en fonction des résultats de l'analyse de dysfonctionnement sous angle systémique. La nouvelle Base de Données contenant toutes les informations sur les interactions des composants du système PN aux moments des dysfonctionnements, servira à concevoir et paramétrer notre modèle de risque basé sur l'approche Bayésienne.

Dans le chapitre suivant, nous allons rappeler quelques notions relatives aux risques, les méthodes et les moyens pour leurs analyses et leurs maîtrises. Nous donnerons également dans le cadre de notre cas d'étude, un aperçu de la démarche d'analyse des risques des Passages à Niveau adoptée par l'ONCF, et son amélioration par l'utilisation des Réseaux Bayésiens.

Chapitre III

Sûreté de fonctionnement des Passages à Niveau ONCF

Sommaire

III.1. Introduction	77
III.2. Notions du risque	78
III.2.1. Notion de gravité	78
III.2.2. Notion de fréquence d'occurrence.....	79
III.2.3. Notion de fréquence d'exposition	79
III.2.4. Classification du risque.....	80
III.2.4.1. Risque négligeable.....	80
III.2.4.2. Risque acceptable	81
III.2.4.3. Risque Tolérable	81
III.2.4.4. Risque indésirable	81
III.2.4.5. Risque résiduel.....	81
III.3. Définition de l'analyse des risques	81
III.3.1. Démarche de l'analyse des risques	82
III.3.2. Méthodes de l'analyse des risques	86
III.4. Les facteurs influençant la sécurité d'un système	88
III.4.1. Les facteurs génériques.....	89
III.4.2. Les facteurs spécifiques du domaine d'activité	89
III.4.3. Les facteurs du comportement humain	89
III.5. Système de gestion de la sécurité de l'ONCF	90
III.6. Analyse des risques à l'ONCF.....	94
III.6.1. Evaluation des risques au niveau de l'ONCF	94

III.7. Les Passage à Niveau de l'ONCF	95
III.7.1. Classement des PN.....	96
III.7.2. Passage à Niveau pour piétons et particuliers	98
III.8. Analyse des risques des Passage à Niveau ONCF.....	99
III.8.1. Risques identifiés	99
III.8.2. Amélioration de l'évaluation des risques adoptée par l'ONCF	101
III.9. Conclusion.....	102

III.1. Introduction

Au Maroc, le réseau ferré national compte actuellement 521 PN, soit une moyenne de 25 PN par 100 Km de voie. A titre de comparaison avec d'autres pays, l'Algérie en compte sur la même distance considérée 61, la Belgique 53, l'Espagne 78 et la France 59 PN.

Dans le souci de renforcer la sécurité au droit des Passages à Niveau, l'Office Nationale des Chemins de Fer (ONCF) a déployé un vaste programme de suppression de ces PN au cours de son plan de développement et dont l'objectif est d'en réduire le nombre de 50% (256 PN) à l'horizon 2025 et de 100% dans les agglomérations à forte densité telles que la ville de Casablanca et la ligne Settat-Fès (2010-2011). L'investissement consenti pour cela est de 150 millions d'Euros [ONCF09].

Aujourd'hui, près 30% du programme global a été réalisé correspondant à la suppression de 75 passages, soit une moyenne de 15 PN par an, et leur remplacement par 60 ouvrages d'art : passerelles pour piétons, ponts rail et ponts route, etc. et ce pour un montant de 50 millions d'Euros cofinancé par l'ONCF (35 millions d'Euros) et les autres parties prenantes (communes, régions...) pour le reste.

A titre de comparaison, durant les 2 dernières décennies, le rythme de suppression des PN ne dépassait pas les 5 PN par an.

Rappelons aussi à ce propos que les nouvelles lignes récemment mises en service, en l'occurrence la connexion de Tanger Med et la ligne de Nador, ne comptent aucun PN, et que la nouvelle ligne en cours de construction pour le LGV (Ligne à Grande Vitesse) ne doit contenir aucun PN selon la réglementation des trains à grandes vitesses.

Le nombre de collisions au droit des PN est en baisse continue au Maroc (25 en 2005 contre 10 en 2009) alors même que le nombre de trains a quasiment doublé et que le réseau ferroviaire s'est rallongé de près de 200 km de lignes nouvelles.

Toutefois, ce chiffre d'incidents mortels aux droits des PN même en baisse, choque énormément l'opinion publique qui ne tolère aucun accident. Encore une fois, la

sécurité aux abords des emprises ferroviaires en général et des Passages à Niveau en particulier repose en grande partie sur la vigilance de tous et de chacun.

La maîtrise des risques au niveau d'un Passage à Niveau en attendant son élimination s'avère nécessaire et leur réduction à des seuils acceptables implique d'une part leur identification, et d'autre part, leur réduction en agissant sur les moyens de diminution de leurs occurrences, leurs gravités, l'atténuation de leurs conséquences grâce à des moyens de protection contre les risques.

Dans ce chapitre, nous allons illustrer davantage ces notions relatives à la maîtrise et l'analyse des risques aux niveaux des paragraphes III.2 et III.3, avant de présenter brièvement la démarche de maîtrise et d'analyse des risques adoptées par l'ONCF.

III.2. Notions du risque

III.2.1. Notion de gravité

La gravité caractérise globalement l'ensemble des conséquences parmi différentes classes d'importance. Cette classification est effectuée généralement par des experts.

Dans la majorité des domaines industriels, la gravité couvre aussi bien les dommages sur l'homme et le système, que les nuisances portées à l'environnement. La norme ferroviaire [NF EN 50126] propose quatre échelles de gravité (tableau 1).

Gravité	Conséquences pour les personnes ou l'environnement	Conséquences pour le service
Insignifiant	Eventuellement une personne légèrement blessé	
Marginal	Blessures légères et/ou menace grave pour l'environnement	Perte d'un système important
Critique	Un mort et/ou une personne grièvement blessée graves et/ou des dommages graves pour l'environnement	Dommages graves pour un (ou plusieurs) système(s)
Catastrophique	Des morts et/ou plusieurs personnes gravement blessées et/ou des dommages majeurs pour l'environnement	Dommages mineurs pour un système

Tab.1 : Echelles de gravité selon la norme NF EN 50126

III.2.2. Notion de fréquence d'occurrence

La fréquence d'occurrence d'un événement est la mesure du nombre moyen d'occurrences attendues dans des conditions connues, estimée sur une période de temps donnée (année, jour, heure, etc.).

Niveau	Description
Invraisemblable	Extrêmement improbable. On peut supposer que la situation dangereuse ne se produira pas
Improbable	Peu susceptible de se produire mais possible. On peut supposer que la situation dangereuse peut exceptionnellement se produire.
Rare	Susceptible de se produire à un moment donné du cycle de vie du système. On peut raisonnablement s'attendre à ce que la situation dangereuse se produise
Occasionnel	Susceptible de survenir à plusieurs reprises. On peut s'attendre à ce que la situation dangereuse survienne à plusieurs reprises.
Probable	Peut survenir à plusieurs reprises. On peut s'attendre à ce que la situation dangereuse survienne souvent
Fréquent	Susceptible de se produire fréquemment. La situation dangereuse est continuellement présente

Tab.2 : Echelles de fréquence d'occurrence selon la norme NF EN 50126

Les échelles de gravité et de fréquence d'occurrence données à titre d'exemple dans la NF EN 50126 ne font pas l'objet d'un consensus auquel adhèrent pleinement les spécialistes du domaine ferrovier. Souvent, ces derniers adaptent cette échelle en fonction de leur propre perception du risque et des enjeux majeurs les concernant.

III.2.3. Notion de fréquence d'exposition

La notion de fréquence d'exposition en situation dangereuse est définie par la norme européenne [EN 292/ISO 12100, 1995] comme: «situation dans laquelle une personne est exposée à un ou des phénomènes dangereux».

Le facteur d'exposition est estimé en fonction des besoins d'accès à la zone dangereuse, de la nature de l'accès, du temps passé dans la zone dangereuse, du nombre de personnes demandant l'accès et de la fréquence d'accès. L'exposition permet, entre autres, de mieux apprécier la gravité.

III.2.4. Classification du risque

Généralement, les niveaux de gravité et de probabilité d'occurrence sont croisés dans une matrice de criticité afin de positionner les zones de risque. La matrice Gravite/Occurrence proposée par la norme [NF EN 50126] est illustrée dans le tableau 3:

	Insignifiant	Marginal	Critique	Catastrophique
Invraisemblable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Improbable	Négligeable	Négligeable	Acceptable	Acceptable
Rare	Négligeable	Acceptable	Indésirable	Indésirable
Occasionnel	Acceptable	Indésirable	Indésirable	Inacceptable
Probable	Acceptable	Indésirable	Inacceptable	Inacceptable
Fréquent	Indésirable	Inacceptable	Inacceptable	Inacceptable

Tab.3 : Matrice Gravité/Occurrence selon la norme NF EN 50126

Plusieurs définitions dans la littérature existent pour les différents niveaux de risques (Figure 1), nous évoquons les définitions suivantes [Mazo08]:

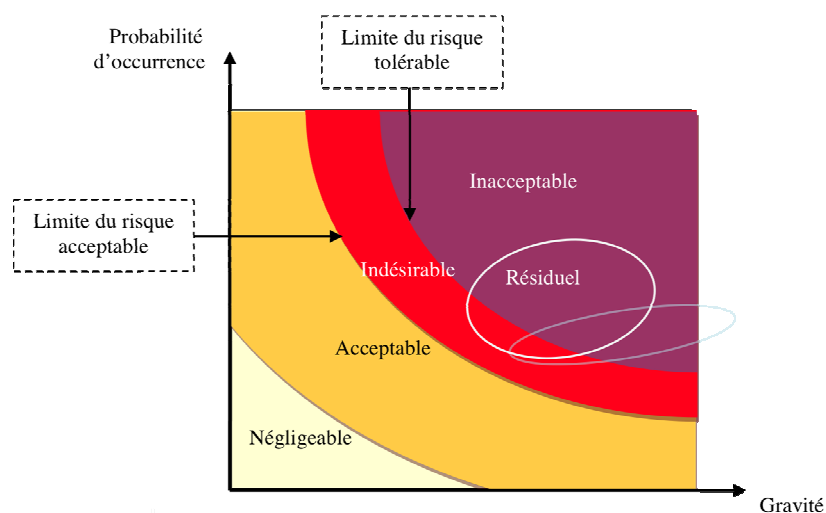


Fig.1 Classification des risques

III.2.4.1. Risque négligeable

Un risque négligeable n'est pas pris en compte dans l'évaluation globale du risque lié à un système.

III.2.4.2. Risque acceptable

La définition du risque acceptable peut être classée en deux catégories: celle dont l'acceptabilité est basée essentiellement sur les valeurs de la société [ISO/CEI Guide 51, 1999], et celle dont l'acceptabilité est rattachée à la prise de décision [ISO/CEI Guide 73, 2002].

III.2.4.3. Risque Tolérable

C'est un risque non négligeable qui, dans un certain contexte, peut être accepté avec vigilance. La tolérabilité du risque résulte d'une mise en balance des avantages et des inconvénients liés à une situation, qui sera soumise à une révision régulière afin d'identifier, à chaque fois que cela sera possible, les moyens permettant d'aboutir à une réduction du risque. En effet, le risque serait toléré en attendant de pouvoir mieux juger, alors que le terme acceptable aurait un caractère d'acceptation plus définitif.

III.2.4.4. Risque indésirable

Le risque est tolérable uniquement s'il est impossible de réduire le risque ou si le coût de la réduction est disproportionné par rapport à l'amélioration possible [NF EN 61508, 1998].

III.2.4.5. Risque résiduel

C'est un risque qui subsiste même après son traitement par les différentes mesures possibles [ISO/CEI Guide 73, 2002]. Un risque résiduel non tolérable est désigné comme un risque inacceptable.

III.3. Définition de l'analyse des risques

Selon le guide [ISO/CEI 51,1999], l'analyse des risques est « l'utilisation des informations disponibles pour identifier les phénomènes dangereux et estimer le risque ».

Le guide [ISO/CEI Guide 73,2002] définit l'analyse des risques comme « l'utilisation systématique d'informations pour identifier les facteurs de risque et pour estimer le risque ». Cette analyse des risques est intégrée dans un processus de management des risques défini comme un ensemble des activités coordonnées visant à diriger et piloter un organisme vis-à-vis du risque. Le management du risque inclut typiquement l'appréciation du risque, le traitement du risque, l'acceptation du risque et la communication relative au risque.

Le guide [ISO/CEI 73,2002] apporte une nouvelle vision plus cohérente par rapport au guide [ISO/CEI 51,1999] qui est celle de l'évaluation de l'acceptabilité des risques et non pas des risques eux mêmes.

III.3.1. Démarche de l'analyse des risques

L'analyse des risques [ISO/CEI Guide 73,2002] vise tout d'abord dans une première étape à identifier les sources de dangers et les situations associées (facteurs de risques) qui peuvent conduire à des dommages sur les personnes, l'environnement ou les biens, en vue de prévenir l'apparition d'une telle situation et d'en limiter les conséquences.

La seconde étape de cette identification consiste à estimer les risques identifiés au cours de l'analyse et de pouvoir comparer ce niveau de risque à un niveau jugé acceptable. Son estimation peut être effectuée de manière semi quantitative à partir :

- D'un niveau de probabilité que le dommage survienne,
- D'un niveau de gravité de ce dommage.

1- Identification des facteurs de risque : un facteur de risque est un paramètre que l'on observe et dont on pense qu'il joue un rôle dans la séquence accidentelle sans qu'il puisse être prouvé qu'il en est une cause directe ou indirecte. C'est un «Processus permettant de trouver, lister et caractériser les éléments du risque. Les éléments peuvent inclure les sources, les événements, les conséquences et la probabilité. L'identification des risques peut également concerner les préoccupations des parties prenantes».

2- Estimation des risques: « Processus utilisé pour affecter des valeurs à la probabilité et aux conséquences d'un risque. L'estimation du risque peut considérer le coût, les avantages, les préoccupations des parties prenantes, et d'autres variables requises selon le cas pour l'évaluation du risque ».

3- Evaluation de l'acceptabilité des risques: « Processus de comparaison du risque estimé avec des critères de risque donnés pour déterminer l'importance du risque.

La comparaison peut être menée par rapport à un référentiel préétabli dans l'objectif de permettre la prise de décision vis-à-vis de l'acceptation du risque ou de la nécessité de son traitement. Elle peut considérer le coût, les avantages, les préoccupations

des parties prenantes, et d'autres variables requises selon le cas pour l'évaluation du risque.

L'évaluation des risques est une procédure de classification de l'acceptabilité des risques en fonction des fréquences d'occurrence, gravités, expositions, etc. La détermination des critères d'acceptabilité obéit à des approches qui peuvent paraître subjectives.

Dans le domaine ferroviaire, trois principes d'acceptation du risque sont évoqués dans la norme [EN 50126]:

1- Le principe Anglais ALARP (As Low As Reasonably Practicable) qui intègre une zone d'acceptation du risque, une zone de rejet du risque et une zone appelée zone ALARP dans la quelle les objectifs sécurité sont définis en fonction du ratio d'amélioration du risque sur le coût investi. Cette zone ALARP (figure 2) peut être délimitée par des fréquences de risques données. Si le risque analysé se trouve dans cette zone, les moyens mis en œuvre pour atteindre le niveau de sécurité désiré doivent être évalués ainsi que leurs impacts sur la réduction du risque.

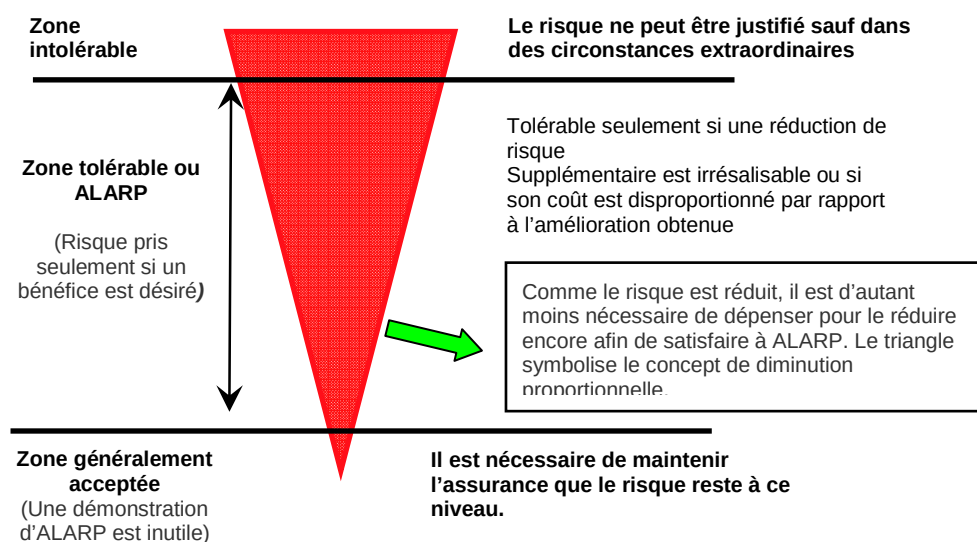


Fig.2 Zone ALARP

2- Le principe Allemand MEM (Mortalité Endogène Minimale) qui fixe les objectifs sécurités par rapport à la mortalité endogène minimale d'individu (Risque ambiant pour une personne âgée de 5 à 15 ans R_{MEM} fixé à 2.10^{-4} /an). Les risques liés aux systèmes techniques sont considérés comme contribuant au risque individuel de 5% et donc la limite du risque toléré est fixée à $0,05 \times R_{MEM}$.

3- Le principe français GAME (Globalement Au Moins Equivalent) qui stipule que la modification d'un système existant, la conception ou la mise en oeuvre d'un nouveau système doivent être réalisées de telle façon que le niveau global de sécurité de l'installation après modification est au moins équivalent au niveau actuel de sécurité ou au moins équivalent au niveau de sécurité d'une installation de référence produisant les mêmes services ou fonctionnalités

Un aspect important examiné dans les normes de sécurité ferroviaires EN 50 126, EN 50 128 et EN 50 129 est la notion d'intégrité de la sécurité d'un système, SIL (System Integrity Level). Cette notion caractérise l'aptitude de celui-ci à remplir les fonctions de sécurité requises. Plus le niveau de sécurité requis est élevé, moins il est à craindre que le système ne remplisse pas ses fonctions de sécurité. La notion de SIL s'applique essentiellement aux systèmes techniques et définit le risque maximum tolérable par heure de fonctionnement. La notion d'intégrité de la sécurité se matérialise par une échelle comportant quatre niveaux discrets appelés niveaux de SIL. Les SIL sont un moyen utilisé pour faire correspondre les approches qualitatives non quantifiables. L'intégrité comprend deux conditions auxquelles il est nécessaire de satisfaire pour atteindre le niveau requis:

- L'intégrité vis-à-vis des défaillances systématiques qui représente la partie non quantifiable de l'intégrité car elle correspond aux erreurs humaines pendant les différentes phases du cycle de vie du système. Parmi ces erreurs, on peut citer : les erreurs de spécification, de conception, de fabrication ou d'installation, mais aussi, les erreurs d'exploitation, de maintenance ou de modifications.
- L'intégrité vis-à-vis des défaillances aléatoires : est la partie de l'intégrité de la sécurité relative en particulier aux défaillances matérielles résultant de la

fiabilité des composants. L'évaluation est menée au moyen des calculs de probabilité effectués à partir des données connues des modes et des taux de défaillance des composants.

SIL	EN 50129
4	$10^{-9}/h < < 10^{-8}/h$
3	$10^{-8}/h < < 10^{-7}/h$
2	$10^{-7}/h < < 10^{-6}/h$
1	$10^{-6}/h < < 10^{-5}/h$

Tab.4 : Définition des niveaux de SIL

4- Maîtrise des risques: «Actions de mise en œuvre des décisions de management du risque. La maîtrise du risque peut impliquer la surveillance, la réévaluation et la mise en conformité avec les décisions». D'une manière générale, la maîtrise des risques est l'ensemble des actions de mise en œuvre des décisions de la gestion des risques visant à les ramener sous le seuil d'acceptabilité.

5- Réduction du risque: La réduction des risques est l'ensemble des actions entreprises en vue de diminuer la gravité des conséquences (protection), les probabilités d'occurrence (prévention) ou les deux en même temps. Différents moyens peuvent être utilisés : réduction des temps d'exposition, multiplication des possibilités d'évitement des situations dangereuses, etc.

Protection: C'est une technique visant à limiter la gravité des conséquences d'un accident sur les personnes. Pour cela on peut soit renforcer la défense des personnes par des équipements de protection collectif ou individuels, soit réduire la dangerosité des sources de danger.

Prévention: Ensemble de méthodes, de techniques et de mesures prises en vue de réduire la probabilité qu'un événement redouté ne se produise. Ces méthodes relèvent de la surveillance, la formation, la réglementation, la répartition des responsabilités, etc.

III.3.2. Méthodes de l'analyse des risques

Les méthodes d'analyse des risques sont classées selon deux approches déterministes et probabilistes [Mazo08].

L'approche déterministe adoptée dans les domaines à haut risque tels que nucléaire, transports, etc. où le moindre risque significatif est recherché et réduit à la source. Elle consiste à recenser les événements pouvant conduire à la survenue d'un accident en adoptant les pires cas, et en affectant une gravité extrême à ses conséquences potentielles.

Par conséquent, les sous systèmes critiques (systèmes de sauvegarde, de protection et de prévention) sont dimensionnés pour éviter toute défaillance dangereuse et organisés rigoureusement selon une stratégie de défense en profondeur.

L'approche probabiliste fait intervenir le calcul de probabilités relatives à l'occurrence d'événements faisant partie du processus de matérialisation d'un scénario d'accident donné. Il s'agit d'une approche complémentaire à l'issue d'une approche purement déterministe où les techniques probabilistes viennent appuyer l'approche déterministe.

1- Méthodes quantitatives d'analyse des risques

Les méthodes quantitatives sont supportées par des outils mathématiques ayant pour but d'évaluer la sûreté de fonctionnement. Cette évaluation peut se faire par des calculs de probabilités d'occurrence d'un événement redouté, ou bien par recours à certains modèles probabilistes tels que les Chaines de Markov, les réseaux de Petri, les réseaux Bayésiens, etc. Les analyses quantitatives présentent quelques avantages :

- D'évaluer la probabilité des composantes de la sûreté de fonctionnement;
- De fixer des objectifs de sécurité ;
- De juger de l'acceptabilité des risques en intégrant les notions de périodicité des contrôles, la durée des situations dangereuses, la nature d'exposition, etc ;
- De hiérarchiser les risques ;

- De comparer et ensuite ordonner les actions à entreprendre en engageant d'abord celles permettant de réduire significativement les risques ;
- Etc.

2- Méthodes qualitatives d'analyse des risques

L'application des méthodes qualitatives d'analyse de risque dédiées à l'identification des dangers et des risques associés à un procédé ou une installation fait systématiquement appel à deux types de raisonnement : par induction ou par déduction.

La plupart des méthodes revêtent un caractère inductif dans une optique de recherche allant des causes aux conséquences éventuelles. En contrepartie, il existe quelques méthodes déductives qui ont pour but de chercher les combinaisons de causes conduisant à des événements redoutés.

- **Méthodes utilisant une approche inductive** : on part des causes pour identifier les effets. Il s'agit donc d'identifier les conséquences d'une défaillance ou une combinaison de défaillances sur le système et son environnement. Parmi ces méthodes, on peut citer l'Analyse Préliminaire des Risques (APR), l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC), l'HAZOP, l'analyse par l'Arbre de Défaillances ou l'Arbre d'Événements, etc.

Ces méthodes qui ont été développées dans le chapitre I, considèrent généralement des défaillances simples et indépendantes d'un élément ou d'un composant du système.

- **Méthodes utilisant une approche déductive** : le système est supposé défaillant et l'analyse porte sur l'identification des causes susceptibles de conduire à cet état. On part alors des effets pour remonter aux causes. Généralement, on part de l'événement redouté, et on essaye de trouver les principales causes de son apparition. L'arbre des défaillances détaillé dans le chapitre I, constitue une des principales méthodes déductives.

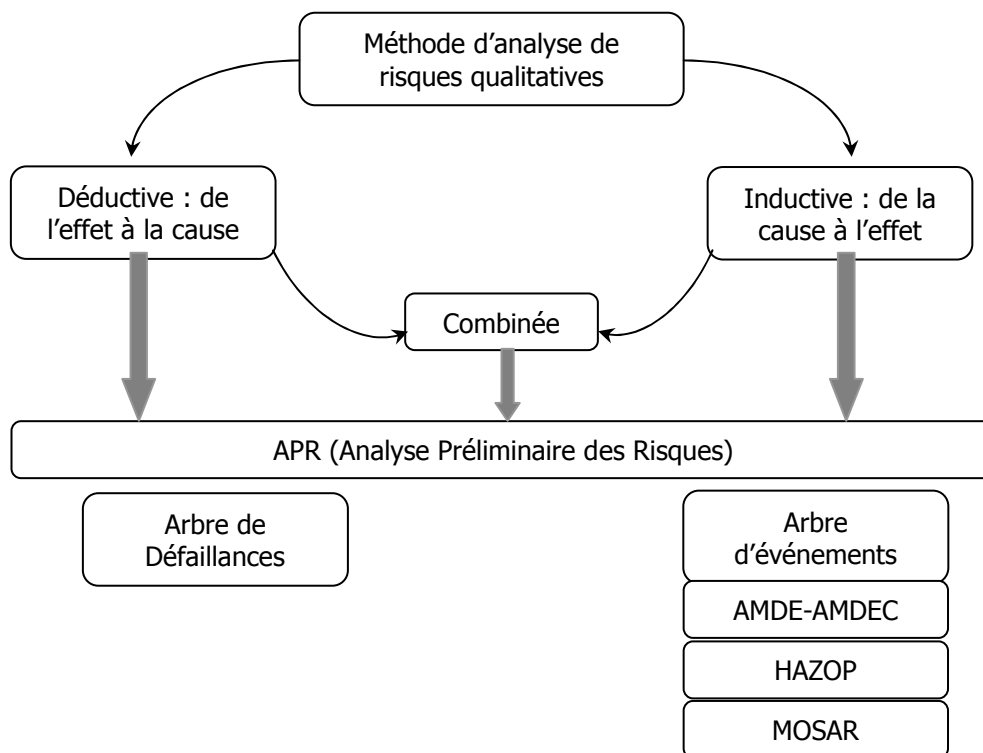


Fig. 3 Méthodes d'analyses des risques qualitatives

III.4. Les facteurs influençant la sécurité d'un système

La sécurité d'un système y compris celui du transport ferroviaire, dépend de trois éléments:

1. Les conditions système relatives aux défaillances internes au système lors de chaque phase de son cycle de vie,
2. Les conditions d'exploitation relatives aux défaillances survenant au cours de l'exploitation du système,
3. Les conditions de maintenance relatives aux défaillances survenant au cours des opérations de maintenance.

Pour réaliser des systèmes sûrs, il est nécessaire d'identifier les facteurs d'influence de la sécurité du système, d'en évaluer les effets et d'en maîtriser les causes tout au long du cycle de vie du système.

Il y a trois catégories de facteurs d'influence [Legro09]:

III.4.1. Les facteurs génériques

Dans ces facteurs, se retrouvent les caractéristiques techniques des équipements et composants y compris leurs modes de défaillances, les conditions d'environnement, les perturbations (électromagnétiques, climatiques...), les événements naturels, etc.

III.4.2. Les facteurs spécifiques du domaine d'activité

Il s'agit des facteurs spécifiques à la nature des installations et à leur exploitation. Pour l'exploitation du système il s'agit des tâches que le système doit accomplir, des conditions dans lesquelles elles doivent être accomplies, de la coexistence avec d'autres systèmes techniques ou une infrastructure déjà existante dans un contexte opérationnel, des exigences liées à la vie du système, y compris sa durée de vie prévue, la densité du service, ainsi que les exigences de coût, et enfin, les différentes catégories de défaillances et leur effets sur le type de système en fonctionnement normal, dégradé ou perturbé.

III.4.3. Les facteurs du comportement humain

Une analyse des facteurs humains du point de vue de leurs effets sur la sécurité d'un système fait intrinsèquement partie de l'approche système. Les applications de transport impliquent en général une grande variété de groupes humains, depuis les passagers, le personnel d'exploitation et de maintenance, et le personnel chargé de la réalisation des systèmes jusqu'aux personnes concernées par l'exploitation, telle que les usagers de la route aux Passages à Niveau. Chacun est susceptible face à une situation identique de réagir de manière différente. Il est alors clair que le facteur humain a un impact potentiel important sur la sécurité du système.

L'organigramme de la figure 4 ci-dessous issu de la norme ferroviaire [EN50126], résume sous forme d'une décomposition analytique ces différents facteurs d'influence.

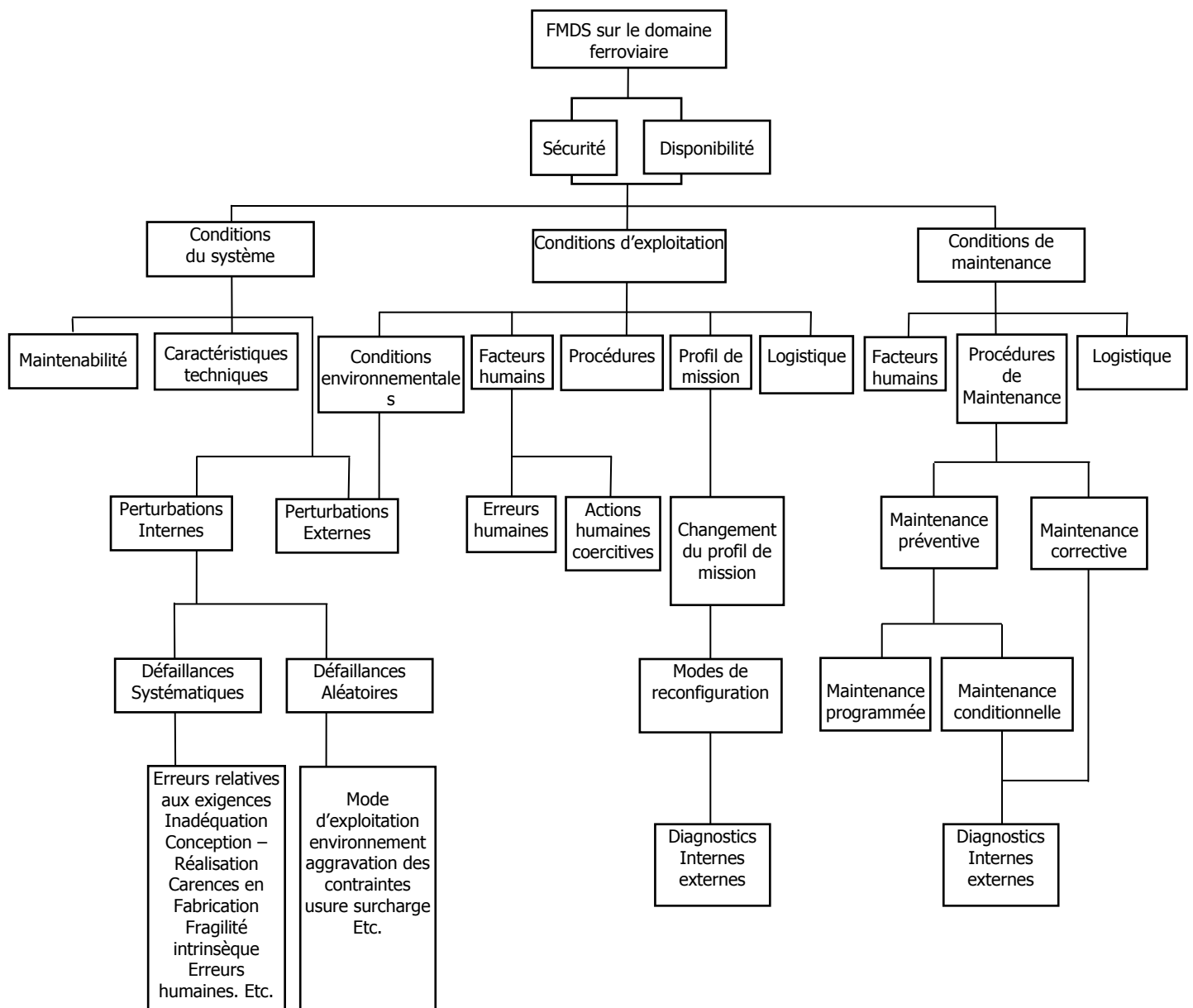


Fig. 4 Facteurs d'influence humains du risque ferroviaire [EN50126]

III.5. Système de gestion de la sécurité de l'ONCF

La gestion de la sécurité ferroviaire constitue un outil performant et pertinent pour l'ONCF afin d'instaurer une culture de sécurité, en termes de valeurs, de croyances, d'attitudes et de comportements au sein de cet établissement.

La sécurité de l'exploitation ferroviaire à l'ONCF englobe à la fois la sécurité de la circulation ferroviaire (infrastructure et matériel roulant et son utilisation), et la sûreté des usagers et des biens transportés contre l'influence de l'environnement.

La norme européenne [NF EN 50126] fournit aux sociétés ferroviaires et aux industries ferroviaires un processus permettant de mettre en œuvre une démarche cohérente de gestion de la Fiabilité, de la Disponibilité, de la Maintenabilité et de la Sécurité désignée par la « FDMS ».

Ce système de Gestion de la Sécurité est décliné à l'ONCF en cinq phases conformément au cycle PDCA ou roue de Deming (Figure 5) :

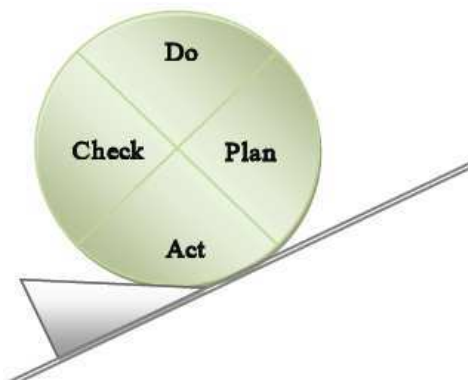


Fig.5 Roue de Deming d'amélioration continue

- Plan (Planifier) : planifier et déterminer le degré de priorité des actions pour corriger les dysfonctionnements, maîtriser les risques et déployer les objectifs qualité.
- Do (Faire): mettre en œuvre et gérer des actions correctives et de progrès.
- Check (Vérification) : vérifier l'efficacité du système qualité et évaluer les résultats obtenus par rapport à l'objectif qualité.
- Act (Agir) : agir et exploiter les résultats à des fins de retour d'expérience et d'amélioration continue.

Le système de gestion de la sécurité ferroviaire de l'ONCF s'inscrit dans un schéma complet d'activités d'analyse, d'évaluation et de maîtrise des risques. En outre, il comprend aussi des stratégies de définition des responsabilités, de communication et de gestion des crises. Ces stratégies qui sont élaborées sur les plans technique, humain et organisationnel, constituent donc les initiatives et objectifs annuels de la Direction de l'ONCF en matière de réduction des risques.

La figure 6 ci après, illustre les différentes phases d'activités du système de gestion de la sécurité ferroviaire de l'ONCF [Bouc07]:

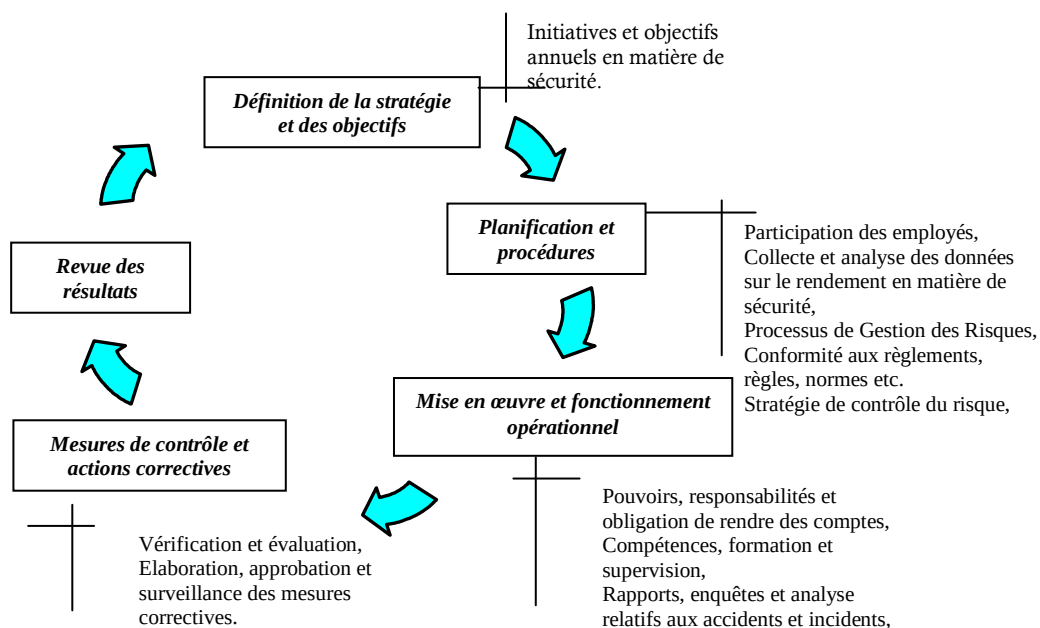


Fig.6 Architecture du système de gestion de la sécurité ferroviaire de l'ONCF

Un des processus clé qui conditionne la performance de la démarche de la sécurité ferroviaire est le processus de gestion des risques dans les infrastructures ferroviaires.

La gestion des risques peut être définie comme l'ensemble des activités coordonnées du système global, où des procédures adéquates d'identification et d'évaluation des risques sont mises en place, en vue de réduire le risque à un niveau tolérable ou acceptable conforme aux objectifs de sécurité préalablement établis par l'ONCF [Elbo05]. Ce processus s'articule autour des activités présentées dans l'organigramme de la figure 7 qui sont les suivantes:

1. Identification des sources de dangers : correspond à la recherche des événements redoutés a priori susceptibles de se produire durant la mission du système, en tenant compte des conditions prévues d'exploitation.

2. Evaluation du risque : se concentre sur l'obtention des profils de risque. Elle s'appuie généralement sur les techniques probabilistes issues des méthodes de sûreté de fonctionnement. Elle est importante car elle conditionne la sécurité du système, sécurité qui est autant que possible maintenue dans le temps grâce à la dernière étape du processus de gestion des risques.

3. Acceptation du risque : à ce stade, le processus de gestion du risque arrive à un nœud de décision s'appuyant sur les résultats de l'activité précédente d'évaluation du risque. Les différents profils de risque établis pour le système global sont comparés à un critère d'acceptation du risque défini. Lors de l'inadéquation des profils de risque au critère d'acceptation, des moyens contre le risque sont exigés et mis en place durant la quatrième étape. Les premières étapes sont alors réexaminées ou complétées. Lorsque le risque, dit résiduel, est acceptable, la gestion du risque demeure en étape 5.

4. Réduction du risque : cette activité repose sur la proposition de différentes alternatives pour contrôler et réduire le risque notamment par des moyens de prévention et de protection des accidents.

5. La maîtrise des risques résiduels instaure une traçabilité des actions et événements (retour d'expérience) lors de l'exploitation et de la maintenance. Elle préconise également une surveillance des dispositifs de sécurité vis-à-vis de leurs défaillances et des déviations humaines, appelées franchissements de barrières, pouvant les affecter. Par l'utilisation d'inspections, d'indicateurs, et de tableaux de bord mesurant les tendances de ces indicateurs, elle permet d'éviter toute dérive et d'anticiper les événements précurseurs de dangers. Cette activité aide à garder le risque à un niveau acceptable durant l'exploitation du système.

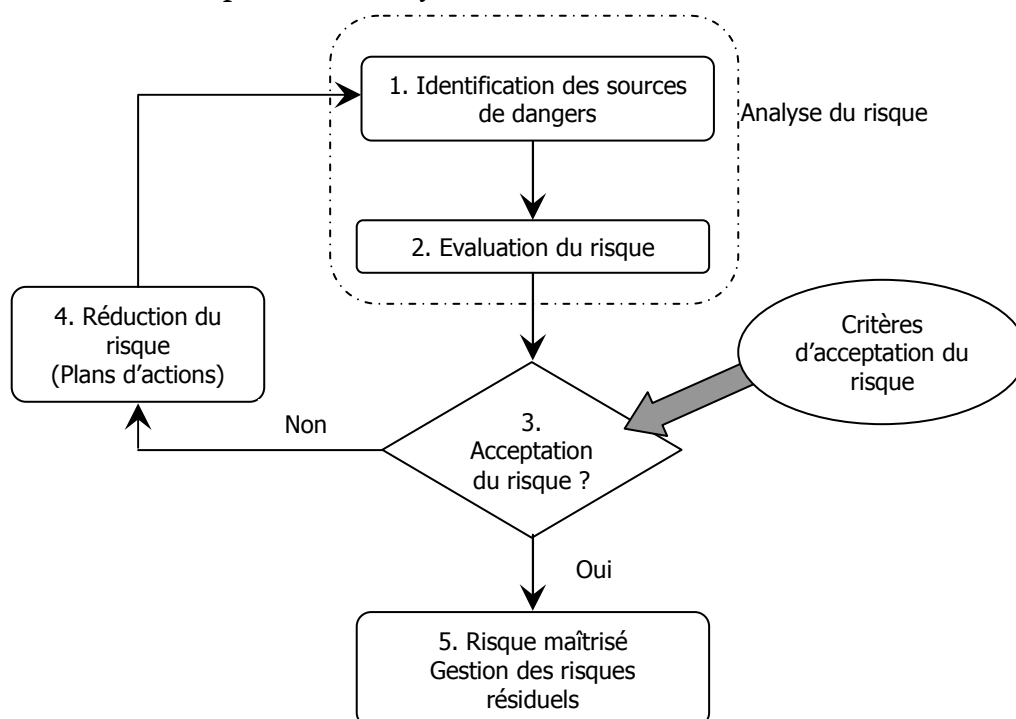


Fig. 7 Processus « Gestion des Risques »

III.6. Analyse des risques à l'ONCF

III.6.1. Evaluation des risques au niveau de l'ONCF

La phase d'évaluation du risque consiste à comparer le niveau du risque estimé à un niveau jugé acceptable ou tolérable. Ce processus peut être plus ou moins complexe selon les critères retenus pour définir l'acceptabilité du risque [Bouc07].

Au niveau de l'ONCF, l'évaluation des risques se fait à travers la classification de l'Indice du Risque (**IR**) pour chaque risque identifié:

$$\mathbf{IR = F \times G} \quad (\text{III.1})$$

F : Fréquence de l'incident,

G : Gravité de l'incident estimée en fonction des dégâts causés par l'incident sur :

- a. L'environnement (K_{env}),
- b. L'homme (K_h) : personnel et voyageur,
- c. Le client (K_c),
- d. Les biens transportés (K_{mar}),
- e. Les installations et les équipements (K_{mat}),
- f. Les horaires des trains (K_r)

Le facteur gravité au niveau des incidents ONCF est déterminé à partir de la relation suivante :

$$G = K_{env} + K_h + K_{mat} + K_c + K_{mar} + K_r \quad (\text{III.2})$$

Ainsi, en adoptant cette approche par l'ONCF, les incidents sont classés selon quatre niveaux de gravité:

Niveau	Description	IR
Gravité 4	Conséquence catastrophique	≥ 150
Gravité 3	Conséquence critique	$98 < IR < 150$
Gravité 2	Conséquence significative	$48 < IR \leq 98$
Gravité 1	Conséquence mineure	≤ 48

Tab. 5 : Classification des gravités des risques

Le tableau ci après illustre un exemple de résultats d'une évaluation des risques liée à l'ONCF:

Risque	IR	Classe de risque	Niveau de gravité
Tamponnement	580	Risque majeur	Gravité 4
Heurt des gens	315	Risque majeur	Gravité 4
Déraillement	147	Risque majeur	Gravité 3
Heurt de la caténaire par un véhicule	111	Risque majeur	Gravité 3
Incendie dans le train	60	Risque modéré	Gravité 2

Tab. 6 : Exemple de classification de gravité pour les risques ONCF

La définition de critères d'acceptabilité du risque est une étape importante dans le processus de gestion du risque, car les critères retenus conditionneront la mise en place ou non des mesures de réduction du risque et rétroactivement, influenceront les façons de mener l'analyse et l'évaluation des risques.

L'ensemble des mesures envisagées par l'ONCF pour la réduction du risque ou sa maîtrise suite à son évaluation jugée inacceptable, concernent d'une manière générale:

- Les actions de prévention qui réduisent la probabilité d'occurrence de la situation de danger à l'origine du dommage,
- La protection visant à limiter la gravité du dommage considéré.

Dans ce qui suit, nous allons nous focaliser sur un point très particulier dans la gestion des risques ferroviaires ONCF, qui est le Passage à Niveau, endroit où les conséquences des accidents peuvent être très graves. Nous donnerons en premier lieu quelques définitions et réglementations des Passages à Niveau adoptées par l'ONCF.

III.7. Les Passage à Niveau de l'ONCF

Le Passage à Niveau (PN) [ONCF87] est le point commun à une ligne de chemin de fer et à la voie routière la traversant. Les PN constituent des points sensibles dans le réseau ferroviaire ONCF et présentent des dangers importants.

La «zone de danger» est le domaine de l'intersection entre la voie ferrée et la route la croisant, dans laquelle une collision entre le train entrant et l'utilisateur de la route (véhicules et piétons traversant) peut avoir lieu. Le Passage à Niveau est universellement considéré comme un point faible en terme d'exploitation du réseau ferroviaire, du fait que les incidents qui surviennent à son niveau dépendent dans une large mesure sur le comportement correct des usagers de la route.

La circulation des trains est toujours prioritaire sur les usagers de la route vu que l'inertie d'un train est telle qu'il lui faut plusieurs centaines de mètres pour s'arrêter. En général, compte tenu du rapport de masses entre un train et un véhicule routier, le risque est essentiellement du côté routier. Cependant, des conséquences graves pour les trains peuvent survenir en cas de collision avec un poids lourd surtout si celui-ci est chargé de matières dangereuses ou inflammables.

Pour réduire les risques de collision, on cherche de plus en plus à éliminer les Passages à Niveau soit, en les remplaçant par des passages dénivelés, soit en les supprimant purement et simplement. Dans les deux cas de figure, ces deux actions engagent des budgets importants et des délais de réalisation relativement longs.

Rappelons aussi que la législation marocaine en vigueur stipule que la gestion des Passages à Niveau relève de la responsabilité de tous les intervenants, à savoir l'ONCF (signalisation de position et la viabilité des PN au droit des emprises ferroviaires), le gestionnaire de la route (signalisation routière avancée et viabilité des accès à proximité des PN) et enfin les propriétaires riverains (garantie d'une bonne visibilité pour les personnes à la traversée des passages).

III.7.1. Classement des PN

Le risque que représente un Passage à Niveau est fonction de l'intensité de la circulation sur la voie ferroviaire et sur la voie routière. Une évaluation de ce risque est faite en calculant le '**Moment de Circulation**' qui est le produit du nombre de trains par le nombre de véhicules routiers empruntant en moyenne par jour le Passage à Niveau.

Le classement des Passages à Niveau à l'ONCF comprend également leur répartition en catégorie, et leur situation dans l'ordre du kilométrage de la ligne de chemin de fer.

- Moment de Circulation

$$MC = NT \times NV \quad (III.3)$$

NT : Nombre de trains circulant dans les 2 sens,

NV : Nombre de véhicules et Motocyclettes traversant le PN en 24 heures,

- Situation du PN

La situation d'un Passage à Niveau conditionne sa visibilité dont l'importance est capitale étant donné qu'elle est souvent à l'origine des accidents qui se produisent aux PN.

On estime que la visibilité d'un Passage à Niveau est suffisante lorsqu'un observateur, placé à 5 m, du rail le plus proche, et dont l'oeil se trouve à un mètre au-dessus de la chaussée, voit l'ensemble de la caisse de la machine, circulant à la vitesse maximale autorisée sur la ligne, pendant une durée de 20 secondes.

S'il existe un obstacle particulier pour un observateur placé à 5 m du rail, les mesures sont prises à la distance du rail où la visibilité est la plus grande et en s'éloignant le plus possible. Cette distance doit être supérieure ou égale à 3,50 m et si possible supérieure à 5 m, sans dépasser 10 m.

- Catégorie

Le PN est dit de 1^{ère} catégorie si son moment de circulation ≥ 5000 ou lorsqu'il est compris entre 3000 et 5000 et que la visibilité pour l'utilisateur de la route n'est pas suffisante.

La première catégorie comprend les Passages à Niveau munis de barrières gardées le jour et la nuit. La deuxième catégorie comprend les Passages à Niveau sans barrières.



Photo. 1 Passage à Niveau non gardé



Photo. 2 Passage à Niveau gardé

- Liste de classement des PN

La liste de classement des PN se présente sous forme de tableaux établis par l'ONCF et comportant les informations suivantes:

▪ La désignation de la voie publique traversée,	▪ Son régime normal de jour et de nuit (ouvert ou fermé),
▪ Le n° d'ordre du passage à niveau,	▪ Le système de barrières installées aux passages à niveau de 1 ^{ère} catégorie,
▪ Le Point Kilométrique (PK) du PN sur la voie ferrée,	▪ La durée de fermeture pour les passages à niveau voisins des gares.
▪ La catégorie du PN,	

Tab. 7 : Exemple de liste de classement des PN

III.7.2. Passage à Niveau pour piétons et particuliers

- **PN pour piétons** : Ils sont constitués par des portillons ouvrant à l'extérieur, identique à ceux qui sont accolés aux Passages à Niveau de 1^{ère} catégorie.

Les portillons sont implantés à une distance de 3,50 m à 5 m du rail le plus proche afin que les usagers puissent disposer d'une zone refuge suffisante à leur sécurité au cas où ils seraient surpris par le train après franchissement du portillon.

- **PN particuliers** : Il s'agit de Passage à Niveau établi à la demande d'un propriétaire, pour permettre un accès plus facile à leur propriété. Son entretien est à la charge :

- de l'office en ce qui concerne la voie. Une redevance est acquittée à cet effet par le permissionnaire.

- du permissionnaire en ce qui concerne les chemins d'accès et les panneaux de signalisation.

Pour ne pas multiplier ces passages, l'autorisation n'est accordée que lorsque le Passage à Niveau public le plus proche se trouve à plus de 400 mètres.

III.8. Analyse des risques des Passage à Niveau ONCF

III.8.1. Risques identifiés

Plusieurs publications existantes sur les risques aux niveaux des Passages à Niveaux ainsi que les modèles qui traitent la sécurité de ce système nous ont permis de réaliser une analyse complète des risques du système PN. Il ressort des rapports d'accidents aux PN, une classification en :

1- Les accidents causés par l'intégration du PN dans l'environnement routier :

a) Visibilité restreinte : les lignes de visibilité posent problème lorsque des bâtiments, de la végétation ou d'autres obstructions limitent la capacité du conducteur d'apercevoir les trains qui s'approchent du Passage à Niveau (Figure 3).



Photo. 3 Ligne de visibilité restreinte

b) Approche inadéquate : lorsque l'état du PN et de ses approches caractérisées par le profil en long et en travers ainsi que les abords de la route se dégrade au point que les conditions exigées à la construction ne sont plus respectées, des facteurs contributifs à une collision sont ainsi créés (Photo 4). Les approches érodées augmentent la probabilité que des véhicules endommagent les voies ou demeurent immobilisés sur celles-ci.



Photo. 4 Passage à Niveau mal conçu

c) Viabilité du PN : l'utilisation d'un PN par un véhicule pour lequel il n'a pas été conçu accélérera la dégradation du PN ou ses approches, et accentuera la probabilité d'un incident. D'où la nécessité de tenir compte d'un véhicule type dans la planification des approches (rayon de courbure, emprise, nature du revêtement de la zone de croisement, etc.), et l'importance d'un entretien adéquat pour prévenir les collisions (Photo 5).



Photo. 5 Zone de croisement dégradée

2- Les accidents pour lesquels le comportement des conducteurs est mis en cause sans ambiguïté. (Comportements infractionnistes lors des phases de fermeture du PN, vitesse de franchissement du PN inappropriée, non respect des panneaux de signalisation, etc.).

3- Les accidents causés par la défaillance du mécanisme de fermeture ou de signalisation du PN, les pannes des véhicules dans la zone d'intersection.

a) Véhicule en panne : Les caractéristiques de fonctionnement des véhicules jouent un rôle important dans de nombreuses collisions au niveau du PN. Compte tenu

de la taille et de la vitesse de la plupart des trains, il est très difficile pour eux d'éviter une collision avec un véhicule en panne sur les voies. Cependant, il existe des moyens mis par l'ONCF pour permettre au gardien du PN gardé et aux utilisateurs des PN non gardés d'informer le conducteur du train de la présence de véhicules en panne sur les voies (utilisation de la torche, transmission radio etc.).

b) Mécanisme de fermeture en panne (PN gardé) : les incidents de barrières se produisent fréquemment, surtout des problèmes de fonctionnement (barrières cassées par des véhicules qui les ont forcées, ou barrières qui se bloquent en position haute ou basse suite à un défaut survenu au mécanisme qu'il soit automatique ou manuel). Dans ces cas, la circulation dans les deux sens routières et ferroviaires devient véritablement une source de danger.

Les risques principaux présentés par un Passage à Niveau sont:

- Collision entre les trains et les véhicules routiers ou les piétons,
- Collision entre véhicules routiers et l'équipement des Passages à Niveau,
- Les glissades, trébuchements et des chutes de piétons,
- Collision entre les piétons et les équipements des Passages à Niveau,
- Obstruction de la voie ferrée par les véhicules.

III.8.2. Amélioration de l'évaluation des risques adoptée par l'ONCF

Le principe d'évaluation des risques adopté par l'ONCF, et illustré dans la figure ci après considère que l'indice du risque IR, qui conditionne le classement du risque et donc les mesures qui s'en suivent pour son élimination ou sa maîtrise, provient uniquement du produit de deux facteurs : la probabilité de son occurrence et la gravité de son impact [Bouc07].

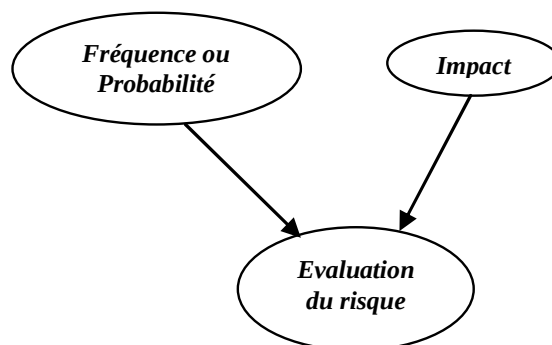


Fig. 8 Principe de l'évaluation des risques adopté par l'ONCF

Dans [Bouc07], il a été proposé pour améliorer cette évaluation, de ne pas se contenter d'assigner uniquement une fréquence de survenue du risque et son impact directe, mais de considérer aussi les événements dont ils sont conditionnels, par exemple les événements déclenchant ces risques et ceux permettant de réduire leurs impacts.

En d'autres termes, une meilleure estimation de l'impact de l'incident doit tenir compte des facteurs ou événements autres que les conséquences de l'incident, et qui peuvent agir pour augmenter ou diminuer la gravité du sinistre (Par exemple, une collision avec un véhicule peut être de gravité différente selon la vitesse de collision, le type de véhicule, l'aspect géométrique du PN, etc.).

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les notions propres au risque et avons présenté rapidement les principales méthodes d'analyse de risque.

En second lieu, nous avons exposé la méthode d'évaluation du risque pratiquée par l'ONCF, qui repose principalement sur la détermination pour chaque risque d'un indice qui est le produit de l'impact du risque et sa fréquence ($IR = \text{impact} \times \text{fréquence}$).

La méthode présente des limites et ne permet pas une amélioration continue de la performance de la gestion de la sinistralité ferroviaire. En effet, il est très difficile de quantifier les évaluations en terme de pertes humaines ou matérielles d'une part, et d'autre part justifier la pertinence des actions menées et des dépenses engagées suite à l'identification des risques dont les indices sont supposées être élevées.

Avec la théorie des Réseaux Bayésiens, dont les principes seront développés dans le chapitre suivant, cette évaluation sera reprise dans le cadre d'une étude des Passages à Niveau (PN) dans une approche causale intégrant les événements directs ou indirects, qui ont une conséquence et une influence sur les incidents de collision, et qui peuvent influencer les valeurs des fréquences et nature de incident au PN. Le nouveau modèle de quantification du risque intégrera à la fois:

- Le risque lui-même,
- Le ou les événements causes du risque,

- Les paramètres qui permettent d'influencer l'impact et la nature du risque.

Ce travail nous conduit donc étudier le Passage à Niveau selon une approche systémique, afin de modéliser tous les événements du système PN qui sont en interaction entre eux et qui conduisent suite à une défaillance humaine ou matérielle dans le système, à la survenue d'un accident de collision.

Avant de passer à l'élaboration de notre modèle basé sur les Réseaux Bayésiens, nous allons dans le chapitre suivant, présenter leurs notions de base ainsi que les étapes nécessaires pour la construction d'un modèle Bayésien.

Chapitre IV

Les Réseaux Bayésiens

Sommaire

IV.1. Généralités	106
IV.2. Structure du Réseau Bayésien (RB).....	107
IV.3. Théorème de Bayes	108
IV.4. Notion de causalité et relations entre les noeuds	109
IV.4.1.Cas de deux variables discrète	109
IV.4.2.Cas de deux variables discrète et continue	110
IV.4.3.Cas de deux variables discrète et continue	111
IV.5. Calculs d'inférences dans un Réseau Bayésien.....	111
IV.6. Exemples de Réseau Bayésien	112
IV.6.1.Exemple 1 : machine dans un atelier	112
IV.6.2.Exemple 2 : Détection de fraude d'une carte bancaire.....	115
IV.7. Les approches d'apprentissage des Réseaux Bayésiens	119
IV.7.1.Apprentissage des paramètres	120
IV.7.1.1.Apprentissage des paramètres avec une base de données complète.....	120
IV.7.1.2.Apprentissage des paramètres avec une Base de Données incomplète.....	121
IV.7.2.Apprentissage de la structure du graphe avec des données complètes ...	122
IV.7.2.1.Algorithmes basés sur la recherche d'indépendances conditionnelles	123
IV.7.2.2.Algorithmes basés sur un score	124
IV.7.3.Apprentissage de la structure du graphe avec des données incomplètes	125
IV.8. Les Réseaux Bayésiens dynamiques	126

IV.9. Diagramme d'influence	127
IV.10. Conclusion.....	129

IV.1. Généralités

Les premières formalisations du Réseau Bayésien ont été initiées par les travaux de [Pearl 88] pour mettre en évidence trois aspects [Oliv06]:

- la nature subjective des informations,
- l'utilisation de la règle de Bayes comme principe de base pour la mise à jour des informations,
- la distinction entre les modes de raisonnement causal et fondé,

Les approches fondées sur le conditionnement et la formule d'inversion de Bayes sont appelées approches bayésiennes. Le nom de *Réseaux Bayésiens* est donné par cohérence avec cette appellation. D'autres noms existent également pour ces modèles : les *réseaux de croyance* (belief networks), les *modèles graphiques probabilistes orientés* (probabilistic oriented graphical models), les *réseaux probabilistes* (probabilistic networks), ou encore les *réseaux d'indépendances probabilistes*.

Le réseau bayésien est un système représentant la connaissance et permettant de calculer des probabilités conditionnelles apportant des solutions à différentes sortes de problématiques.

Ce réseau a été initié tout d'abord dans le domaine de l'intelligence artificielle, puis élargi dans les autres domaines scientifiques, en particulier dans le domaine de sûreté de fonctionnement pour la gestion des événements incertains, la détection et le diagnostic des défaillances des systèmes de procédés [Verr07], etc.

Les recherches et développements apportés aux Réseaux Bayésiens au cours de ces dernières années, portent principalement sur trois points essentiels : les algorithmes d'inférence, l'apprentissage de la structure du réseau et l'apprentissage des paramètres du réseau. Ces algorithmes sont opérationnels dans le cas des Réseaux Bayésiens classiques (statiques), pour les deux cas de figures : données d'apprentissage complètes ou incomplètes [Lera06].

IV.2. Structure du Réseau Bayésien (RB)

Un réseau bayésien est un outil complet permettant la visualisation de variables et de leurs dépendances ou indépendances. Il permet également de décrire quantitativement le fonctionnement d'un système grâce aux différents calculs de probabilités concernant les variables du système.

Ce réseau est un graphe dans lequel les nœuds représentent des variables aléatoires discrètes ou continues, et les arcs reliant ces dernières sont rattachées à des probabilités conditionnelles.

Le fait d'indiquer un arc entre deux variables implique une dépendance directe entre ces deux variables : l'une est le parent et l'autre l'enfant. Il faut fournir le comportement de la variable enfant à partir du comportement de son ou ses parents.

Pour cela, chaque nœud du réseau possède une table de probabilités conditionnelles. Une table de probabilités conditionnelles associée à un nœud permet de quantifier l'effet du ou des nœuds parents sur ce nœud : elle décrit les probabilités associées aux nœuds enfants suivant les différentes valeurs des nœuds parents. Pour les nœuds racines (sans parents), la table de probabilité n'est plus conditionnelle et fixe alors des probabilités a priori concernant les valeurs de la variable.

Le graphe est acyclique : il ne contient pas de boucle. Les arcs représentent des relations entre variables qui sont soit déterministes, soit probabilistes. Ainsi, l'observation d'une ou plusieurs causes n'entraîne pas systématiquement l'effet ou les effets qui en dépendent, mais modifie seulement la probabilité de les observer.

De manière formelle, un Réseau Bayésien [Naim04] est défini par :

- un graphe acyclique orienté G , $G = (V, E)$, où V est l'ensemble des nœuds de G , et E est l'ensemble des arcs de G ,
- un espace probabilisé (Ω, Z, P) , avec Ω un ensemble fini non vide, Z un ensemble de sous-espaces de Ω , et P une mesure de probabilité sur Z avec $P(\Omega) = 1$,
- un ensemble de variables aléatoires associées aux nœuds du graphe G et défini sur (Ω, Z, P) , tel que :

$$P(V_1, V_2, \dots, V_n) = \prod_{i=1}^n P(V_i | C(V_i)) \quad (\text{IV.1})$$

Où $C(V_i)$ est l'ensemble des parents (ou causes) de V_i dans le graphe G .

L'intérêt particulier des réseaux bayésiens est de tenir compte simultanément de connaissances a priori d'experts (dans le graphe) et de l'expérience contenue dans les données.

Un autre intérêt de l'utilisation des Réseaux Bayésiens dans l'analyse des événements incertains, réside dans la possibilité d'effectuer une description qualitative entre les différentes variables représentant ces événements (le graphe causal) et la description quantitative des dépendances entre les événements (probabilités conditionnelles) [Pear97].

La construction d'un Réseau Bayésien passe par trois étapes primordiales:

- **La structure** : comment déterminer la structure du réseau ou le graphe causal,
- **L'inférence** : comment calculer les probabilités a posteriori de chacune des variables du réseau. Généralement, l'inférence est lancée dès qu'une information nouvelle concernant une ou plusieurs variables est disponible. Cet apport d'information est appelé évidence et elle est propagée dans le réseau par le moteur d'inférence.
- **L'apprentissage** : comment estimer les probabilités et la structure.

IV.3. Théorème de Bayes

Les Réseaux Bayésiens s'appuient sur le théorème de Bayes. C'est un résultat de base en théorie des probabilités, issu des travaux de **Thomas Bayes** (1702-1761) :

$$P(A \setminus B) P(B) = P(A \cap B) = P(B \setminus A) P(A) \quad (\text{IV.2})$$

$$P(A \setminus B) = [P(B \setminus A) P(A)] / P(B) \quad (\text{IV.3})$$

En outre, étant donné n événements $A_1, A_2, \dots, A_n$ mutuellement exclusifs et exhaustifs tel que $P(A_i) \neq 0$ pour tout i , nous avons pour $1 \leq i \leq n$,

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i) P(A_i)}{P(B|A_1)P(A_1) + P(B|A_2)P(A_2) + \dots + P(B|A_n)P(A_n)} \quad (IV.4)$$

Le terme $P(A)$ est la probabilité a priori de A. Elle est « antérieure » au sens qu'elle précède toute information sur B. $P(A)$ est aussi appelée la probabilité marginale de A.

Le terme $P(A|B)$ est la probabilité a posteriori de A sachant B (ou encore de A sachant B). Elle est « postérieure », au sens qu'elle dépend directement de B.

Le terme $P(B|A)$, pour un B connu, est la fonction de vraisemblance de A. De même, le terme $P(B)$ est appelé la probabilité marginale ou a priori de B.

IV.4. Notion de causalité et relations entre les noeuds

Dans les Réseaux Bayésiens, deux noeuds qui représentent deux faits différents peuvent être en relation causale sans que l'un implique l'autre. Graphiquement, chaque parent a un effet sur ses fils. La notion de causalité joue un rôle très important pour construire les Réseaux Bayésiens [Todd03].

Un Réseau Bayésien permet de modéliser plusieurs types de noeuds. Nous utilisons dans la plupart des cas deux types de noeuds :

- un noeud discret représentant une variable discrète,
- un noeud continu représentant une variable continue.

IV.4.1. Cas de deux variables discrètes

En dressant un arc allant de A vers B, qui sont variables discrètes multinomiales de dimension respective a et b avec $a_1, a_2, \dots, a_a$ les différentes modalités de A, et $b_1, b_2, \dots, b_b$ les différentes modalités de B, la table de probabilités conditionnelles (table 1) se présente comme suit :

	B			
A	b_1	b_2	$\dots$	b_b
a_1	$P(b_1 a_1)$	$P(b_2 a_1)$	$\dots$	$P(b_b a_1)$
a_2	$P(b_1 a_2)$	$P(b_2 a_2)$	$\dots$	$P(b_b a_2)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
a_a	$P(b_1 a_a)$	$P(b_2 a_a)$	$\dots$	$P(b_b a_a)$

Tab. 1 : Table de probabilité conditionnelle avec nœud et parent discrets

Cette table de probabilités conditionnelles permet d'avoir toutes les informations nécessaires à l'inférence dans un réseau. La taille de cette table est de $a \times b$ et peut devenir très grande pour des variables avec beaucoup de modalités, donc son remplissage peut devenir difficile. En effet, la taille d'une table de probabilités d'un nœud discret X de taille x, ayant p parents discrets $Y_1, Y_2, \dots, Y_p$ de tailles respectives $y_1, y_2, \dots, y_p$, est de $x \prod_{i=1}^p y_i$.

IV.4.2. Cas de deux variables discrète et continue

Dans le cas de deux variables, A discrète multinomiale de dimension a et B continue de paramètre μ_B et Σ_B . En dressant un arc partant de A vers B, la table de probabilités conditionnelles de B (table 2) se présente comme suit :

A	B
a_1	$P(B a_1)=N(\mu_{a_1}, \Sigma_{a_1})$
a_2	$P(B a_2)=N(\mu_{a_2}, \Sigma_{a_2})$
$\dots$	$\dots$
a_a	$P(B a_a)=N(\mu_{a_a}, \Sigma_{a_a})$

Tab. 2 : Table de probabilité conditionnelle avec nœud continu et parent discret

La table de probabilité de B se compose de lois conditionnées aux modalités de A. En effet, la table de probabilité d'un nœud continu X, ayant p parents discrets $Y_1, Y_2, \dots, Y_p$ de tailles respectives $y_1, y_2, \dots, y_p$ est de $\prod_{i=1}^p y_i$ lois continues.

IV.4.3. Cas de deux variables discrète et continue

Dans le cas de deux variables continues A et B de paramètres respectifs μ_A , Σ_A et μ_B , Σ_B . En dressant un arc partant de A vers B, on effectue alors une régression et l'on peut écrire la loi régissant B pour une valeur a de A comme étant une loi gaussienne de paramètres $(\mu_B + \beta \times a; \Sigma_B)$, où β représente le coefficient de régression.

IV.5. Calculs d'inférences dans un Réseau Bayésien

Les calculs dans un réseau bayésien se nomment inférence. L'inférence permet de calculer les probabilités a posteriori de chacune des variables du réseau. Généralement, l'inférence est lancée dès qu'une information nouvelle concernant une ou plusieurs variables est disponible. Cet apport d'information est appelé évidence. Une fois l'information indiquée, celle-ci est propagée dans le réseau par le moteur d'inférence.

Les algorithmes les plus utilisés pour le calcul exact des inférences dans le cas de Réseaux Bayésiens avec variables discrètes sont:

« **Pearl Message Passing Algorithm** » : cet algorithme a été développé par Pearl [Pear86] en exploitant les indépendances locales des événements du Réseau Bayésien. Étant donné un ensemble de valeurs a d'un ensemble A de variables, l'algorithme détermine $P(x \setminus a)$ pour toutes les valeurs x de chaque variable X du réseau. Il accomplit cette mission en initiant des messages de chaque variable instanciée pour ses voisins. Ces voisins à leur tour, transmettent des messages à leurs voisins. Cette méthode ne fonctionne de manière exacte que lorsque le Réseau Bayésien possède une structure sous forme d'arbre.

L'arbre de jonction [Oliv06]: appelée aussi « clustering ou clique-tree propagation algorithm ». Cette méthode a été introduite par Jensen, Lauritzen & Olesen en 1990 [Jens90] et est aussi appelée méthode JLO (pour Jensen, Lauritzen, Olesen).

La méthode de cet algorithme appelé « algorithme de l'arbre de jonction » [Jens96], implique l'extraction d'un graphe non orienté triangulé du Réseau Bayésien, et la création d'un arbre dont les sommets sont les cliques de ce graphe triangulé. Un tel

arbre est appelé arbre de jonction. Les probabilités conditionnelles sont ensuite calculées en transmettant des messages dans l'arbre de jonction. La méthode est divisée en cinq étapes qui sont [Oliv06] :

- moralisation du graphe (marier les parents et "désorienter" le graphe),
- triangulation du graphe moral (tout cycle de longueur au moins 4 doit contenir une corde (arête reliant deux sommets non consécutifs sur le cycle),
- construction de l'arbre de jonction,
- inférence dans l'arbre de jonction en utilisant l'algorithme des messages locaux,
- transformation des potentiels de clique en lois conditionnelles mises à jour.

Pour illustrer cette présentation des Réseaux Bayésiens et comprendre un peu mieux les calculs d'inférences, deux exemples simples sont considérés dans le paragraphe suivant.

IV.6. Exemples de Réseau Bayésien

IV.6.1. Exemple 1 : machine dans un atelier

L'exemple de la figure 1 présente le modèle bayésien d'une machine dans un atelier. Cette machine est arrêtée en moyenne dans 5% des cas pour différentes raisons (maintenance, panne, etc). Mais, cette machine est également arrêtée lors d'une panne de courant qui se produit environ 1 fois tous les 100 jours. Près de la machine se trouve une lumière qui est toujours allumée, exceptée lorsque l'ampoule grille (environ dans 1% des cas), ou bien lorsqu'il y a une panne de courant.

Grâce à ces données, on remplit les différentes tables de probabilités conditionnelles. Ces tables permettent de formaliser de manière simple les distributions de probabilités conditionnelles associées à chaque variable en fonction de ses parents. Dans cet exemple, les tables de probabilités conditionnelles sont visibles à côté des nœuds représentés.

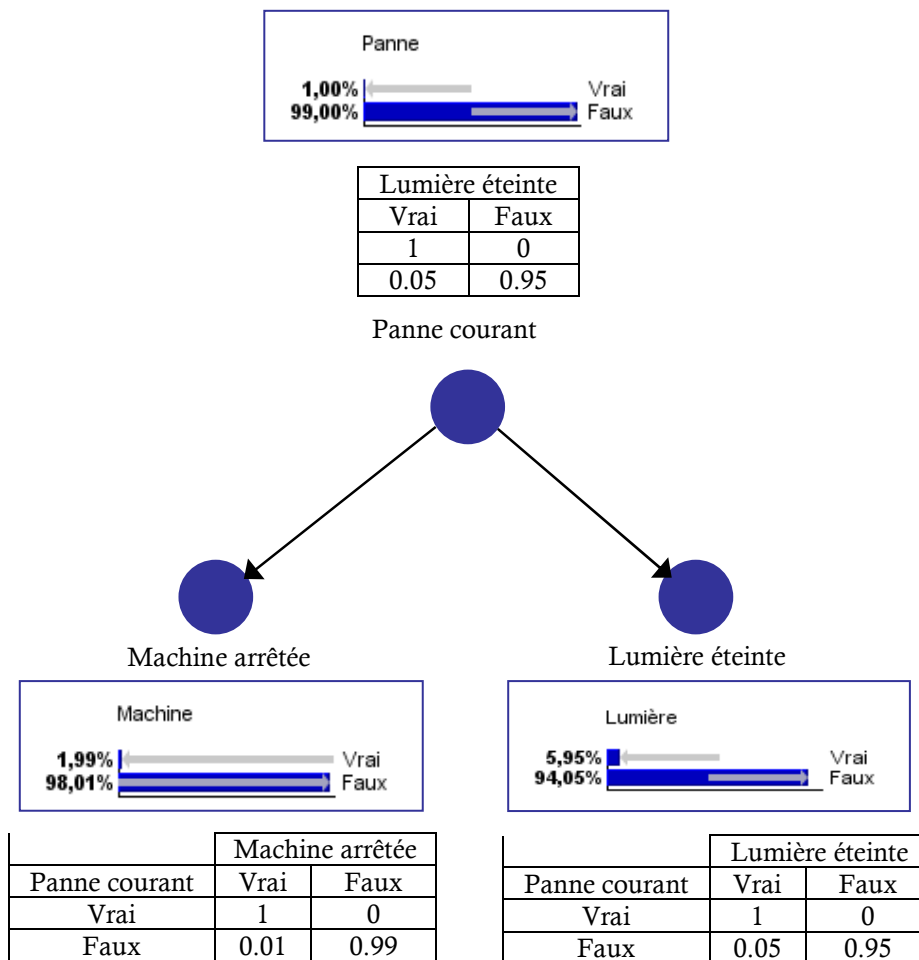


Fig.1 Exemple de Réseau Bayésien

Sur ce système, on peut alors se poser différentes questions. Par exemple, quelle est la probabilité que la machine fonctionne encore lorsque l'on voit que la lumière est éteinte ?

Pour cela, nous allons intégrer une observation (ou évidence) au réseau. Cette observation est "la machine est arrêtée", la probabilité que "machine arrêtée" soit vraie est alors de 100%. En appliquant la loi de Bayes, on peut recalculer toutes les probabilités de chacune des modalités de chaque variable du réseau (voir figure 2).

On obtient le résultat suivant : suite à l'observation "la machine arrêtée", on a 52,74% de chance que la lumière soit éteinte. La probabilité d'avoir la lumière éteinte a augmenté et cette augmentation est répercutée sur la variable "panne de courant", dont la probabilité elle aussi a augmenté de 1% à 50.25%.

Tous les calculs dans ce réseau sont effectués avec la loi de Bayes qui est donnée par l'équation (IV.5) où X et Y sont deux variables aléatoires.

$$P(X|Y) = \frac{P(Y|X)P(X)}{P(Y)} \quad (IV.5)$$

$$P(Y) = P(Y \setminus X).P(X) + P(Y \setminus \bar{X}).P(\bar{X}) \quad (IV.6)$$

La notation $P(X)$ représente la probabilité d'occurrence de l'événement X , alors que la notation $P(X|Y)$ représente la probabilité d'occurrence de l'événement X sachant que l'événement Y s'est produit. Calculons la probabilité qu'il y ait une panne de courant sachant que l'on voit la lumière éteinte:

$$P(\text{panne courant} \setminus \text{machine arrêtée}) = \frac{P(\text{machine arrêtée} \setminus \text{panne courant}) P(\text{panne courant})}{P(\text{machine arrêtée})}$$

$$= \frac{1 \times 0,01}{0,0199} = 0,5025$$

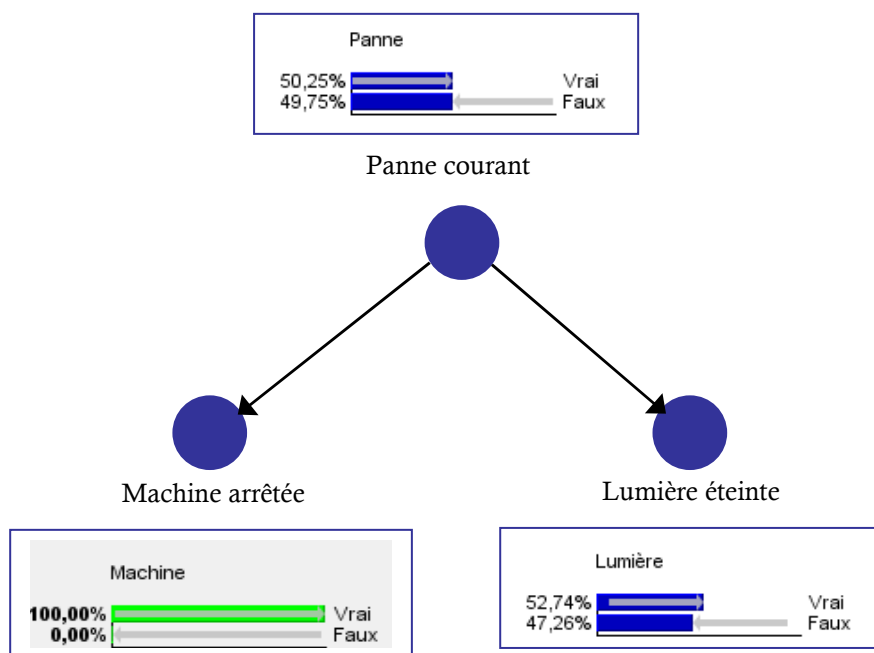


Fig. 2 Réseau Bayésien classique avec observation « machine en arrêt »

Calculons à présent la probabilité que la machine soit arrêtée sachant que l'on a 50% de chance qu'il n'y ait plus de courant:

$$\begin{aligned}
 P(\text{machine arrêtée}) &= P(\text{machine arrêtée} \mid \text{Panne courant}) \cdot P(\text{panne courant} = 0.5) + P(\text{machine arrêtée} \mid \neg \text{Panne courant}) \cdot P(\neg \text{panne courant}) \\
 &= 1 \times 0.5 + 0.5 \times 0.01 = \mathbf{0.505}
 \end{aligned}$$

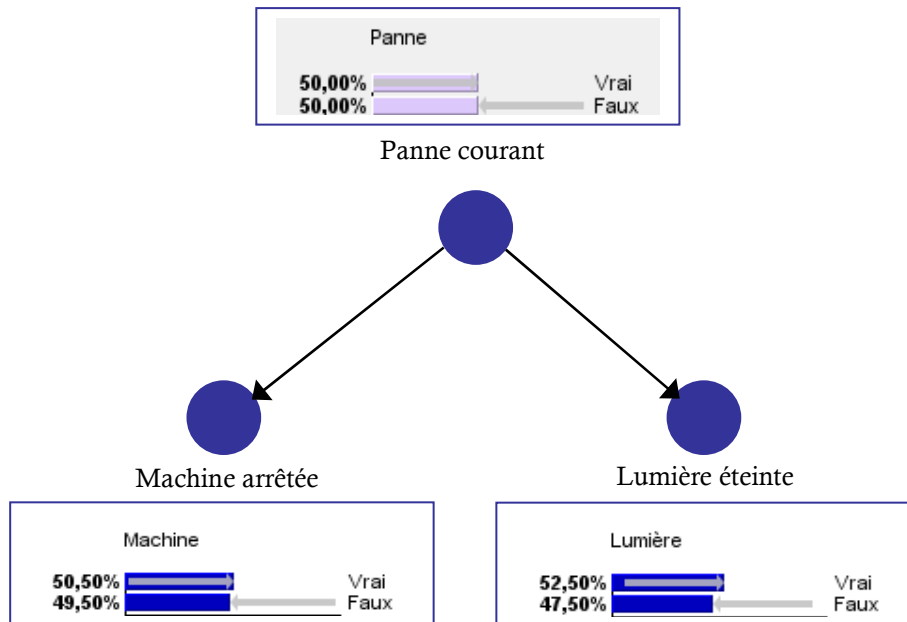


Fig. 3 Réseau Bayésien classique avec observation «P (panne de courant)=0.5 »

Cet exemple montre les types de calculs qui sont effectués dans le réseau. Ces calculs sont simples pour quelques noeuds, mais pour de grands réseaux, ils peuvent rapidement devenir très complexes et coûteux en temps. L'utilisation de logiciels s'avère nécessaire dans le cas de réseaux avec des dizaines de noeuds.

IV.6.2. Exemple 2 : Détection de fraude d'une carte bancaire

Prenons un deuxième exemple avec cette fois-ci cinq variables, celui du problème de la détection de fraude de carte de crédit [Heck97].

Nous commençons par déterminer les variables à modéliser. Un choix possible de variables pour notre problème est :

- Fraude (F) : ce qui représente si oui ou non l'achat est frauduleux,
- Gaz (G) : si oui ou non, il y avait un achat de gaz dans les 24 dernières heures,

- Bijoux (J) : si oui ou non, il y avait un achat de bijoux dans les 24 dernières,
- Âge (A) et le sexe (S), sont respectivement l'âge et le sexe du détenteur de la carte.

La méthode la plus simple pour la construction de la structure du Réseau Bayésien, est de procéder comme suit:

- déceler les relations de causalité entre les variables,
- ces relations de causalité correspondent typiquement à des assertions de dépendance conditionnelle.

En particulier, pour construire un Réseau Bayésien pour un ensemble donné de variables, nous allons simplement dessiner des arcs à partir de variables causes à leurs effets immédiats [Heck97].

Par exemple, étant donné les affirmations selon lesquelles la fraude est une cause directe de l'achat de gaz, et Fraude, âge et le sexe sont des causes directes de l'achat de bijoux, nous obtenons la structure du réseau bayésien suivante :

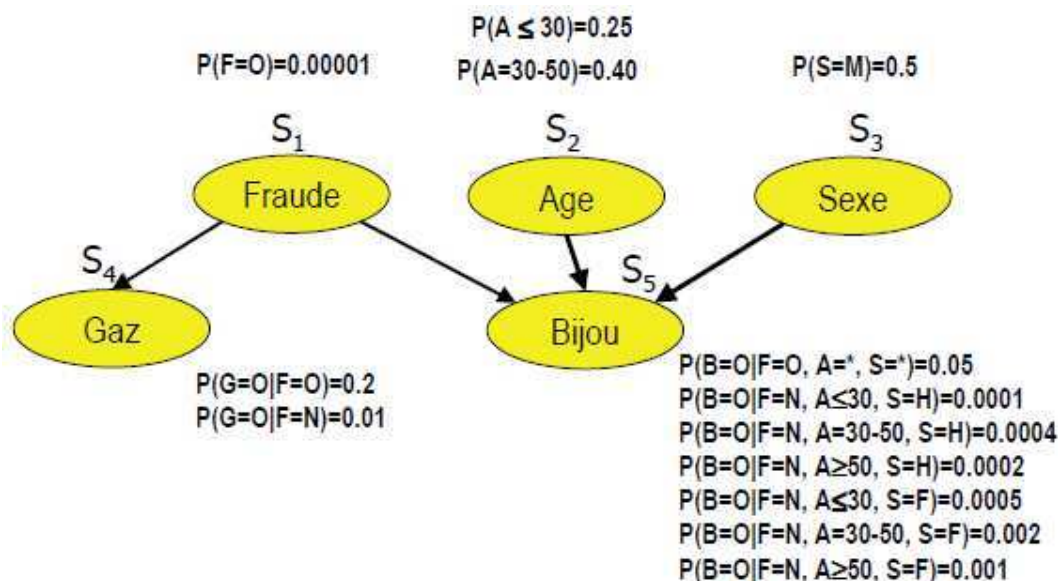


Fig. 4 Réseau Bayésien pour détecter la fraude par carte de crédit.

L'étape finale de la construction de notre réseau, est d'évaluer les distributions de probabilité pour tous les nœuds x_i et pour tous ses parents pai : $P(x_i \setminus pai)$. Dans notre cas, toutes les variables sont discrètes, les états de ces différentes variables constituant la table de probabilité pour chaque nœud, sont illustrés dans la figure 4 .

Une fois que nous avons construit ce Réseau Bayésien (à partir de la connaissance préalable, données, ou une combinaison des deux), nous avons généralement besoin de déterminer les différentes probabilités à partir du modèle. Les calculs d'inférence dans le graphe sont précisés dans la figure 5.

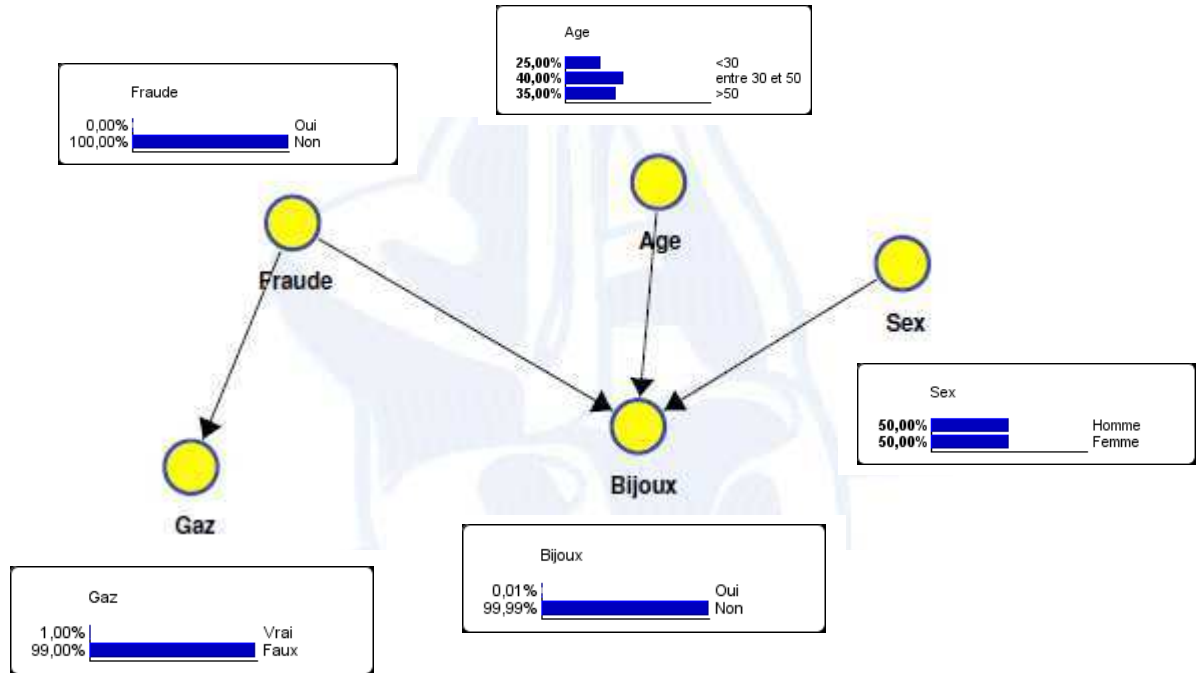


Fig. 5 Inférence du graphe du Réseau Bayésien pour détecter la fraude par carte de crédit

Dans cet exemple de détection de la fraude, nous voulons connaître la probabilité de fraude suite à l'observation des autres variables. Cette probabilité n'est pas stockée directement dans le modèle, et doit donc être calculée (inférence probabiliste).

La probabilité d'observations de fraude suite à l'observation des autres variables peut être calculée comme suit:

$$P(F \setminus A, S, G, B) = \frac{P(F, A, S, G, B)}{P(A, S, G, B)} = \frac{P(F, A, S, G, B)}{\sum_{F'} P(F', A, S, G, B)} \quad (IV.7)$$

$P(F, A, S, G, B)$ étant la probabilité jointe.

Par définition, soit S l'ensemble des variables S_i du réseau bayésien, alors la probabilité jointe $P(S)$ est :

$$\begin{aligned} P(S) &= P(S_1) P(S_2 | S_1) P(S_3 | S_2, S_1) \dots P(S_n | S_{n-1} \dots S_1) \\ P(S) &= \prod_i P(S_i | S_{i-1} \dots S_1) \end{aligned} \quad (IV.8)$$

Cependant, pour les problèmes avec de nombreuses variables, cette approche directe n'est pas pratique. Heureusement, au moins lorsque toutes les variables sont discrètes et peu nombreuses, nous pouvons exploiter les indépendances conditionnelles dans un Réseau Bayésien pour rendre ce calcul plus simple.

Dans notre exemple, vu que la fraude (F) est une cause directe de Gas (G) et la Fraude (F), Age (A) et Sex (S) sont des causes directes de Bijoux (B)

Nous obtenons :

$$P(A \setminus F) = P(A)$$

$$P(S \setminus F, A) = P(S)$$

$$P(G \setminus F, A, S) = P(G \setminus F)$$

$$P(B \setminus F, A, S, G) = P(B \setminus F, A, S)$$

$$P(F, A, S, G, B) = P(F) P(A \setminus F) P(S \setminus F, A) P(G \setminus F, A, S) P(B \setminus F, A, S, G)$$

$$= P(F) P(A) P(S) P(G \setminus F) P(B \setminus F, A, S)$$

$$\text{L'équation devient: } P(F \setminus A, S, G, B) = \frac{P(F) P(A) P(S) P(G \setminus F) P(B \setminus F, A, S)}{\sum_{F'} P(F') P(A) P(S) P(G \setminus F') P(B \setminus F', A, S)} \quad (\text{IV.9})$$

En faisant les calculs:

$$\begin{aligned} P(F=O, A=30-50, S=H, G, B=O) &= P(F=O) \times P(A=30-50) \times P(S=H) \times \sum_G P(G \setminus F=O) \times \\ &P(B=O \setminus F=O, A=30-50, S=H) \\ &= 0.00001 \times 0,40 \times 0,5 \times 1 \times 0,05 \\ &= 0.0000001 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(F=N, A=30-50, S=H, G, B=O) &= P(F=N) \times P(A=30-50) \times P(S=H) \times \sum_G P(G \setminus F=N) \\ &P(B=O \setminus F=N, A=30-50, S=H) \\ &= 0.99999 \times 0,40 \times 0,5 \times 1 \times 0,0004 \\ &= 0.00008 \end{aligned}$$

$$P(F=O \mid A=30-50, S=H, G, B) = 0.0000001 / 0.0000801 = 0.00125 = \mathbf{0.125\%}$$

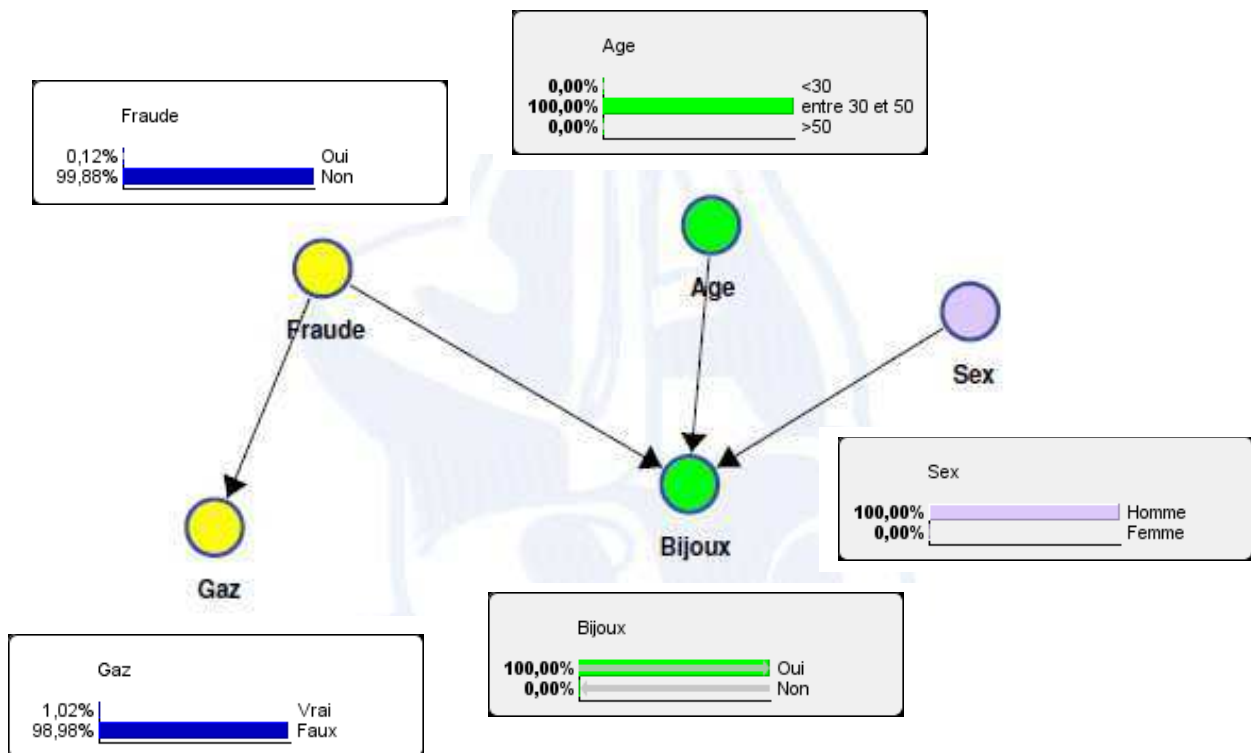


Fig. 6 Inférence du graphe du Réseau Bayésien suite observation Age = 30-50, Sex = Homme, Achat Bijoux = Oui.

IV.7. Les approches d'apprentissage des Réseaux Bayésiens

Lors de la construction des Réseaux Bayésiens, il n'est pas toujours évident qu'un expert puisse fournir de façon numérique l'ensemble des paramètres nécessaires à l'inférence dans un graphe. Il est intéressant dans certains cas de déterminer ces paramètres à partir d'une base d'exemples car il est possible d'apprendre les deux à partir des données. C'est la méthode d'apprentissage qui permet de répondre aux deux questions suivantes [Corn02][Dela07][Verr07] :

- Comment estimer les lois de probabilités conditionnelles (paramètres de chaque Table de Probabilité Conditionnelle TPC) ?
- Comment trouver la structure du Réseau Bayésien ?

Les deux méthodes utilisées sont l'apprentissage des paramètres et l'apprentissage de la structure. Cependant, l'apprentissage de la structure est plus difficile que l'apprentissage des paramètres, car lorsque quelques nœuds sont cachés,

ou si les données sont manquantes, cela est beaucoup plus difficile à traiter quand tout les événements sont observés. Ce qui donne lieu à quatre cas [Kevi98] illustrés dans la table 3 ci après:

Structure	Observabilité	Méthode
connue	totale	Estimation du maximum de vraisemblance
connue	partielle	Expectation-Maximisation (ou descente de gradient)
inconnue	totale	rechercher à travers l'espace modèle
inconnue	partielle	Expectation-Maximisation + rechercher à travers l'espace modèle

Tab.3 : Algorithmes d'apprentissage en fonction de la structure et l'observabilité

L'estimation de distributions des probabilités et la découverte d'associations entre les nœuds du graphe bayésien constituent un sujet très vaste et complexe. Nous décrirons ici les méthodes les plus utilisées dans le cadre des Réseaux Bayésiens, selon que les données à notre disposition sont complètes ou incomplètes (observation totale ou partielle).

IV.7.1. Apprentissage des paramètres

Supposons que nous connaissons déjà la structure du Réseau Bayésien à apprendre, et qu'il nous reste à évaluer les probabilités conditionnelles. Il s'agit donc de spécifier les tables de probabilités, souvent appelées paramètres du Réseau Bayésien.

Il est clair que l'apprentissage ne dépend pas seulement des variables, mais aussi de leur agencement. En effet, un nœud parent est caractérisé par des probabilités marginales alors qu'un nœud enfant est caractérisé par des probabilités conditionnelles.

Généralement, les distributions de probabilités marginales sont connues d'avance puisqu'elles décrivent le degré de confiance des causes. Par contre, les probabilités conditionnelles $P(X^i = x_k^i \setminus Par(X^i) = x_1^i) = \theta_{i,j,k,l}$ nécessitent d'être apprises.

IV.7.1.1. Apprentissage des paramètres avec une base de données complète

C'est le cas où toutes les variables sont observées, la méthode la plus simple et la plus utilisée est l'estimation statistique qui consiste à estimer la probabilité d'un événement par la fréquence d'apparition de l'événement dans la base de données. Cette

approche est appelée Maximum de Vraisemblance (MV) [Jord98]. Les probabilités conditionnelles sont obtenues selon l'équation suivante:

$$\begin{aligned} \widehat{P}(X^i = x_k^i | pa(X^i) = x_l^j) &= \widehat{\theta}_{i,j,k,l}^{MV} \\ &= \frac{N_{i,j,k,l}}{\sum_k N_{i,j,k,l}} \end{aligned} \quad (IV.10)$$

Avec $N_{i,j,k,l}$ le nombre d'événement dans la base de données pour lesquels la variable $X_i = x_k^i \dots$ et $Pa(X_i) = x_l^j \dots$ dans la base de données.

IV.7.1.2. Apprentissage des paramètres avec une base de données incomplète

C'est le cas où certaines variables ne sont observées que partiellement ou même jamais. Les approches développées dépendent du type de données manquantes :

- Les données MCAR « Missing Completely At Random » : Dans ce cas, les exemples avec des données manquantes ne peuvent pas être différenciés de ceux complètement observés. Les données manquantes représentent juste une absence de mesure inattendue et isolée. L'absence de mesure suit donc, par exemple une loi de probabilité.
- Les données MAR « Missing At Random » : Ici les exemples avec des données manquantes sont différents de ceux complètement observés. Néanmoins le processus qui a généré les données manquantes est prédictible à partir des autres variables de la base plutôt que d'être dû exclusivement à la variable dont la valeur est absente.
- Les données NMAR « Non Missing At Random » : Dans ce cas, le mécanisme qui provoque l'absence d'une variable n'est pas aléatoire et ne peut pas non plus être complètement prédit à l'aide des autres variables observées de la base d'exemples.

En présence d'une base de données incomplète suivant un mécanisme MAR ou MCAR, Il est possible d'estimer la distribution des données manquantes dans la base d'exemples. La méthode d'estimation de paramètres la plus couramment utilisée est fondée sur l'algorithme itératif **EM (Expectation-Maximisation)** proposé par [Demp77].

IV.7.2. Apprentissage de la structure du graphe avec des données complètes

L'objectif de l'apprentissage de structures des RB est d'établir la topologie du graphe en identifiant les relations de dépendance entre les noeuds. Pour cela, il existe deux façons différentes de procéder: avis d'experts et apprentissage par base de données. L'apprentissage de structure est un problème très difficile, en particulier à cause de la taille de l'espace de recherche [Lera06].

En effet, le nombre de Graphes Directs Acycliques (GDA) pour représenter toutes les structures différentes possibles pour n noeuds est de taille super exponentielle. En effet, [Robi77] a prouvé qu'il était possible d'estimer ce nombre grâce à la formule réursive suivante :

$$r(n) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} \binom{n}{i} 2^{i(n-1)} r(n-i) = n^{2^{O(n)}} \quad (\text{IV.11})$$

Nbre de noeuds	2	3	4	5	6	7	8
Nbre de GDA	3	25	543	29 281	3 781 503	1 138 779 265	783 702 329 343

Tab.4 : Nombre de GDA existants en fonction du nombre de noeuds

L'apprentissage par avis d'expert est l'approche la plus simple et la plus intuitive de l'apprentissage de structure d'un RB. Elle est utilisée pour des modèles où les dépendances traduisent des relations de dépendances clairement identifiables. Par ailleurs, l'expert humain peut distinguer entre deux types de dépendances : les liens qui peuvent être relevés en se basant sur les connaissances a priori du système étudié, et les liens déduits à partir des modèles formels ou physiques liants les variables aléatoires[Bens08].

En ce qui concerne l'apprentissage par base de données, il existe principalement deux types de techniques pour effectuer la recherche de la structure du Réseau Bayésien.

- a. La première technique consiste en la création d'une table d'indépendances conditionnelles entre les différents attributs en effectuant des tests statistiques sur la base de données.

- b. La deuxième technique d'apprentissage de structure utilise une fonction de score, dont l'heuristique de recherche consistera à l'optimiser.

IV.7.2.1. Algorithmes basés sur la recherche d'indépendances conditionnelles

Plusieurs algorithmes ont été proposés pour ce type de méthodes basées principalement sur les deux tests statistiques qui sont le test du χ^2 et du rapport de vraisemblance G^2 . Une des premières méthodes de recherche d'indépendances conditionnelles efficace proposée est celle de l'algorithme PC (Peter and Clark). La méthode introduite par [Spir93] utilise un test statistique de Khi-deux pour évaluer s'il y a indépendance conditionnelle entre deux variables. Il est alors possible de reconstruire la structure du Réseau Bayésien à partir de l'ensemble des relations d'indépendances conditionnelles découvertes. En pratique, un graphe complètement connecté sert de point de départ, et lorsqu'une indépendance conditionnelle est détectée à l'aide d'un test statistique, l'arc correspondant est retiré.

Un algorithme de principe similaire IC (Inductive Causation) a été introduit à la même époque par Pearl & Verma [Pear00] [Pear91]. La principale différence entre ces deux algorithmes est que l'algorithme PC est initialisé avec un graphe complètement connecté et raisonne par élimination des indépendances entre les différents noeuds, tandis que l'algorithme IC est initialisé avec un graphe vide et raisonne par création des dépendances entre les différents noeuds du graphe causal. La variante IC* de l'algorithme IC, permet de détecter si éventuellement il peut exister des variables latentes.

Spirtes, Glymour & Scheines [Spir00] introduisent une version augmentée de la méthode PC qui détecte l'existence de variables latentes et la nomment FCI (Fast Causal Inference). Les algorithmes de cette méthode ont alors une complexité exponentielle en nombre de tests d'indépendance.

De nouvelles méthodes ont été développées récemment pour améliorer ces algorithmes face à des bases de données où il y a peu d'exemples par rapport au nombre de variables. Nous citons par exemple l'algorithme QFCI (Quantitative Fast Causal Inference) [Bade03], BNPC [Chen02], l'algorithme RAI (Recursive Autonomy Identification) [Yehe05], etc.

IV.7.2.2. Algorithmes basés sur un score

Ces algorithmes ont été développés dans le but de remédier à l'inconvénient majeur des méthodes basées sur les tests statistiques. En effet, lorsque le nombre de noeuds du Réseau Bayésien augmente, le nombre de tests statiques à effectuer croît exponentiellement. Les méthodes d'identification d'indépendances conditionnelles deviennent donc compliquées à mettre en oeuvre.

Le principe de ces approches est de quantifier l'adéquation d'un Réseau Bayésien au problème à résoudre, c'est à dire d'associer un score à chaque Réseau Bayésien, puis de rechercher la structure qui donnera le meilleur score dans l'espace des graphes acycliques dirigés [Lera06][Spir93].

L'estimation du score d'un Réseau Bayésien peut mener à de nombreux calculs inutiles et rendre les méthodes d'apprentissage de structure inutilisables en pratique. La première précaution à prendre concerne l'utilisation d'un score décomposable localement pour ne pas recalculer complètement le score d'une nouvelle structure.

Plusieurs heuristiques permettent d'améliorer les calculs de scores, soit en réduisant l'espace de recherche à un sous-espace particulier (l'espace des arbres), soit en ordonnant les noeuds pour ne chercher les parents d'un noeud que parmi les noeuds suivants, etc.

Nous citons dans ce cadre, la méthode de l'arbre de recouvrement maximal MWST (Maximum Weight Spanning Tree) [Lera06] qui est une heuristique réduisant la recherche de la structure du Réseau Bayésien à l'espace des arbres, et précisément l'arbre qui passe par tous les noeuds et maximise un score défini pour tous les arcs possibles.

L'arbre de recouvrement maximal est un arbre non orienté reliant toutes les variables. Son orientation pourrait donc être réalisée en choisissant arbitrairement un noeud racine et en dirigeant chaque arête à partir de ce noeud. Pour cela, il suffit d'effectuer un parcours en profondeur de l'arbre en mémorisant le père de chaque noeud, puis de se servir de cette information pour orienter les arêtes.

Nous appellerons algorithme MWST « dirigé », l'algorithme de construction d'un arbre orienté qui utilise l'algorithme de Kruskal [Naim04][Corm94] pour obtenir l'arbre de recouvrement optimal non orienté, puis qui oriente les arêtes à partir d'un nœud racine arbitraire.

Algorithme MWST « dirigé » se fait en deux étapes [Naim04] :

1- Construction de l'arbre optimal (Kruskal) :

$\forall X_i, T(X_i) = \{X_i\}$
 $B^0 \leftarrow \emptyset$
 $\forall (X_i, X_j) \in A$
 Si $T(X_i) \neq T(X_j)$ alors

- $B^0 \leftarrow B^0 \cup (X_i, X_j)$
- $T' \leftarrow T(X_i) \cup T(X_j)$
- $T(X_i) \leftarrow T'$
- $T(X_j) \leftarrow T'$

2- Orientation des arêtes :

$B \leftarrow \emptyset$
 $\{pa_i\} \leftarrow \text{Parcours profondeur}(B^0, X_r)$
 $\forall X_i,$
 Si $pa_i \neq \emptyset$ alors ajout de $pa_i \rightarrow X_i$ dans B

Notations :

A : liste des arêtes (X_i, X_j) dans l'ordre décroissant des W
 $T(X_i)$: arbre passant par le nœud X_i
 X_r : racine choisie pour orienté l'arbre
 pa_i : parent du nœud X_i
 B^0 : arbre optimal non orienté
 B : structure final obtenue par l'algorithme

IV.7.3. Apprentissage de la structure du graphe avec des données incomplètes

Bien que de plus en plus de bases de données sont disponibles, nombreuses sont celles incomplètes. Ces incomplétudes sont dues à des raisons très variées telles qu'un oubli d'un opérateur lors de l'enregistrement d'une information, ou mesure ou la défaillance de l'appareil de mesure, etc. Les méthodes d'apprentissage des Réseaux Bayésiens doivent être alors adaptées à ce type de bases de données pour élargir leurs champs d'application.

Plusieurs travaux ont été menés dans cette direction afin d'aboutir à des solutions pour ce genre de problématiques.

Pour y parvenir, certains travaux ont utilisé des méthodes de types EM [Demp77] dont l'algorithme pionnier pour ces types d'approches est celui de Friedman [Frie97]. L'auteur de ces travaux a proposé par la suite une nouvelle version bayésienne de son algorithme [Frie97]. D'un autre côté, d'autres chercheurs ont réussi à adapter les méthodes d'apprentissage à partir des données complètes aux problèmes de données incomplètes.

Nous citons par exemple l'algorithme PC* introduit par [Dash03] dont la procédure de recherche de structure est la même que celle de l'algorithme PC. La nouveauté dans PC* réside dans le fait que les tests statistiques sont basés sur une nouvelle méthode appelée « Hybrid Independence Test ». Plus récemment, une méthode nommée MWST-EM de type EM a été proposée par [Oliv05].

IV.8. Les Réseaux Bayésiens dynamiques

Les Réseaux Bayésiens dynamiques [Verr07] sont des Réseaux Bayésiens intégrant la notion de temps, c'est à dire qu'une variable peut influencer sa propre valeur à l'instant suivant (voir figure 7).

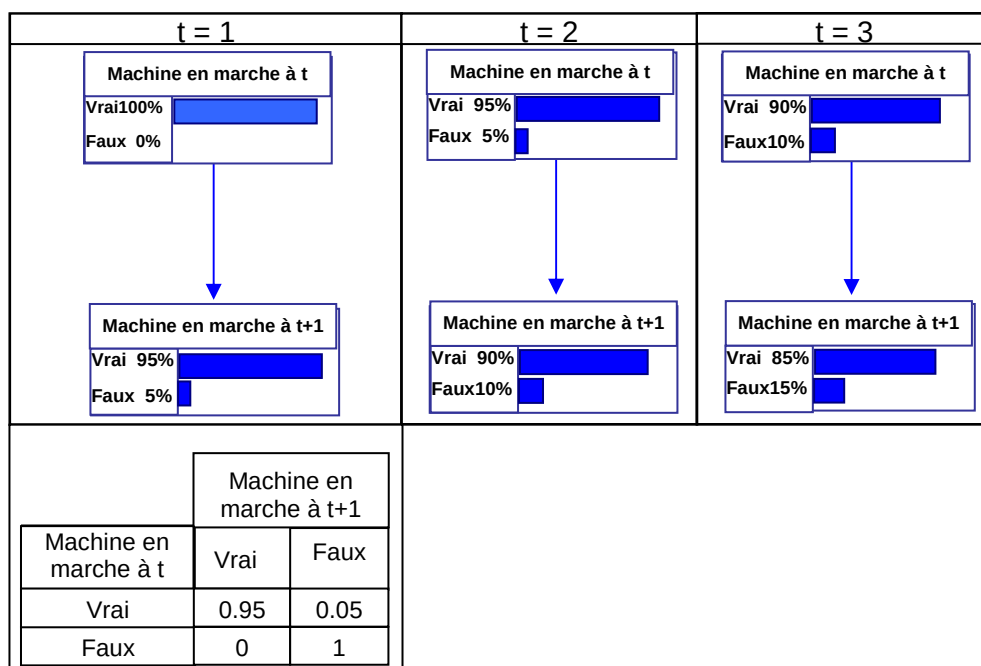


Fig. 7 Réseau Bayésien dynamique

Si on considère un ensemble de variables $D(t) = \{D_1(t), D_2(t), \dots, D_n(t)\}$ évoluant dans le temps, un Réseau Bayésien dynamique représente la distribution de probabilité jointe de ces variables pour un intervalle borné $[0, T]$. En général, cette distribution peut être codée par un Réseau Bayésien statique avec $T \times n$ variables. Si le processus est stationnaire, les hypothèses d'indépendance et les probabilités conditionnelles associées sont identiques pour tous les temps t . Dans ce cas, le Réseau Bayésien dynamique peut être représenté par un Réseau Bayésien dont la structure est dupliquée pour chaque pas de temps. Un nœud représente donc une variable aléatoire dont la valeur indique l'état occupé à l'instant t .

IV.9. Diagramme d'influence

Un diagramme d'influence est une représentation graphique et mathématique de problèmes d'inférence et de décision. Les diagrammes d'influences sont une généralisation des arbres de décision. Un diagramme d'influence se représente sous la forme d'un graphe acyclique dirigé. Il peut comporter quatre types de nœud [Verr07]:

1. nœud de décision : est un nœud multimodal où chaque modalité représente une action influençant le système (et donc le réseau). Ainsi, chacune des actions est décrite par l'intermédiaire des tables de probabilités associées aux nœuds enfants,
2. nœud d'utilité : est un nœud permettant d'associer une valeur numérique aux états constitués par la combinaison des différentes modalités de ses parents. Ces valeurs numériques représentent alors la qualité ou le coût de ces états,
3. nœud probabiliste,
4. nœud déterministe.

Dans le cas du Réseau Bayésien, un nœud déterministe n'est autre qu'un nœud probabiliste où l'une des modalités est sûre à 100 %. Aussi, si l'on ajoute à ce réseau des nœuds utilité et des nœuds décision, il représentera un diagramme d'influence.

Un diagramme d'influence est très intéressant car il permet d'étudier les différentes réactions d'un système modélisé par Réseaux Bayésiens en fonction des

actions prises sur le système. Ainsi, grâce à l'utilité, il est possible de comparer les performances de telle ou telle action sur le système et d'optimiser par la suite les différentes décisions à prendre.

La figure 8 présente un exemple de diagramme d'influence. Ce Réseau Bayésien dynamique représente un système de distribution de fluide modélisé par le logiciel BayesiaLab. Les nœuds utilité sont représentés par des losanges, les nœuds de décision sont représentés par des carrés, alors que les nœuds probabilistes sont représentés par des ronds.

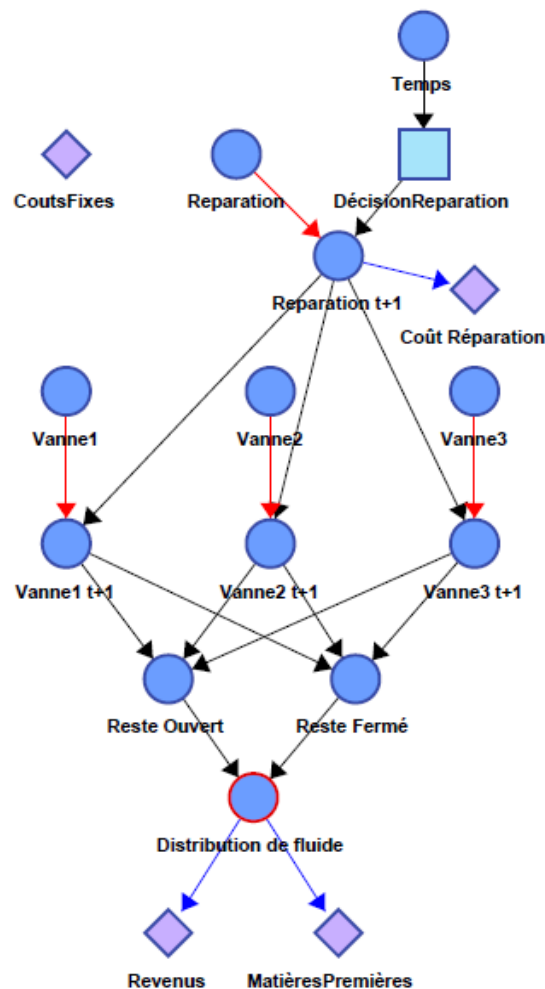


Fig. 8 Diagramme d'influence sous Réseau Bayésien

IV.10. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre que les Réseaux Bayésiens reposent sur un formalisme issu de la théorie des graphes et des probabilités et permettent de représenter un ensemble de variables aléatoires pour lesquelles on connaît un certain nombre de relations de dépendances. Ces réseaux établissent une représentation graphique de la causalité entre les événements, les probabilités permettent d'évaluer l'occurrence sur les noeuds de ces événements en fonction de leurs parents ou racines.

Les Réseaux Bayésiens permettent une circulation de l'information, c'est-à-dire que toute nouvelle observation rajoutée aura la conséquence de modifier la probabilité locale de certains noeuds et donc de modifier l'ensemble du réseau.

Par ailleurs, l'information dans un Réseau Bayésien peut circuler dans les deux sens. En effet, le théorème de Bayes permet une induction « top-down », c'est à dire à partir des causes en déduire les conséquences, mais il permet d'inverser les probabilités, c'est-à-dire que si l'on connaît les conséquences d'une cause, l'observation des effets permet de remonter aux causes, c'est l'effet d'induction « bottom-up ». Il existe aussi un troisième type d'induction dit « explaining away » ou comment réfuter une cause en constatant une autre, autrement dit partir d'une conséquence pour remonter aux causes, constater laquelle est vraie et réfuter les conséquences sous jacentes des autres causes.

L'intérêt pratique de l'utilisation du Réseau Bayésien dans la sûreté ferroviaire, est qu'il nous sera possible de réaliser une analyse inductive à travers la mesure de l'impact d'un événement sur le réseau, et déductive à travers l'examen des causes les plus probables conduisant à un événement. Ces analyses de risques seront réalisées dans les chapitres V et VI à travers deux exemples de systèmes ferroviaires, dans une approche systémique qui prend en compte simultanément les éléments techniques, environnementaux et humains au centre des problèmes de gestion des risques.

Dans ces deux cas d'études, l'utilisation du Réseau Bayésien est envisagée par rapport à d'autres outils précités dans le chapitre I, car cet outil permet:

- La possibilité de rassembler et de fusionner les connaissances dans le modèle, qu'elles soient des données historiques ou empiriques provenant du Retour d'EXpérience, expertise, de statistiques ou de probabilités subjectives, observations, etc.

- La représentation des connaissances sous un modèle graphique explicite, intuitive et compréhensible. Le modèle peut bien entendu évoluer en fonction des nouvelles exigences ou techniques du système à modéliser.
- L'évaluation, la prévision, le diagnostic et l'optimisation des décisions en utilisant les connaissances du modèle établi.

Chapitre V

Le Modèle Bayésien d'évaluation du risque collision au niveau du PN

Sommaire

V.1. Analyse fonctionnelle du système Passage à Niveau.....	133
V.2. Analyse de dysfonctionnement du système Passage à Niveau	134
V.3. Structure du Réseau Bayésien à partir de l'Arbre de Fautes.....	137
V.3.1. Conditions pour une mutation de l'AF au RB.....	137
V.3.2. Limites constatées de l'AF dans l'analyse du risque collision	139
V.4. Base de données des Incidents des PN	141
V.4.1. Acquisition de la base de donnée des incidents PN	141
V.4.2. Revue des statistiques sur les incidents aux PN	142
I.4.2.1. Emplacement.....	142
I.4.2.2. Type et fonction des véhicules en cause	142
I.4.2.3. Signalisation et systèmes d'avertissement.....	143
I.4.2.4. Statistiques annuelles et conditions temporelles.....	143
V.4.3. Retour d'Expérience (REX) des incidents PN	144
V.4.4. Traitement et exploitation des données des incidents PN	146
V.5. Modèle bayésien des incidents aux PN ONCF	147
V.5.1. Les différents types de noeuds	147
V.5.2. Apprentissage de la structure.....	148
V.6. Simulations sur le modèle Bayésien	150
V.6.1. Simulation n°1 : PN gardés 100%.....	150
V.6.2. Simulation n°2 : Signalisation, Viabilité, Visibilité 100%.....	152

V.6.3.Simulation n°3 : Imprudence 0%.....	154
V.6.4.Simulation n°4 : Erreurs humaines 0%	155
V.7. Validation du modèle établi	156
V.8. Conclusions.....	161

Dans ce chapitre, nous allons modéliser le risque collision du système du Passage à Niveau par les Réseaux Bayésiens. Conformément à la méthodologie d'analyse de sûreté de fonctionnement, nous allons réaliser une étude de fonctionnement et de comportement normal du système, ensuite nous étudierons les modes de dysfonctionnement avec identification des événements susceptibles d'affecter le fonctionnement normal du Passage à Niveau.

V.1. Analyse fonctionnelle du système Passage à Niveau

En adoptant une approche générique pour l'analyse fonctionnelle du système Passage à Niveau à la fois selon ses caractéristiques statiques et dynamiques, le PN est considéré comme un croisement entre la voie ferrée et la voie de circulation routière, où les interactions physiques dangereuses doivent être empêchées par les fonctions opérationnelles du PN.

Afin de développer un modèle de comportement complet de l'environnement du PN, nous allons procéder par étapes en effectuant une décomposition en sous systèmes. Le modèle complet est finalement obtenu par l'intégration des modèles élémentaires de comportement.

Nous désignons par environnement du PN, l'ensemble des parties impliquées dans la dynamique du croisement de la ligne ferroviaire avec la voie routière ou piétonnière. Généralement, seuls les PN qui ont de très faibles moments de circulation ne sont pas gardés. Les autres sont équipés de systèmes de protection automatiques qui peuvent comprendre des pédales d'annonces pour détecter l'arrivée du train, des feux de signalisation, des barrières des deux côtés du PN et des alarmes sonores.

Ainsi, en analysant la dynamique du système du Passage à Niveau, on peut distinguer trois composantes:

1. le trafic routier,
2. le trafic ferroviaire,
3. le système de protection du PN.

La fonction principale d'un passage à niveau est de gérer l'interface route/voie ferroviaire d'une manière sûre et rapide. Pour décrire les aspects statiques du PN (Figure1), nous avons identifié quatre types de fonctions opérationnelles de base pour les deux approches de la circulation [SELC08]:

1. Détecter,
2. informer,
3. prévenir,
4. protéger.

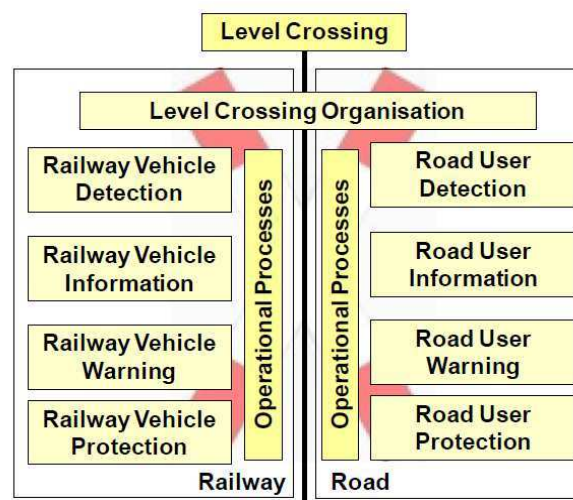


Fig.1 Décomposition fonctionnelle du système PN

Ces fonctions sont décomposées en fonctions plus petites qui interagissent ensemble pour obtenir l'objectif désiré, qui est d'éviter la collision entre le train et l'utilisateur de la route.

Les aspects dynamiques du Passage à Niveau concernent les conditions opérationnelles du trafic routier et les aspects temporels des procédures de sécurité. Outre les aspects statiques et dynamiques, une grande partie des connaissances du système PN concerne les aspects organisationnels qui comprennent également la conception, les lois et les normes en vigueur.

V.2. Analyse de dysfonctionnement du système Passage à Niveau

L'analyse du dysfonctionnement du PN est basée sur l'analyse préliminaire des risques (APR) et sur la représentation graphique de plusieurs

incidents au PN, qui décrivent graphiquement en utilisant l'Arbre de Faute, une chaîne de causalité entre la survenue de l'incident ou l'accident au niveau du PN [Berr07] afin de chercher, le plus en amont possible, les causes de cet événement qui relèvent éventuellement de ces trois composantes :

1. le trafic routier,
2. le trafic ferroviaire,
3. le système de protection du PN.

Le principal avantage de cette méthode est de pouvoir visualiser l'ensemble des combinaisons d'événements élémentaires conduisant à un risque de collision, c'est à dire qu'elle permet d'avoir une vision globale et logique du fonctionnement et du dysfonctionnement du système du PN.

En étudiant les rapports d'accidentologie ainsi que la base de données des incidents des PN de l'ONCF, nous ressortons ci après les causes identifiées qui peuvent conduire à la survenue d'un accident au Passage à Niveau [Bouc11b]:

1. La visibilité du PN (bonne, moyenne ou mauvaise),
2. La viabilité du PN (bonne, moyenne ou mauvaise),
3. Le type de protection du PN (équipé de barrières ou non),
4. Le type du train (marchandises, voyageurs, autres...),
5. La vitesse du train au niveau du croisement,
6. La situation géographique du PN (agglomération, rurale),
7. Le type du véhicule croisant la ligne ferroviaire (poids lourd, deux roues, voiture etc.),
8. La signalisation du PN à la fois du côté de la ligne ferroviaire et la route (conforme, défaillante, etc.),
9. Le comportement de l'utilisateur de la route (infractionniste, correcte, erreur etc.),

Ainsi, le type de l'incident au niveau du Passage à Niveau résulte des conséquences des différents états de ces « événements » (Figure 2).

Dans notre approche d'analyse des risques, nous avons regroupé les différentes causes des incidents qui relèvent des trois composantes du PN dans les événements cités plus haut, afin de simplifier dans un premier temps notre modèle du risque. Le développement de ce modèle dans un souci de finesse peut être réalisé

en décortiquant les nœuds de ces événements en sous nœuds qui seront reliés entre eux par des liens de causalité.

Dans notre modèle, le comportement de l'utilisateur de la route qu'il soit piéton, vélomoteur ou conducteur de véhicule, englobe plusieurs états et peut être infractueux, correct, erreur d'interprétation des signalisations, etc. La signalisation du PN englobe à la fois les alarmes, les panneaux de signalisation routière, les pédales d'alarme pour avertir le conducteur du train, les feux tricolores etc.

Nous rappelons que les interactions entre les différents états de ces événements peuvent conditionner la nature de l'incident au niveau du PN et sa gravité (collision, tamponnement, heurt de barrière etc.) [Bouc12].

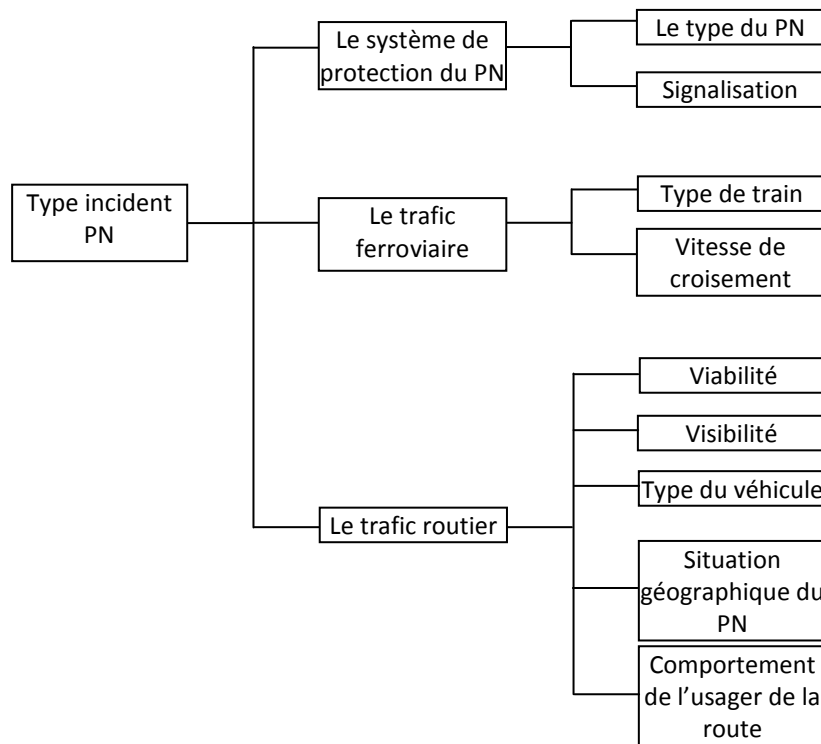


Fig. 2 Système d'évaluation du type d'incident au niveau du PN

L'Arbre de Faute (AF) construit et présenté dans la Figure 3, tient compte du comportement des usagers de la route, qui selon les statistiques sont responsables d'environ 80% des incidents.

Les comportements infractueux ou corrects des usagers de la route dépendent de plusieurs facteurs, qui les encouragent ou les dissuadent à prendre de telles décisions à risque au niveau du croisement. Par exemple, la perception du

risque d'un conducteur impatient peut diminuer, lorsqu'il aperçoit un train s'approcher à faible vitesse d'un croisement de PN non gardé doté d'une bonne viabilité, et comme conséquence, il pourrait être tenté par traverser le croisement avant l'arrivée du train.

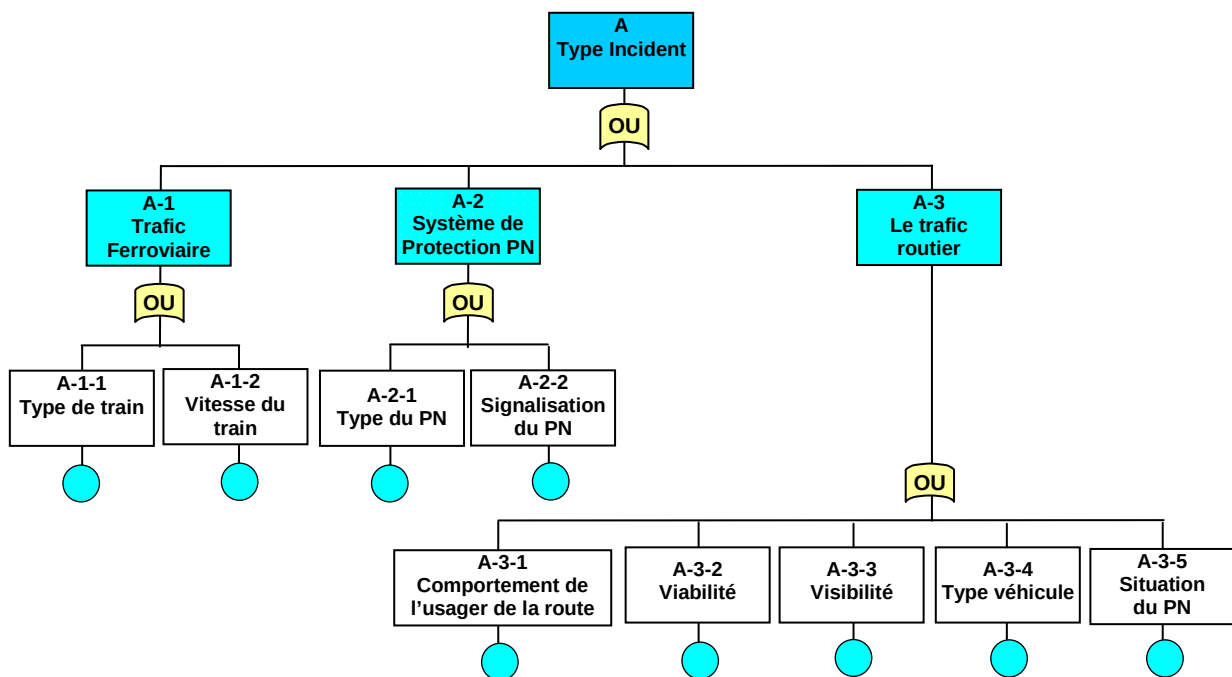


Fig.3 Arbre de Faute du risque collision au PN

V.3. Structure du Réseau Bayésien à partir de l'Arbre de Fautes.

V.3.1. Conditions pour une mutation de l'AF au RB

Plusieurs auteurs [Bobb01][Mont08][Bobb99], dans le cas de quelques études particulières, ont développé des algorithmes pour le passage de la structure des Arbres de Fautes aux Réseaux Bayésiens lorsque les hypothèses de base de la construction de l'Arbre de Faute sont satisfaites:

- Les événements sont binaires (fonctionne / ne fonctionne pas);
- Les événements sont statistiquement indépendants;
- Les relations entre les événements et les causes sont représentées par des portes logiques ET et OU;

- La cible de l'Arbre de Fautes est l'événement indésirable qu'il faut analyser.

L'algorithme de transformation de la structure (AF) à celle du (RB) comprend donc des tâches graphiques et d'autres numériques. Dans la transformation de la structure graphique, les événements primaires, les événements intermédiaires et les événement sommets de l'Arbre de Fautes sont représentés respectivement comme des nœuds racines, des nœuds intermédiaires, et des nœuds terminaux dans la structure du Réseau Bayésien équivalent.

Les nœuds du réseau bayésien équivalent sont connectés de la même manière que leurs correspondants composants dans l'Arbre de Fautes. La figure 4 illustre la procédure simplifiée de transformation du modèle Arbre de Fautes en Réseau Bayésien [Bobb01].

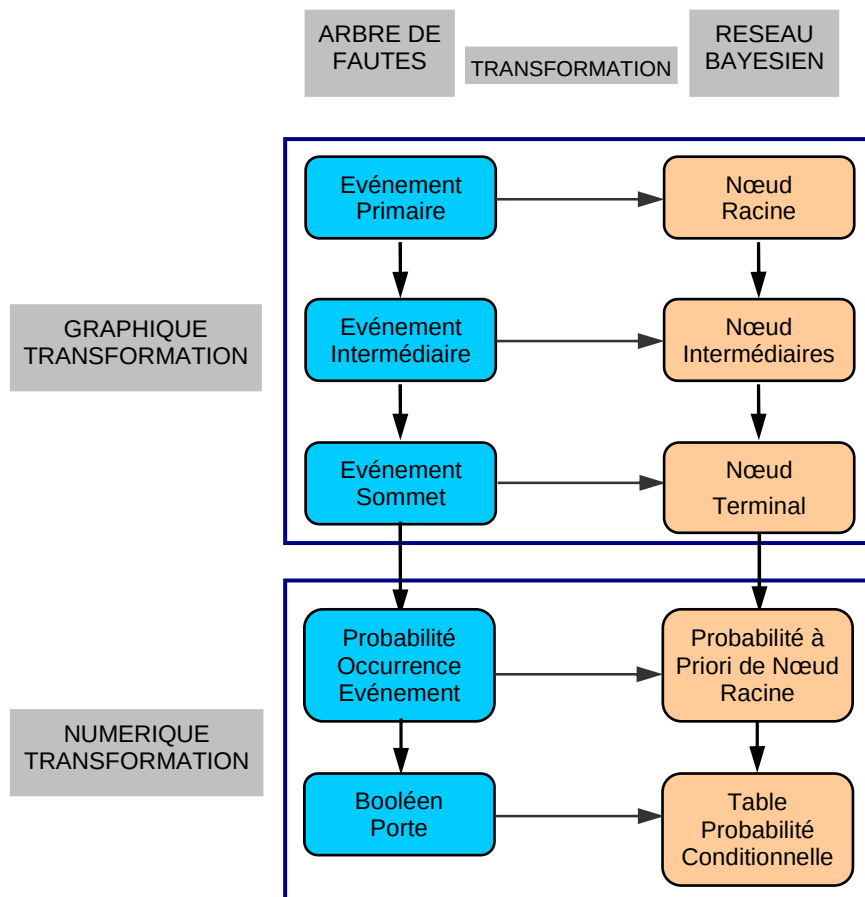


Fig.4 Transformation depuis l'Arbre de Fautes (AF) au Réseau Bayésien (RB)

Dans la transformation numérique, les probabilités d'occurrence des événements primaires sont affectées aux correspondants nœuds racines comme des probabilités a priori. Pour chaque nœud intermédiaire et terminal du graphe, une Table de Probabilité Conditionnelle (TPC) est développée selon le type des portes logiques [Bobb01] [Mont08].

La figure 5 montre la conversion d'une porte logique OU et ET en nœuds équivalents dans le RB. Les nœuds parents A et B sont affectés de probabilités a priori (qui coïncide avec la probabilité des valeurs assignées aux nœuds de base correspondant à l'AF), et au nœud enfant C est attribué sa table de probabilité conditionnelle (TPC).

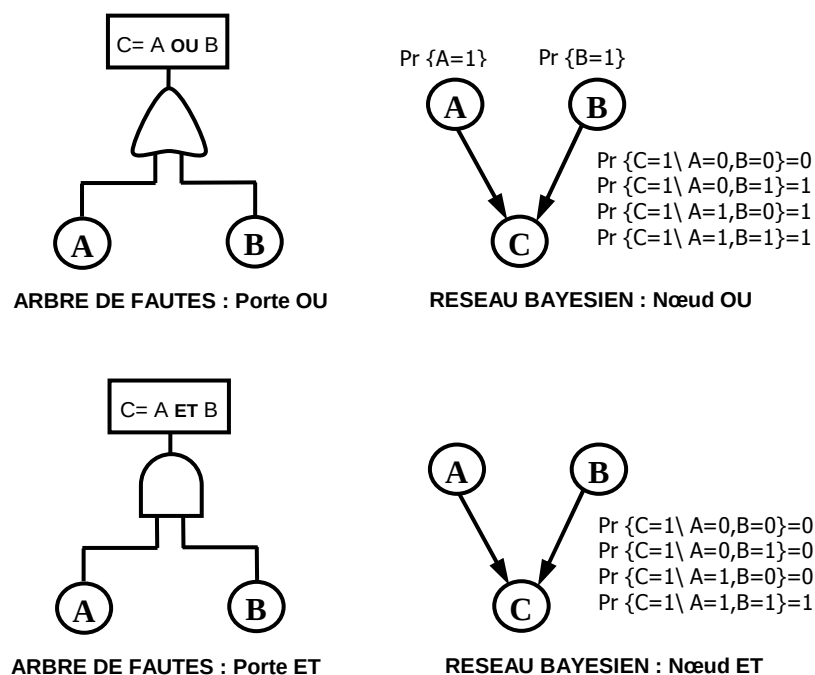


Fig.5 Présentation des portes logiques OU et ET dans l'AF et le RB

V.3.2. Limites constatées de l'AF dans l'analyse du risque collision

Nous présentons ci après quelques principales limites de la méthode de l'Arbre de Fautes (AF) dans la modélisation du risque collision au PN [Bouc12]:

1. les événements intermédiaires doivent être indépendants les uns des autres pour que le calcul de la probabilité d'occurrence du risque collision soit correcte, ce qui est peu envisageable dans notre cas

d'étude des risques au niveau des PN, car ils ne sont pas statistiquement indépendants, étant donné que l'action résultante du comportement humain dépend à la fois de l'utilisateur lui-même, mais aussi de l'état de l'environnement dans lequel il se trouve.

2. la table de probabilité conditionnelle (TPC) ne peut pas être renseignée pour tous les événements d'une façon mathématique car il est difficile de renseigner ces différentes probabilités d'états lorsqu'il s'agit de caractères aléatoires des accidents et de leurs conséquences.
3. l'arbre des fautes (AF) ne rend pas compte de l'aspect temporel des scénarios d'événements conduisant à la collision,
4. cette méthode est binaire, un événement peut soit se produire, soit ne pas se produire. Dans notre cas d'analyse des incidents aux Passages à Niveau, les événements représentés par les nœuds du graphe peuvent avoir plusieurs modalités (exemple du nœud comportement de l'utilisateur qui peut avoir plusieurs états : correcte, accident, imprudence, panne etc.) et chaque modalité peut avoir une incidence sur la nature et la gravité de l'accident.

La survenue d'incidents aux PN est un événement incertain dont les conséquences ne peuvent pas être toutes contrôlées. C'est pourquoi nous avons besoin pour notre modèle d'un outil probabiliste graphique qui peut prévoir et quantifier le risque en relation avec les caractéristiques du PN.

La construction de l'Arbre des Fautes nous a permis d'identifier les événements redoutés (intermédiaires et élémentaires), qui ont servi pour déterminer les nœuds du graphe causal du Réseau Bayésien correspondant. Les inférences dans le graphe seront déterminées par apprentissage Bayésien en utilisant la base de données des événements identifiés.

Le Réseau Bayésien basé sur les probabilités conditionnelles permet cette modélisation, mais permet aussi à la fois de prendre en compte dans le graphe causal, les connaissances à priori d'experts, et de construire et d'exploiter les connaissances provenant des Retours d'EXpériences contenues dans la base de données des incidents antérieurs.

A cet effet, nous allons dans le paragraphe suivant, construire la structure causale du graphe reliant les événements majeurs identifiés, et à partir des données recueillies sur les incidents ONCF, nous utiliseront un algorithme d'apprentissage pour les calculs d'inférence du graphe et l'analyse du risque collision du système PN.

V.4. Base de données des Incidents des PN

Dans cette partie, nous présentons notre démarche d'acquisition des informations et le recueil des connaissances auprès de l'ONCF pour l'analyse des incidents survenus aux Passages à Niveau.

V.4.1. Acquisition de la base de donnée des incidents PN

Les enquêtes techniques menées par la Direction sécurité de l'ONCF à l'issu de chaque incident survenu, ont servi de principale source de statistiques sur les collisions aux Passages à Niveau. Ces investigations ne se sont pas focalisées uniquement sur les scénarios caractérisés par des pertes importantes, vu leur rareté comparés aux incidents de moindre impact. Souvent, un événement négligeable peut s'avérer fort intéressant dans un concours de circonstances légèrement différent.

Par conséquent, l'ONCF a mis en place ces dernières années, des mécanismes de capitalisation et d'investigation sur les accidents et incidents en engageant les responsables des chemins de fer provinciaux, qui sont tenus de transmettre à la Direction centrale de l'ONCF, le rapport de chaque collision ou incident. Ces mécanismes instaurés permettent d'extraire, de formaliser et d'archiver les scénarios de risque de façon à constituer une bibliothèque de données de tous les incidents ferroviaires signalés aux droits des PN, et cela depuis l'année 2000. Chaque incident contenu dans la base de données de l'ONCF entre 2000 et 2009, contient les champs suivants, qui nous ont été fournis sous forme de deux tableaux: les incidents entre 2000 et 2009 et les caractéristiques de chaque Passage à Niveau.

Incidents 2000-2009	Caractéristiques des PN
▪ Année de l'incident, ▪ Date de l'incident, ▪ Heure de l'incident, ▪ N° PN, ▪ Type de train, ▪ Type de véhicule, ▪ Nature d'incident, ▪ Libellé ou commentaire sur l'incident, ▪ Nombre de victimes,	▪ N° du PN, ▪ Km du PN, ▪ Parcours du train, ▪ Catégorie du PN, ▪ Type du PN, ▪ Emplacement du PN, ▪ Date création, ▪ Date suppression, ▪ Nombre d'incidents, ▪ Vitesse du train au croisement du PN,

Tab. 1 : Base de données brute des Incidents PN

V.4.2. Revue des statistiques sur les incidents aux PN

I.4.2.1. Emplacement

Les données contenues dans les rapports d'incidents ou collisions précisent toujours le lieu de l'incident, le numéro du PN, sa situation et la région ou province dont il fait partie. Plus de la moitié des incidents au PN survenus depuis 2000, ont eu lieu dans des zones à forte agglomération.

I.4.2.2. Type et fonction des véhicules en cause

Les statistiques de collision obtenus de l'ONCF indiquent le type de véhicule en cause dans chaque collision. La figure 6 montre la répartition de ces types de véhicules.

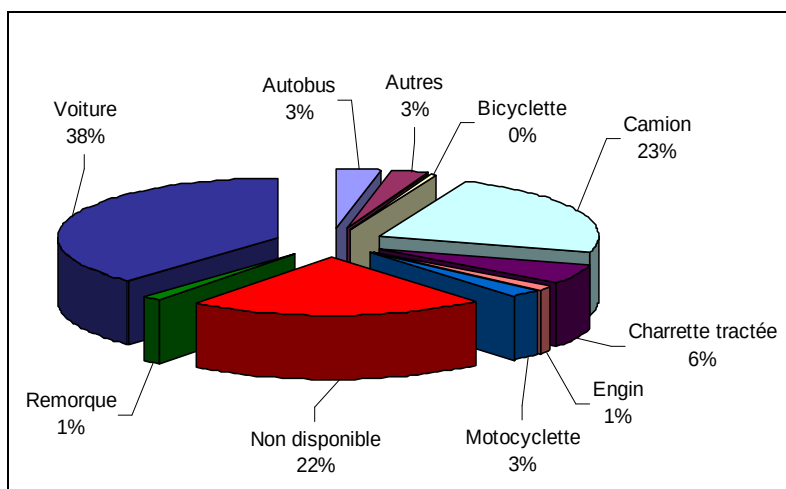


Fig. 6 Répartition des incidents par type de véhicule (2000 à 2008)

Les voitures particulières arrivent en tête des types de véhicules en cause dans les collisions (38 %), suivies des camions (23 %) et des tracteurs et remorques (7%).

Il existe un lien étroit entre le type de véhicule impliqué dans une collision au niveau du Passage à Niveau et la gravité de l'incident. En effet, les dimensions et le poids du véhicule influencent la probabilité que la collision entraîne des pertes de vie et des blessures graves, de même qu'un déraillement. Le type de véhicule qui utilisera le Passage à Niveau doit donc être pris en compte au moment de l'analyse des causes des collisions.

I.4.2.3. Signalisation et systèmes d'avertissement

Quelle était la signalisation aux Passages à Niveau où sont survenues les collisions consignées dans la base de données de l'ONCF ? On le sait car dans les rapports des incidents figurent l'état de la signalisation ainsi que les dispositifs pris en compte pour avertir le conducteur du train à l'approche du PN (pédale, torche, etc.).

I.4.2.4. Statistiques annuelles et conditions temporelles

Les statistiques des collisions de l'ONCF entre 2000 et 2008 affichent une augmentation du nombre annuel de collisions aux Passages à Niveau en 2002, 2005 et 2008. L'évolution reste aléatoire (figure 7), malgré les campagnes de sensibilisation et les actions entreprises annuellement par l'ONCF afin d'améliorer la sécurité au PN.

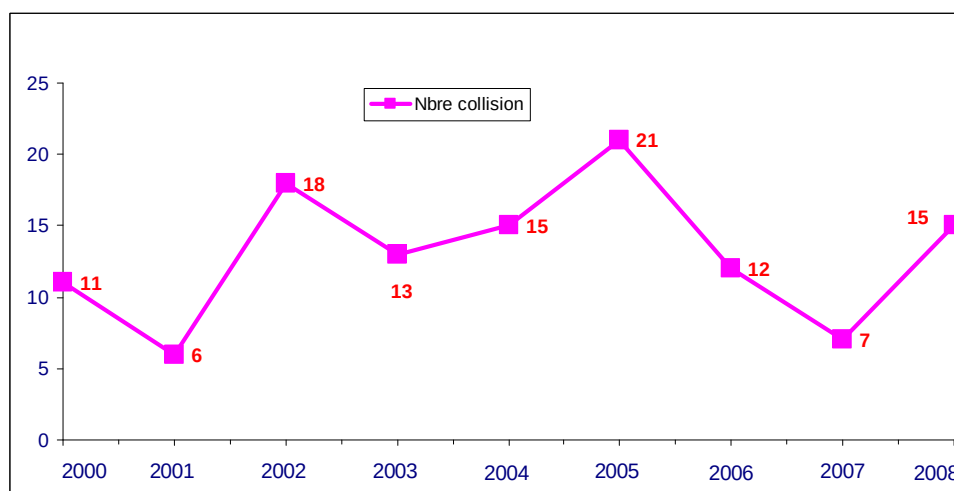


Fig. 7 Collisions annuelles (2000 à 2008)

La Figure 8 montre la répartition mensuelle des accidents de collision au niveau des PN, contenus dans la base de données ONCF.

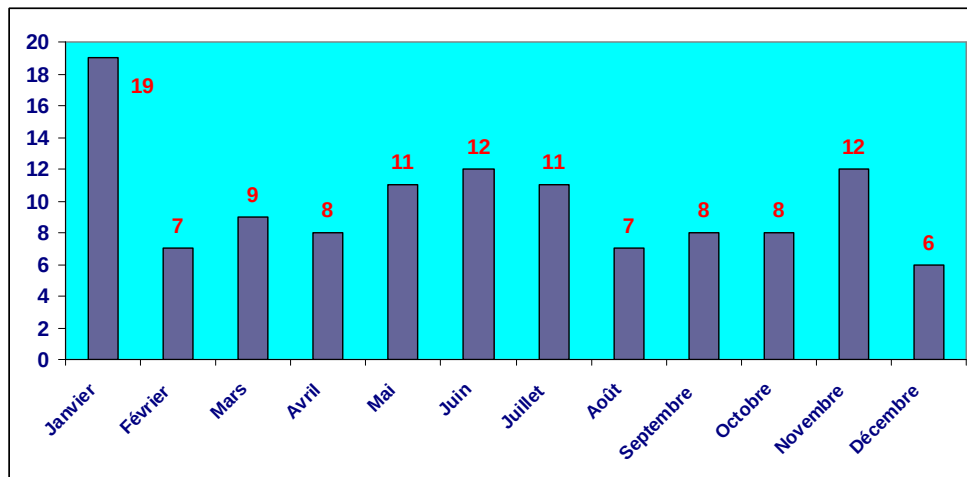


Fig. 8 Répartition des collisions par mois (2000 à 2008)

Les mois où surviennent le plus de collisions aux PN sont novembre, janvier, mai, juin et juillet. Le sommet est atteint en janvier et les chiffres relativement élevés sont enregistrés en novembre. Cela est dû principalement aux mauvaises conditions climatiques de la période d'hiver, qui atténuent la visibilité aux alentours des PN. Quant aux valeurs élevées enregistrées en mai, juin et juillet, elles pourraient être liées à l'intensité de la circulation, car ces trois mois correspondent généralement à la période de pointe pour les passages menant aux campagnes et les zones de loisirs, mais surtout, c'est le passage incontournable pour le transport par poids lourds, des produits agricoles récoltés des fermes vers les villes, ou le passage vers des zones d'extraction de granulats (carrières).

V.4.3. Retour d'Expérience (REX) des incidents PN

Le Retour d'Expérience (REX) est le fait d'exploiter des connaissances historiques archivées des accidents afin de dégager un savoir-faire en matière de management des risques. Généralement, le processus de REX nécessite l'analyse et l'examen des phases suivantes, étapes que nous avons suivi pour notre cas d'étude des accidents des Passages à Niveaux:

1. **Collecte de données** : Elle consiste à recueillir le maximum de données, à s'intéresser à toutes les anomalies rencontrées et à faire appel à diverses

ressources de recherche d'information. La collecte de données concerne les données relatives à l'opérateur humain, à son environnement interne ou externe, au système technique, à l'organisation du travail, aux procédures et aux éventuelles interactions entre ces composantes.

2. **Traitement de données** : cette phase passe par une analyse des circonstances, des faits, des mécanismes et des causes des accidents potentiels. Elle permet de reconstituer la chronologie des faits, d'établir les scénarios à risque et d'évaluer les conséquences. Cette phase ne doit pas se limiter à l'analyse des causes primaires ou apparentes, mais à établir, par exemple, un arbre de causes permettant de mieux identifier les mécanismes générateurs d'accident.
3. **Stockage de données** : Consiste à mémoriser et archiver les données collectées et analysées. Lors de cette phase, une attention particulière est portée aux possibilités d'exploitation réelle de cette base de données.
4. **Exploitation de données** : cette phase consiste à exploiter et interpréter les résultats issus des différentes requêtes d'interrogation de la base de données. L'objectif principal est d'extraire l'événement réellement prédictif, de prendre en considération les cas isolés et de prédire ou d'imaginer les futurs éléments qui vont être insérés dans la base de données comme étant de nouveaux scénarios d'accident ou d'incident. Le paragraphe suivant (V.4.4) explique comment nous avons procédé au traitement et à l'exploitation de données relatives aux accidents enregistrés au niveau des PN.
5. **Proposition de recommandations** : cette phase consiste à définir et identifier les mesures adéquates pour limiter la reproduction d'un scénario à risque. Il s'agit de mieux tirer profit des enseignements de l'expérience acquise pour améliorer la sécurité. Ces recommandations qui peuvent être obtenues suite à l'utilisation des outils ou techniques de modélisation du risque, se traduiront par des actions de maîtrise agissant sur les facteurs humains, la technologie, l'environnement, l'organisation, la réglementation, les procédures, la documentation, etc.

V.4.4. Traitement et exploitation des données des incidents PN

En examinant la base de donnée des incidents, fournie par l'ONCF, nous avons constaté ce qui suit :

1. Les champs de la base de données ne sont pas tous renseignés, surtout entre 2000 et 2006, probablement parce que la Direction de l'ONCF n'a pas instauré un formulaire d'enregistrement des incidents ou accidents en précisant les informations requises pour chaque rapport.
2. Les informations contenues ne font pas apparaître systématiquement les événements causes des incidents, qui relèvent de l'environnement du PN (route, système de protection du PN et voie ferroviaire), et qui sont identifiés dans l'analyse par l'AF dans le paragraphe V.2.
3. La base de données fournie sous forme de deux tableaux (circonstances des incidents et données géographiques des PN) doit être consolidée et complétée, afin de faire apparaître pour chaque incident, tous les renseignements concernant l'environnement du système PN.

Une nouvelle analyse d'une partie des incidents (échantillon de 217 incidents pris entre 2007 et 2008), pour des raisons de volume des informations contenues dans la base de données 2000 à 2009, a été réalisée pour faire ressortir les événements majeurs identifiés et conduisant au risque collision. La méthode consiste en la description graphique au moyen d'un enchaînement causal de chaque incident survenu au niveau du PN et l'identification dans les circonstances enregistrées (commentaires), des événements cités dans le paragraphe V.2 qui ont pour conséquence la survenue de l'évènement redouté (collision).

Nous présenterons ci après un extrait de notre base de données améliorée de 2007 et 2008 (tableau 2) précisant les états des dix événements considérés majeurs au niveau du croisement, à la fois sur les caractéristiques du PN, sur l'utilisateur de la route et sur le trafic ferroviaire[Bouc12b].

Type PN	Situation PN	Vitesse train	Type Train	Type véhicule	Type incident	Signalisation	Visibilité	Viabilité	Circonstances Usagers
Gardé	En agglomération	160	Voyageurs	Camion	obstruction	Conforme	Bonne	Mauvaise	Imprudence
Gardé	En agglomération	140	Marchandise	Camion	Tamponnement	Conforme	Bonne	Bonne	Imprudence
Non gardé	Hors agglomération	100	Voyageurs	Camion	Collision	Conforme	Bonne	Mauvaise	Imprudence
Non gardé	Hors agglomération	100	Voyageurs	Voiture	obstruction	Conforme	Moyenne	Bonne	Imprudence

Tab.2 : Extrait de la nouvelle base de données (217 incidents entre 2007-2008)

Cette base de connaissances servira donc à la modélisation et l'analyse proprement dite du système PN , en adoptant l'approche bayésienne.

V.5. Modèle bayésien des incidents aux PN ONCF

L'utilisation des Réseaux Bayésiens dans l'analyse des événements incertains des incidents au niveau des PN, permet une description qualitative entre les différentes variables représentant les événements (le graphe causal) et la description quantitative des dépendances entre les événements (probabilités conditionnelles).

Pour ce faire, et à partir de la base de données recueillie entre 2007 et 2008 et traitée, nous allons à l'aide du Réseau Bayésien:

- Concevoir la structure du graphe causal entre les différents événements en se basant sur les données REX,
- Modifier la structure et donc les liens de causalités, éventuellement par les experts dans ce domaine,
- Calculer la probabilité de certains états à partir de la probabilité des autres (inférence),
- Estimer les probabilités (par apprentissage),

V.5.1. Les différents types de noeuds

Nous présentons donc dans le tableau 3 les noeuds de notre modèle et leurs modalités (valeurs discrètes) qui constituent le graphe causal [Bouc12b].

Nœud N1 Type PN	Discret	Modalités	Agrégats	Nœud N4 Type incident	Discret	Modalités	Agrégats
		Gardé	Gardé			Accident de personne	Accident de personne
		Non gardé	Non gardé			Autres ...	Autres ...
		Piéton	Piéton			Collision	Collision
Nœud N2 Situation PN	Discret	Modalités	Agrégats	Nœud N5 Signalisations	Discret	Modalités	Agrégats
		En agglomération	En agglomération			Conforme	Conforme
		Hors agglomération	Hors agglomération			Non conforme	Non conforme
Nœud N9 Type véhicule	Discret	Modalités	Agrégats	Nœud N6 Visibilité	Discret	Modalités	Agrégats
		Autobus	Autobus			Bonne	Bonne
		Autres ...	Autres ...			Mauvaise	Mauvaise
		Bicyclette	Bicyclette			Moyenne	Moyenne
		Camion	Camion	Nœud N7 Viabilité	Discret	Modalités	Agrégats
		Charrette tractée	Charrette tractée			Bonne	Bonne
		Motocyclette	Motocyclette			Mauvaise	Mauvaise
		Non disponible	Non disponible			Moyenne	Moyenne
		Remorque	Remorque	Nœud N8 Circonstances Usagers	Discret	Modalités	Agrégats
		Tracteur tracté	Tracteur tracté			Accident	Accident
		Voiture	Voiture			Correct	Correct
						Imprudence	Imprudence
						Panne	Panne

Tab. 3: Caractéristiques des nœuds du Réseau Bayésien

V.5.2. Apprentissage de la structure

Nous présentons dans la figure 9, le modèle construit par apprentissage par découverte d'association selon l'arbre de recouvrement maximale (MWST). Les données introduites sont celles des 217 incidents enregistrés entre 2007 et 2008.

Ce premier modèle de représentation a fourni une vision synthétique du système PN observé, et il a permis d'aller vers des discussions avec les personnes compétentes sur ce domaine précis, afin de collecter leurs avis.

Les liens de causalités entre les différents nœuds du graphe construit sont analysés, et une modification de certains liens a été apportée pour tenir compte à la fois des avis des experts dans ce domaine, et des résultats d'analyses effectués sur les causalités des incidents réellement survenus, qui ont montré l'existence de certaines dépendances entre des événements. Le nouveau graphe obtenu est montré dans la figure 10. Les différentes probabilités des différents nœuds estimées par apprentissage sont illustrées dans la figure 11.

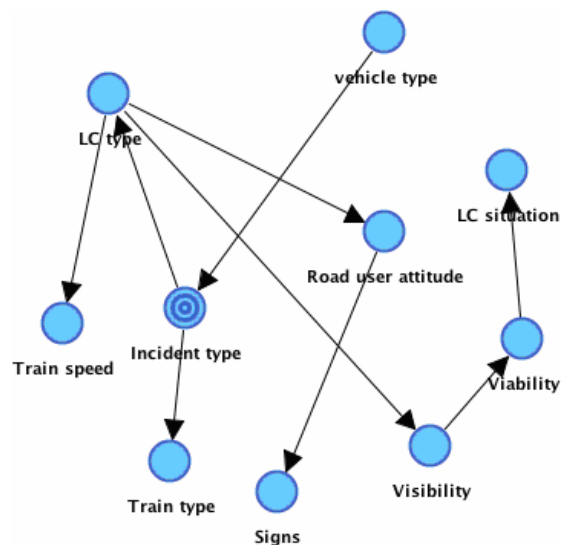


Fig.9 Structure par apprentissage du Réseau Bayésien des incidents PN

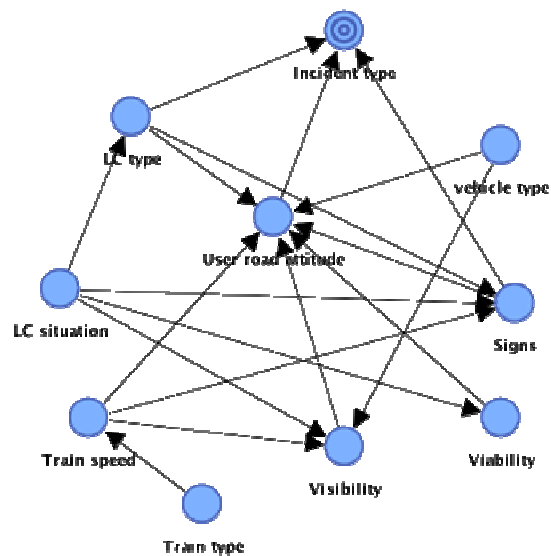
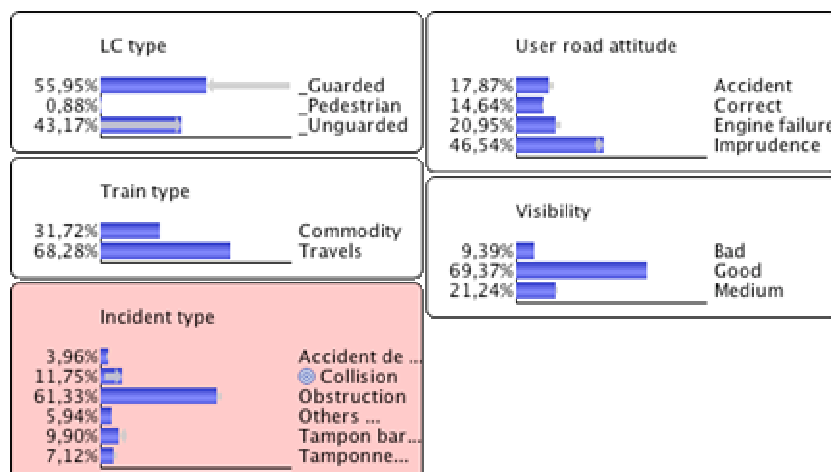


Fig.10 Réaffectation des associations du Réseau Bayésien des incidents PN



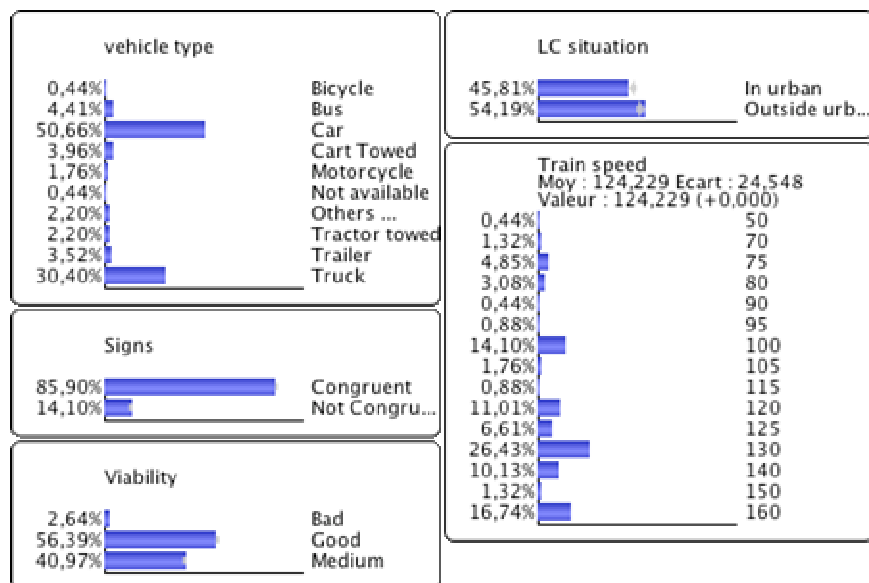


Fig.11 Résultats de l'apprentissage du Réseau Bayésien des incidents PN ONCF (217 incidents)

V.6. Simulations sur le modèle Bayésien

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre I, la sûreté de fonctionnement rend compte de l'aptitude du système à remplir sa mission et à résister aux défaillances matérielles, logicielles et humaines ainsi qu'aux agressions de son environnement. En cela, elle caractérise les performances du système. Dans ce contexte, nous allons procéder dans les figures qui suivent à des simulations sur les états de certains nœuds constituant le graphe de ce Réseau Bayésien modélisant le risque collision au niveau du PN, afin de calculer par inférence les différentes probabilités d'occurrence des incidents et leurs types.

Ces simulations nous permettront de tester la pertinence et l'efficacité de quelques actions sécurité envisageables pour réduire le risque collision, et ainsi permettre de quantifier la performance de ce système à répondre aux objectifs fixés en matière de sécurité.

V.6.1. Simulation n°1 : PN gardés 100%

Nous allons définir, en particulier, le nœud incident comme nœud cible de notre analyse, et grâce à la possibilité qu'offre notre modèle Bayésien, nous simulerons l'impact de rendre tous les PN protégés par des barrières sur l'apparition

d'accidents (Figure 12). Nous constatons donc suite à cette simulation de l'ensemble des PN gardés (Figure 13), que les incidents diminueront de **217** à **127**, soit une réduction considérable de **41%**.

Toutefois, nous constatons qu'il est encore prématuré d'affirmer que les incidents disparaîtront si on équipe tous les PN de barrières et de gardiens. En effet, les erreurs humaines ainsi que les pannes inopinées des véhicules lors du croisement restent toujours un facteur déterminant.

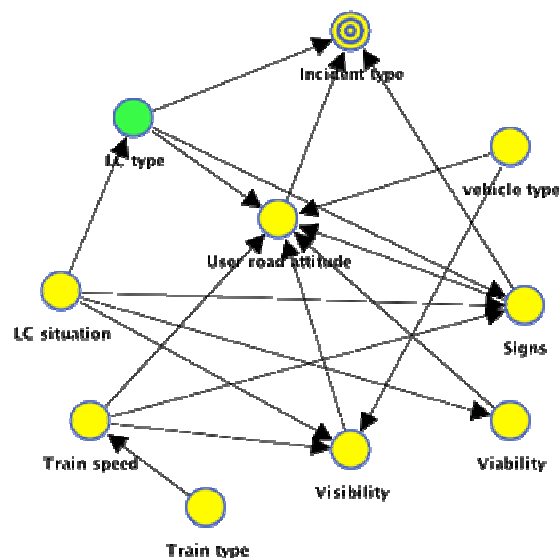
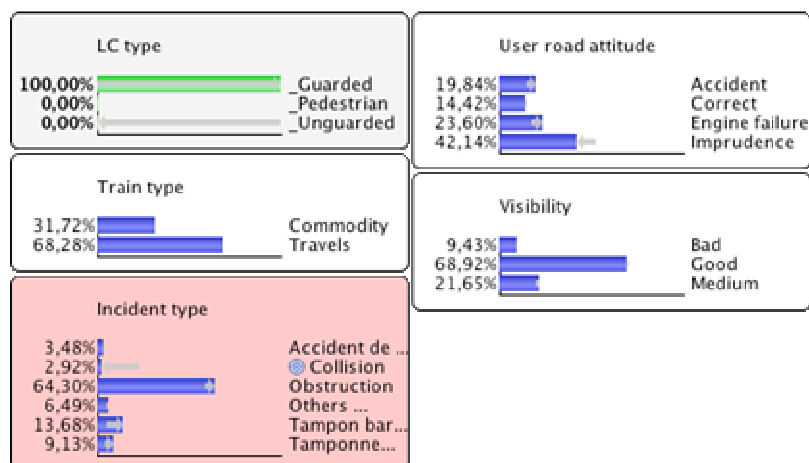


Fig.12 Définition du nœud cible "Type Incidents» et simulation PN gardés 100%



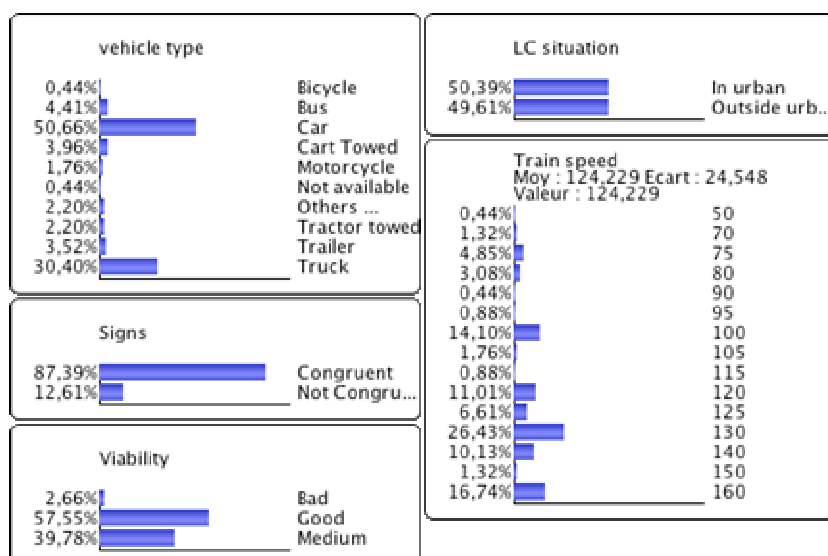


Fig. 13 Estimation des incidents PN (127) suite à la simulation des PN gardés 100%

Dans la figure 13 ci-dessus, nous constatons d'après les calculs d'inférence du graphe suite à cette simulation, que sur les 127 incidents estimés, **42%** sont causés par l'imprudence des usagers, et **23%** sont dus aux pannes des véhicules dans les zones de croisements.

De ce fait, il s'avère que le modèle bayésien construit constitue également un outil d'aide à la décision, qui permettrait de cibler les actions pertinentes, en vue d'atteindre les objectifs définis par l'ONCF en matière de réduction des risques.

Il permet aussi une gestion efficace des budgets alloués à la maîtrise des risques ferroviaires, en particulier dans notre étude de cas qui traite les incidents au niveau des croisements des Passages à Niveau.

V.6.2. Simulation n°2 : Imprudence 0%, Signalisation, Viabilité et Visibilité 100%

Dans la simulation suivante, nous allons forcer les états des nœuds suivants: signalisation conforme 100%, viabilité bonne 100%, visibilité bonne 100% et imprudence 0% et nous constatons d'après les calculs d'inférence au niveau de notre modèle, qu'il y a une nette diminution de la sinistralité au niveau des PN qui passe à **17 incidents**, soit une réduction de **92%**.

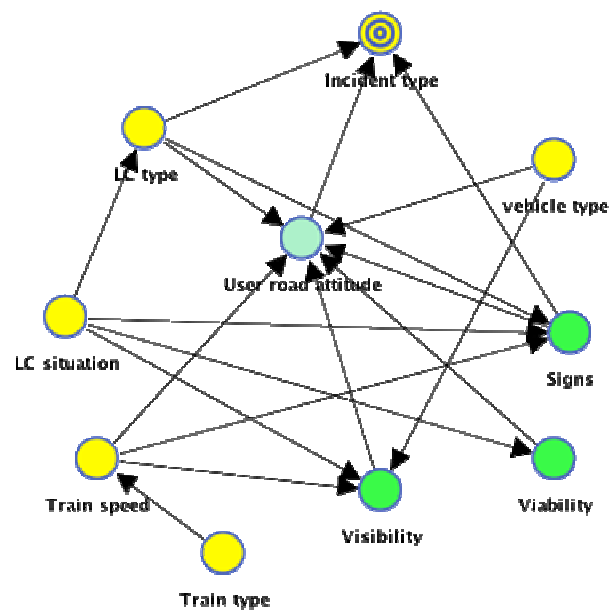
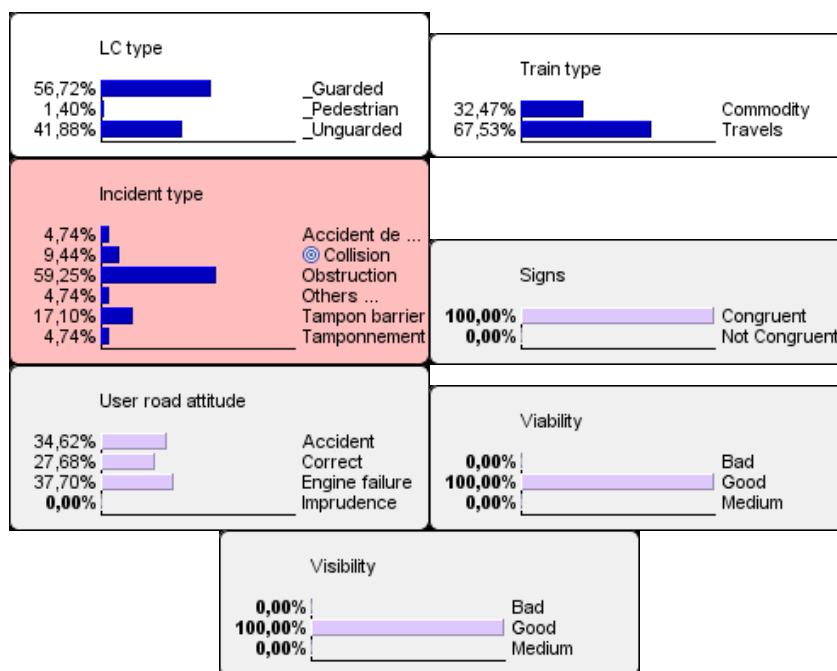


Fig. 14 Nœuds signalisation conforme 100%, viabilité bonne 100%, visibilité bonne 100% et imprudence 0%



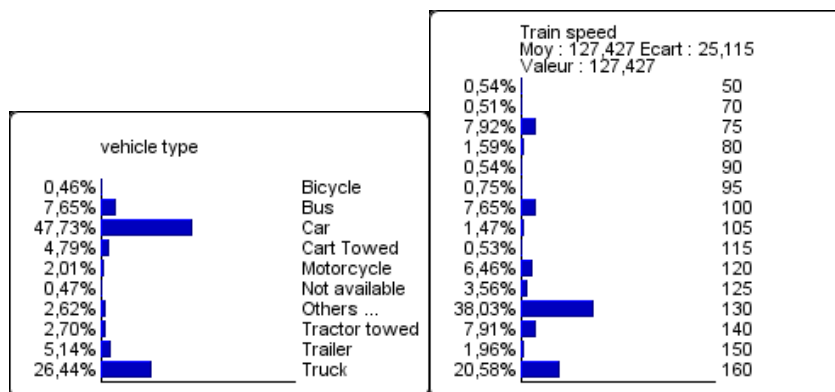


Fig15. Résultat de l'inférence du graphe causal après simulation signalisation conforme 100%, viabilité bonne 100%, visibilité bonne 100% et imprudence 0%

V.6.3. Simulation n°3 : Imprudence 0%

Dans la présente simulation, nous allons considérer que les actes non responsables des usagers de la route sont de 0% et nous constatons, d'après les calculs d'inférence de notre modèle, qu'il y a une diminution considérable de la sinistralité au niveau des PN qui passe à **123** incidents, soit une réduction de **45%**.

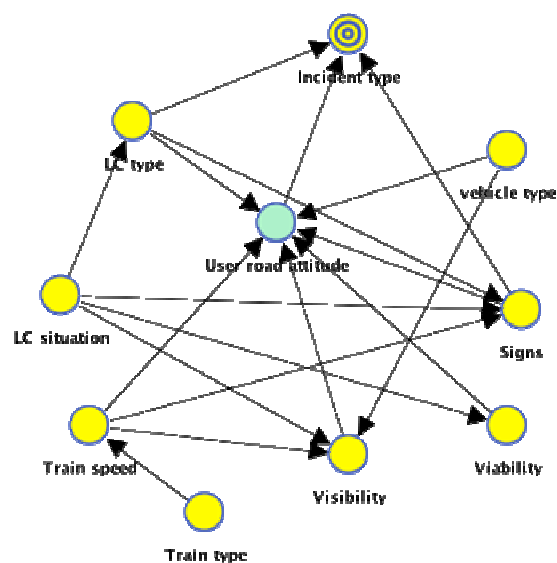


Fig. 16 Résultats de l'inférence du graphe causal après simulation de l'imprudence 0%

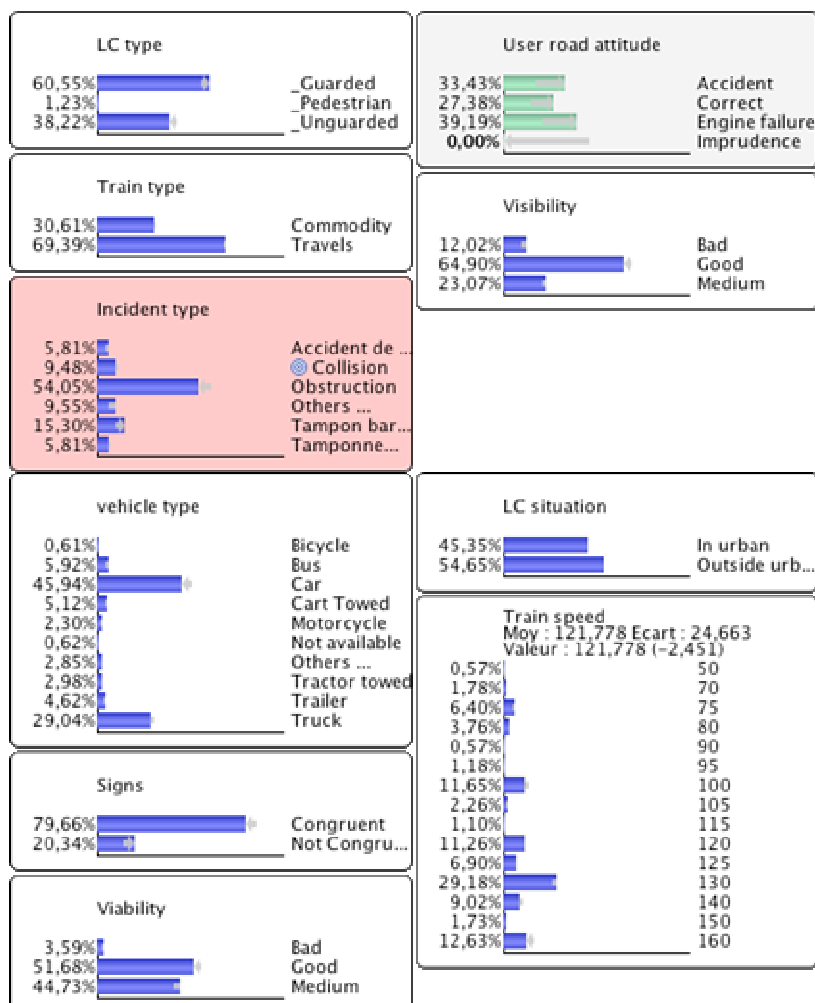


Fig. 17 Résultats de l'inférence du graphe causal après simulation de l'imprudence 0%

Nous constatons aussi que le risque collision passe de 11,75% à **9,48%** et que la signalisation doit être conforme à 79%.

V.6.4. Simulation n°4 : Erreurs humaines 0%

Dans la simulation suivante, nous allons considérer que les actes relevant des facteurs humains des usagers de la route, ainsi que les pannes et accidents des véhicules à l'intérieur des croisements sont de 0% et nous constatons d'après les calculs d'inférence du modèle de risque, qu'il y a une nette diminution de la sinistralité au niveau des PN qui passe à **33** incident, soit une réduction de **85%**. Cette valeur confirme les statistiques des causes des accidents des Passages à Niveau qui estiment entre **80** et **90%**, les responsabilités incombant aux facteurs humains.

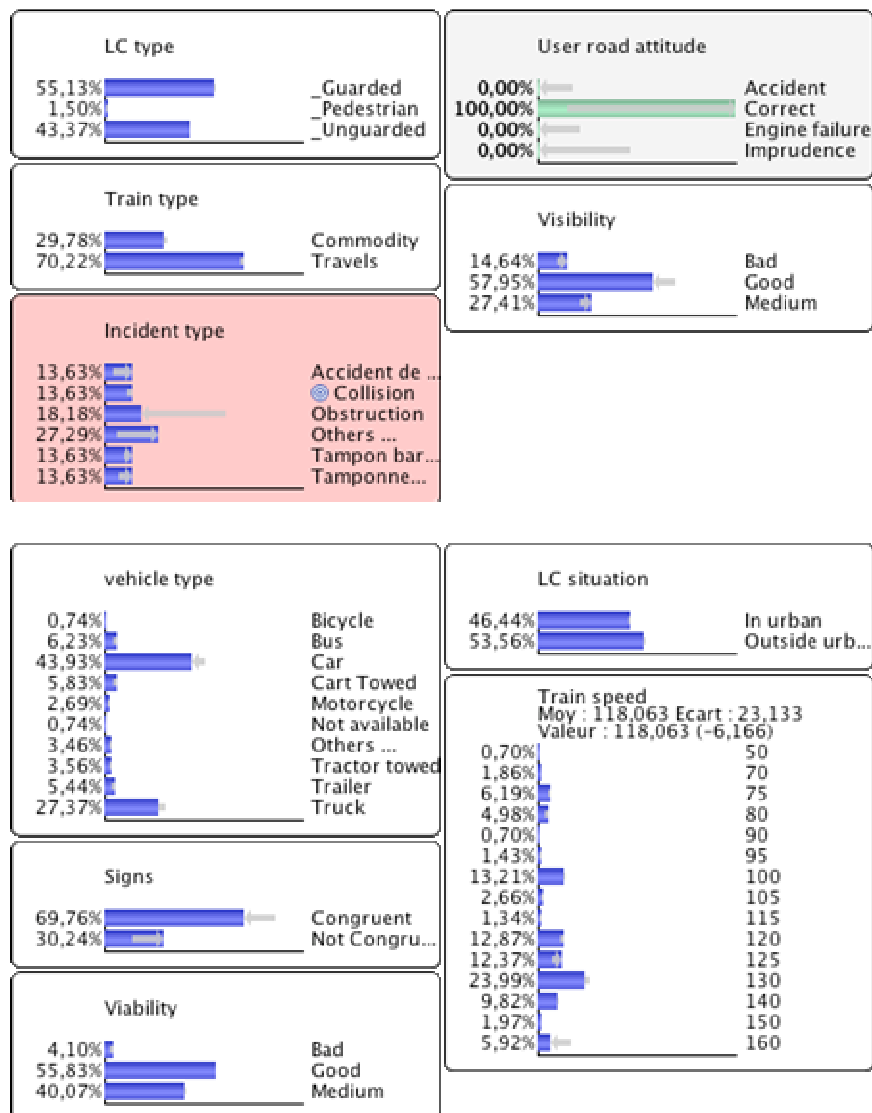


Fig. 18 Résultats de l'inférence du graphe causal après simulation de l'imprudence 0%, accident 0%, et pannes 0%

V.7. Validation du modèle établi

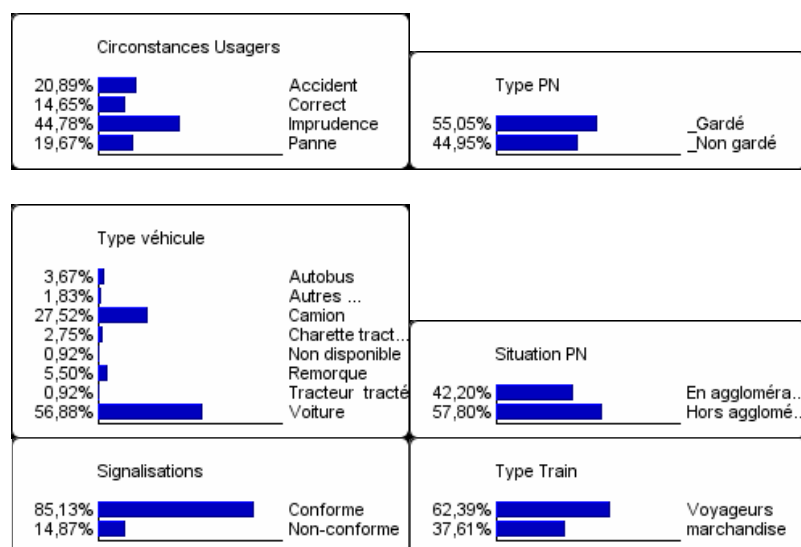
La technique des Réseaux Bayésiens n'a pas immédiatement intégré l'ensemble de la problématique d'apprentissage. Aujourd'hui, les recherches sur ces algorithmes ignorent le problème de la capacité de généralisation d'un modèle, et les précautions que cela implique au moment de sa construction [Naim04].

Notre modèle a été établi suite à une technique d'apprentissage réduisant l'espace des recherches aux arbres. Il a servi comme premier modèle aux experts qui l'ont ensuite modifié pour intégrer ou supprimer certaines relations de causalité

entre les nœuds du graphe. A cet effet, nous proposons dans la suite de ce paragraphe, de tester le degré de confiance de ce modèle à travers une technique de simulation.

Pour cela, nous allons utiliser les informations contenues dans la base de données 2008 pour tester le degré de confiance des simulations effectuées sur le réseau de la base de données 2007, en particulier sur le nœud type de collision. Pour ce faire, nous allons procéder par ces étapes suivantes:

- Séparer la base de données des 227 accidents utilisée dans notre étude en deux : la base de données de 2007 constituée de 109 accidents et celle de 2008 constituée de 118 accidents.
- Etablir pour chaque base de données 2007 et 2008, un modèle de risque basé sur le Réseau Bayésien RB 2007 et RB 2008 ayant la même structure que celui construit à partir de la base de données 2007 et 2008,
- Faire les calculs d'inférences de ces deux réseaux RB 2007 et RB 2008 en utilisant la même technique d'apprentissage des paramètres à partir des deux bases de données complètes 2007 et 2008. Cette étape nous permettra d'avoir les valeurs de probabilités des différents nœuds du modèle RB des accidents 2007 et du modèle RB des accidents 2008 (figures 19 et 20),



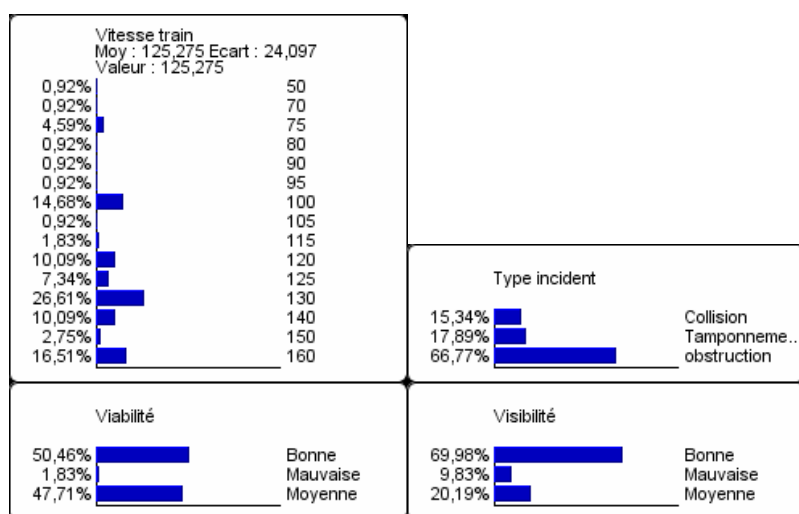


Fig. 19 Résultats de l'inférence du graphe causal du modèle RB 2007

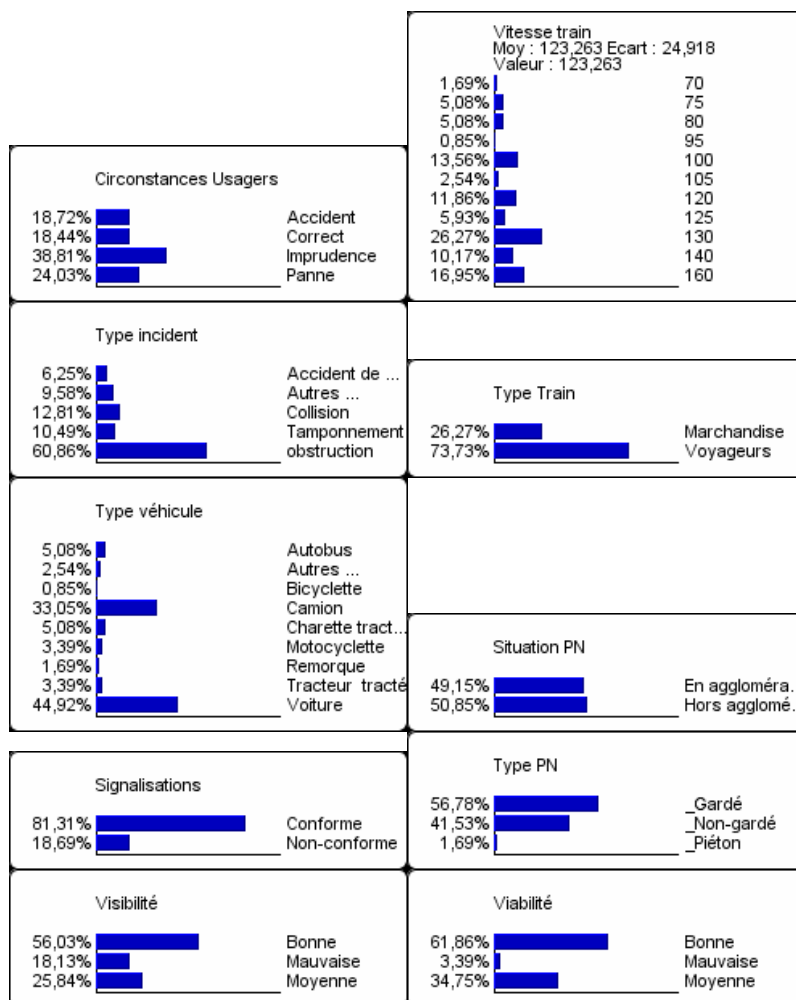


Fig. 20 Résultats de l'inférence du graphe causal modèle RB 2008

Dans le modèle des accidents RB 2007, nous allons modifier les probabilités des états de tous les nœuds (à l'exception du nœud cible 'type d'incident') pour les rendre égales aux mêmes valeurs approximatives qui ont été obtenues à partir du modèle des accidents 2008, et qui sont estimées par inférence dans le graphe causal à partir des accidents réels enregistrés en 2008, comme indiqué dans la figure 21.

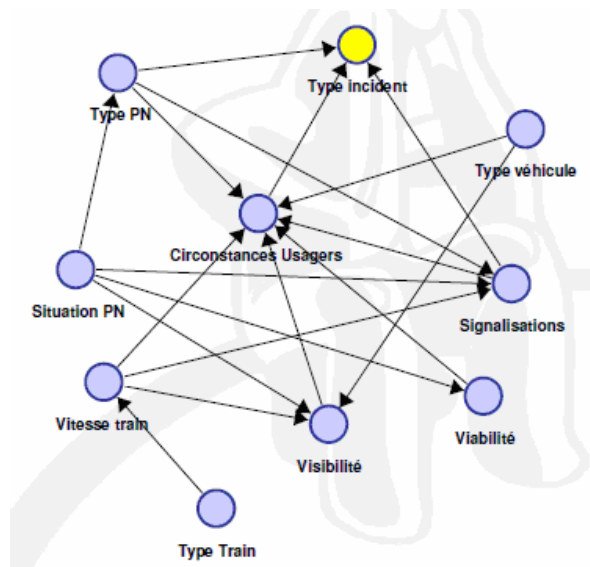
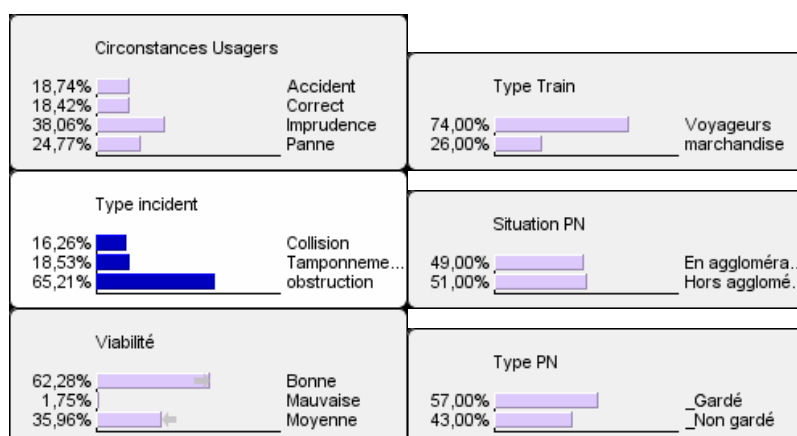


Fig. 21 Reproduction dans le modèle RB 2007 des mêmes états des modalités des nœuds du modèle RB (2008)

Les probabilités des différentes modalités du nœud 'type d'incident' (Figure 22) sont calculées automatiquement par inférence du RB des accidents 2007. Ces valeurs obtenues seront comparées aux valeurs réelles obtenues par inférence du RB 2008 à partir de données des accidents enregistrés en 2008.



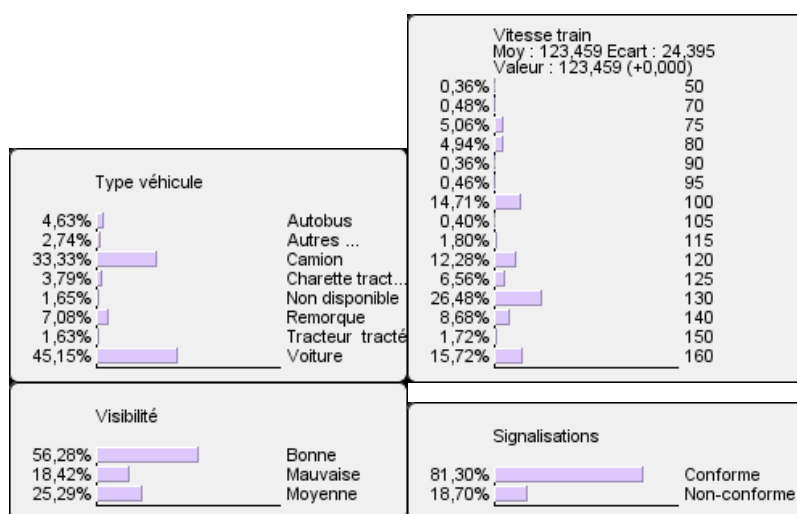


Fig. 22 Simulation des modalités du nœud 'type incident' dans le modèle RB (2007)

Le tableau ci après récapitule les résultats obtenus pour les différentes modalités du nœud 'type d'incident':

Nœud 'type d'incident'		
Modalité	Valeur obtenue suite simulation avec le modèle des accidents 2007	Valeur obtenue suite à l'inférence du modèle RB 2008 à partir de la base de données des accidents 2008
Collision	16,26%	12,81%
Tamponnement	18,53%	10,49%
Obstruction	65,21%	60,86
Accident de personne (*)	-	6,25
Autres (*)	-	9,58%

(*) : Modalité non présente dans la base de donnée 2007.

Tab. 4: Valeurs simulées et calculées des probabilités des modalités 'type d'incident' dans les modèles RB 2007 et RB 2008

On constate que les valeurs des modalités du nœud 'type incident', calculées par simulation se rapprochent des valeurs calculées suite à l'inférence du modèle à partir de la base de données 2008. L'écart constaté peut être justifié par le fait que toutes les états des modalités du nœud 'type incident' ne figurent pas dans la base de données 2007, et qu'il faudrait une taille plus grande de données, afin

que la simulation effectuée par extraction des connaissances soit encore plus précise.

Cette simulation nous a permis donc de valider notre modèle de risques des accidents au niveau des PN de l'ONCF, dont la structure et les paramètres ont été extraits à partir des connaissances contenues dans la base de données des accidents 2007 et 2008 à un seuil que nous avons jugé acceptable. En effet, nous avons constaté que les résultats obtenus des modalités du nœud « type d'incident » en simulant les états des autres nœuds, constituant le système PN, aux valeurs réelles de la base de données 2008, se rapprochent des valeurs réelles des types d'accidents survenus en 2008, compte tenu des effets aléatoires des accidents et de leurs conséquences.

V.8. Conclusions

Les simulations réalisées par notre modèle d'évaluation du risque au niveau du PN, en prenant différents états des nœuds constituant le graphe causal, a pour objectif de proposer aux gestionnaires de sécurité routière et ferroviaire, un outil de décision sur les actions sécurité à entreprendre à la fois sur l'infrastructure du PN, la signalisation ferroviaire et routière, ainsi que les usagers de la route.

Certes, ces actions ne sont pas génériques et doivent être adaptées selon la configuration et caractéristiques de chaque PN.

Nous donnons à titre d'exemple ci après, quelques solutions non exhaustives [SETRA08] pour améliorer la sécurité aux Passages à Niveau en agissant sur l'infrastructure pour les risques suivants:

- La vitesse de franchissement des véhicules au niveau du croisement incompatible avec la présence du PN dans l'environnement considéré : dans ce cas, il est nécessaire de mettre en œuvre des dispositifs ralentisseurs tels que les bandes rugueuses ou des panneaux d'alerte de vitesse limite.
- Le déport latéral : lors de l'allumage des signaux d'arrêt, une manœuvre de déport latéral afin de franchir le PN en phase de fermeture, pouvant aller jusqu'au passage en chicane (PN fermé) peut être entamée par l'utilisateur de la route. En contre mesure, il faut contraindre les usagers sur leur voie de

circulation par la mise en œuvre d'îlots bordurés sur une distance suffisamment longue.

- Le manque de visibilité du PN due au type d'aménagement dans la zone du PN ou des éléments masquant (végétation, publicité, PN situé après un sommet de côte ou virage, une signalisation verticale avancée insuffisante, un profil en travers inadapté au PN trop large ou étroit) : comme contre mesures, il faut supprimer les éléments constituant l'entrave visuelle aux abords du PN, mettre en conformité les éléments de signalisation routière, renforcer la perception des équipements constituant le PN.
- La Viabilité du PN : une mauvaise géométrie du PN (dos d'âne dus au fait que la voie ferrée et la route ne sont pas dans le même plan, PN précédé par des virages de faible rayon dans les deux sens de circulation ou une dégradation avancée du corps de chaussée du croisement peuvent entraîner des difficultés de franchissement. Pour ce type de défaut identifié, il n'existe pas de solutions génériques mais des travaux d'aménagement propres à chaque PN s'avèrent nécessaires.
- La remontée de file : peut engendrer un risque de collision si le véhicule s'arrête sur la zone de croisement du PN et n'a pas de possibilité de se dégager. Ce cas est généralement observé si le PN est situé à proximité d'un croisement avec une route lors des périodes de pointe de trafics routier et ferroviaire. Des solutions comme interdire les tourne à gauche à proximité immédiate du PN, modifier les priorités par des panneaux ou feux, coordonner les feux tricolores à celui du PN, etc. sont à envisager.

Chapitre VI

Le Modèle Bayésien d'évaluation du risque accident au niveau du TRAMWAY Rabat/Salé

Sommaire

VI.1. Présentation du Tramway RABAT/SALE	165
VI.1.1.Introduction.....	165
VI.1.2.Le réseau du Tramway de Rabat/Salé	166
VI.1.2.1.Les lignes du Tramway.....	167
VI.1.2.2.Les stations du Tramway	168
VI.1.2.3.L'aménagement de la plateforme du Tramway	169
VI.1.2.4.Qualité urbaine et environnementale du Tramway.	169
VI.2. Analyse des accidents du Tramway	170
VI.2.1.Les champs de la base de données.....	171
VI.2.2.Analyse des statistiques des accidents du Tramway	173
VI.2.2.1.Emplacements.....	173
VI.2.2.2.Type des tiers en cause	175
VI.2.2.3.Statistiques mensuelles des accidents.....	175
VI.2.2.4.Gravité des accidents survenus.....	176
VI.2.2.5.Répartition des accidents par lignes.....	176
VI.2.2.6.Répartition des accidents par type de voie	177
VI.2.2.7.Répartition des accidents par heure de journée	177

VI.2.3.Revue et exploitation de la base de donnée Tramway	178
VI.3. Modèle bayésien des accidents Tramway	180
VI.3.1.Les différents types de noeuds.....	180
VI.3.2.Apprentissage de la structure	181
VI.4. Simulations sur le modèle Bayésien	183
VI.4.1.Simulation n°1 : Evitabilité des accidents par le conducteur du Tramway améliorée à 80%	183
VI.4.2.Simulation n°2 : Respect du code de la route 100% par les tiers	185
VI.4.3.Simulation n°3 : Visibilité bonne à 100%.....	186
VI.4.4.Simulation n°4 : Evitabilité des accidents 80% et 50% des accidents de types corporel 1 et matériel 1.....	187
VI.5. Conclusion.....	189

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à l'analyse des accidents d'un autre système ferroviaire qui est le Tramway, en adoptant l'approche bayésienne utilisée dans l'analyse des risques du Passages à Niveau décrite dans le chapitre V, mais cette fois ci en tenant compte des particularités propres à ce mode de transport, relatives à son environnement et à son mode d'exploitation. En effet, à la différence d'un train, le Tramway est un véhicule urbain, qui circule au milieu de la circulation automobile et piétonne, et donc on ne peut restreindre notre analyse à une zone de croisement avec les usagers de la route, à l'instar des Passages à Niveau. Cependant, par son caractère guidé, la conception du système Tramway reprend le principe de la signalisation ferroviaire dans les zones de manoeuvre et dans certaines configurations où le conducteur du Tramway n'a pas une visibilité suffisante.

VI.1. Présentation du Tramway RABAT/SALE

VI.1.1. Introduction

L'agglomération de Rabat-Salé a connu un développement important de sa population et par conséquent de sa demande de transports. De 1,318 million d'habitants au dernier recensement de 2004, elle a atteint plus de 2 millions d'habitants en 2010.

Cette évolution démographique a induit des besoins en déplacements importants, nécessitant une réorganisation des moyens de transports et de communication de manière à optimiser la circulation au sein de l'agglomération de Rabat/Salé, tout en préservant la qualité de vie et de l'environnement, et en favorisant le développement de l'activité économique de la région.

Le projet de Tramway prolonge des études antérieures réalisées en 1982 et 2003 sur la faisabilité de lignes de transport en commun en site propre dans l'agglomération de Rabat-Salé. Ces études avaient conclu à l'opportunité de mettre en œuvre un système de Tramway sur rails.

Dans ce cadre, et sur la base des études de conception menées en 2005 et 2006, l'agence pour l'aménagement de la vallée du BOUREGREG, qui est un établissement public à autonomie financière, a été mandatée et chargée de réaliser le projet de

Tramway en partenariat avec les communes de Rabat/Salé. Les travaux de réalisation de deux lignes de Tramway pour l'agglomération ont démarré en février 2007 avec un objectif de mise en service fixé en début 2011.

Le coût du projet est estimé à 380 millions d'Euros (matériel roulant, infrastructure, équipements, etc.) et a pour objectif à terme de transporter au minimum 60 millions de voyageurs par an en pleine exploitation.

La répartition de ce budget en fonction des études et phases de réalisations est illustrée dans la figure 1 ci après [Tram08]:

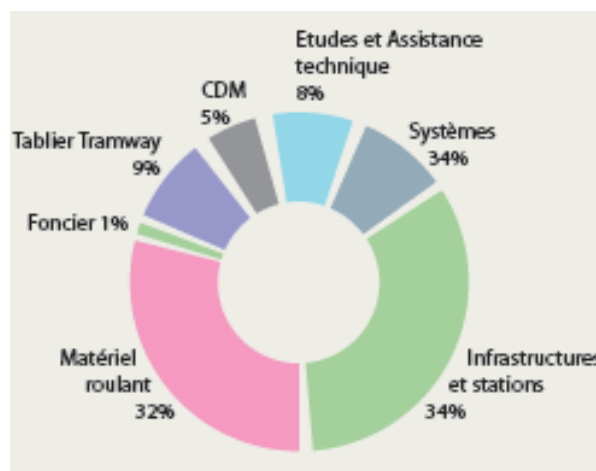


Fig. 1 Répartition du budget de lancement du Tramway Rabat/Salé

VI.1.2. Le réseau du Tramway de Rabat/Salé

Le tracé du réseau du Tramway a été conçu pour répondre à un double objectif:

- Répondre à la demande en transport dans l'agglomération et contribuer à la résolution des problèmes de fluidité du trafic, grâce à ce mode de transport rapide, économique, confortable et accessible aux personnes à mobilité réduite,
- Améliorer la vie communautaire puisque le Tramway de Rabat Salé va assurer une meilleure desserte des principaux équipements publics de l'agglomération (hôpitaux, facultés, centre commerciaux, pôles administratifs, gares, etc.)

VI.1.2.1. Les lignes du Tramway

Le réseau de Tramway comporte deux lignes d'une longueur totale d'environ **19,5 km** [Tram08]:

- **La ligne 1 (L1)** dite «ligne structurante de l'agglomération» qui s'étend de Hay Karima à Salé au quartier de l'Agdal, avec un tracé au centre ville par l'Avenue Al Alaouiyyine, relie ainsi les pôles attracteurs majeurs de l'agglomération .
- **La ligne 2 (L2)** dessert les quartiers denses de l'Océan, Yacoub Al Mansour et le quartier Bettana à Salé.
- **Un Tronc Commun (TC)** est prévu pour la traversée du fleuve Bouregreg au niveau du nouveau pont Moulay Al Hassan, allant de la place Cardonna à Salé à la place Al Joulane à Rabat.

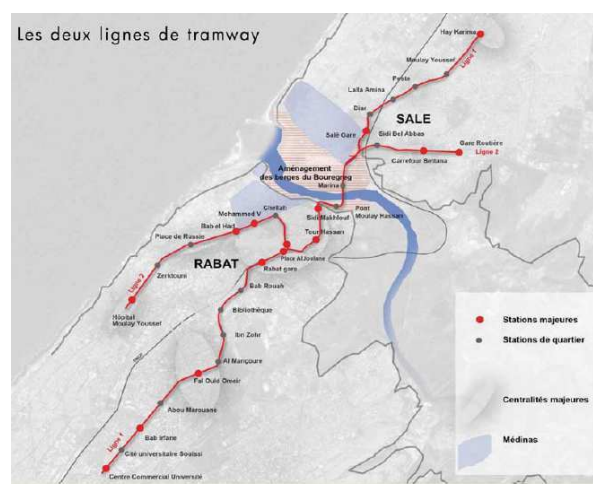


Fig. 2 Répartition géographique des deux lignes du Tramway Rabat/Salé.



Photo.1 Tramway Rabat/Salé à la place AL JOULANE

VI.1.2.2. Les stations du Tramway

L'insertion urbaine du Tramway est réalisée par l'aménagement de 31 stations d'une longueur de 60 m sur l'ensemble du réseau des lignes L1 et L2 [Tram08]. Placées tous les 500 mètres environ, ces stations permettent une bonne répartition des accès et une desserte optimale des principaux équipements publics de l'agglomération : hôpitaux, universités, ministères, gares routières et ferroviaires.

Ces stations sont équipées de barrières fixes de protection des voyageurs contre la circulation routière, de bancs, d'abris et d'arbres afin de rendre le passage en station plus confortable. La fréquence de passage des rames, évaluée à 8 minutes dans chaque sens sur les 2 lignes et à 4 minutes sur le tronç commun, permettra une fluidité optimale du trafic.



Fig. 3 Plan des deux lignes L1 et L2 du Tramway Rabat/Salé.

L'ensemble des caractéristiques du réseau de Tramway Rabat/Salé est résumé dans la figure 4 ci après [Tram08]:

	Ligne 1	Ligne 2	Tronc commun
Longueur	11,7 Km	7,8 Km	2,9 Km
Stations	22	14	5
Fréquence	8 min	8 min	4 min
Temps de parcours	36 min	25 min	
Vitesse commerciale	19.5 Km /h	19 Km/h	
Capacité offerte	4 050	4050	8100 voy/h/sens
Amplitude du service	de 06h00 à 23h00		
Nombre de voyageurs/j	180 000		
Matériel roulant	22 rames de 65 m exploitées en rames doubles soient 44 véhicules de 32 rames.		

Fig. 4 Caractéristiques du réseau du Tramway Rabat/Salé

VI.1.2.3. L'aménagement de la plateforme du Tramway

L'insertion des lignes du Tramway est réalisée par le positionnement de la plateforme ferrée dans la voirie actuelle des deux villes Rabat et Salé. D'une largeur d'environ 7 m, cette insertion a impliqué des élargissements sur certains tronçons de voiries afin de maintenir la circulation piétonne et automobile, le stationnement et les plantations.

Selon la configuration retenue, l'insertion est réalisée de manière latérale ou axiale:

- **Le site axial** : permet de garder la liberté d'aménagement des avenues avec un double sens de circulation et de desserte des riverains et favorise l'exploitation du Tramway et le fonctionnement urbain de l'avenue en dissociant le site propre des activités de part et d'autre. Le choix du site axial sur **70%** du réseau de Rabat/Salé provient du fait de son passage par les grands axes des deux villes Rabat et Salé.
- **Le site latéral** : permet de minimiser les travaux d'aménagement et l'impact sur la circulation et facilite la protection de la plateforme, ainsi que la desserte (photo 2).



Photo.2 Tracé latéral du Tramway

VI.1.2.4. Qualité urbaine et environnementale du Tramway.

Un des grands avantages environnementaux du Tramway réside dans sa capacité de transport importante sans impact négatif sur l'environnement puisque les rames sont alimentées électriquement par lignes aériennes de contact.

Le Tramway est un moyen de transport à énergie propre qui constitue une véritable alternative à l'usage de voiture. Avec une capacité de 580 passagers, soit l'équivalent de 100 voitures ou 10 bus, le Tramway de Rabat Salé est le mode de transport qui consomme le moins par kilomètre et par personne. En effet, le Tramway consomme quatre fois moins qu'un bus et dix fois moins qu'une voiture (en Kwh/passager) [Tram08].

VI.2. Analyse des accidents du Tramway

Dans le présent paragraphe, nous allons procéder à l'analyse qualitative et quantitative des accidents du Tramway dont les principales sources sont :

- Les déclarations de la société TRANSDEV chargée de l'exploitation des deux lignes du Tramway,
- Les rapports de constats de la police des accidents du Tramway avec les tiers,

Rappelons que les accidents avec le Tramway se produisent malgré les actions sécurité entreprises par l'exploitant, et certains accidents avec les véhicules légers et piétons ont des conséquences graves.

En se basant sur les rapports d'accidentologie du Tramway, on peut rencontrer différents scénarios d'accidents :

- Un piéton peut être renversé par un Tramway lors d'un croisement ou sur la plateforme (Photo 3)
- Le Tramway peut entrer en collision avec un véhicule au niveau d'un croisement (Photo 4),



Photo.3 Croisement du Tramway avec les piétons



Photo.4 Collision du Tramway avec une voiture légère

- Le Tramway peut dérailler après une collision brutale,
- Un passager peut également tomber d'un Tramway ou, malgré des systèmes de sécurité, se coincer entre les portes,
- Les conducteurs des deux roues peuvent perdre le contrôle de leur vélomoteurs lorsque les roues longent les voies de Tramways,
- Quand un Tramway freine brutalement ou lors d'une collision, les passagers peuvent tomber dans la rame ou frapper d'autres passagers ou parties de la rame,
- Etc,

Nous allons présenter dans ce qui suit, notre démarche d'acquisition et d'exploitation de la base de données des accidents du Tramway de Rabat Salé pour l'année 2011 (début de l'exploitation) et 2012 (à fin mai), en vue d'une modélisation du risque accident avec le Tramway par Réseaux Bayésiens.

VI.2.1. Les champs de la base de données

La base de données fournie par l'exploitant du Tramway est constituée des informations suivantes (Tableau 1):

- Date de l'accident,
- Rapport succinct présentant le type du tiers accidenté avec le Tramway, la nature des dégâts et le lieu de l'accident,

- La nature des dégâts, reprise avec quatre types de codification définis par l'exploitant du Tramway, qui traduisent des seuils de gravité suite à un accident. Les conséquences sont évaluées en fonctions des seuils suivants :
 - ✓ C1 : Corporelle 1, signifiant des blessures légères ne nécessitant pas une hospitalisation ou examen médical,
 - ✓ C2 : Corporelle 2, signifiant des blessures qui nécessitent un examen médical ou une hospitalisation,
 - ✓ C3 : Corporelle 3, signifiant des blessures graves suite auxquelles le tiers est décédé,
 - ✓ M1 : Matériel 1 signifiant des dégâts minimums qui se limitent à de simples rayures de la tôlerie,
 - ✓ M2 : Matériel 2 signifiant un dégât nécessitant l'immobilisation de la rame du Tramway pour réparation plus d'une demi journée,
 - ✓ M3 : Matériel 3 signifiant des dégâts importants et que la rame du Tramway sera immobilisée pour réparation pour une durée de plus de 3 jours.
- Lignes L1, L2 ou TC (Tronc Commun entre les deux lignes L1 et L2),
- Tiers en cause : Voiture légère, Bus, piéton, 2 roues, etc.,
- Voie : le numéro des voies 1 ou 2 sur laquelle a eu lieu l'accident,
- Ville : La ville où a eu lieu l'accident (Rabat ou Salé),
- Evitabilité: le pourcentage d'évitabilité de l'accident par le conducteur du Tramway,
- Constat Police,
- Arrondissement du lieu de l'accident,
- Préconisations : Les actions issues de l'analyse à chaud de l'accident par l'exploitant pour éviter sa reproduction,

Le tableau 1 ci après illustre un extrait de cette base de données des 64 accidents enregistrés entre juin 2011 et mai 2012.

Date	Rapport	Nature dégât	Ligne	Tiers en cause	Voie	Ville	Evitabi lité	Con stat police	Arrondis sement	Préconisation
15/06/2011	Accident avec VL et l'US 29/30 au carrefour Bibliothèque Nationale interruption de 16h23 à 16h38, VL arrière gauche bien abîmé, Tramway nez avant bien abîmé	Matériel 2	L1	VL	1	Rabat	50%	CP	261/DM /SAC2-Hassan	Sensibiliser le conducteur
16/06/2011	Accident avec VL et l'US 17/18 au carrefour Av. de France/Ourgha, interruption de 11h30 à 11h45, VL avant gauche enfoncée, Tramway jupe avant gauche légèrement enfoncée,	Matériel 1	L1	VL	1	Rabat	0%	CP	264/DM /SAC2-Hassan	Mettre des obstacles sur les passages piétons qui empêcheraient motos et voitures de passer. Sensibiliser les agents de sécurité. Sensibiliser les conducteurs
22/06/2011	Accident avec Motocyclette et l'US 21/22 entre le terminus et la station BETANA interruption de 11h55 à 12h15, la personne a été évacuée par ambulance	Corporel 1	L2	2roues	2	Salé	50%	CP	712/SAC1-GHRAB LIA-BAB KHMIS	Mettre des obstacles sur les passages piétons qui empêcheraient motos et voitures de passer. Sensibiliser les agents de sécurité. Sensibiliser les conducteurs

Tab. 1: Extrait de la base de données des accidents Tramway Rabat/Salé

VI.2.2. Analyse des statistiques des accidents du Tramway

VI.2.2.1. Emplacements

Les données contenues dans la base de donnée des accidents, précisent toujours le lieu de l'accident. Ces emplacements sont regroupés dans notre étude selon trois catégories:

- Intersection simple de la ligne du Tramway avec la route,
- Croisement de la ligne du Tramway avec la route de type carrefour,
- Croisement de la ligne du Tramway avec la route de type giratoire (Photo5),



Photo.5 Croisement du Tramway avec la route de type giratoire

- Passages piétons qu'il soit avec signalisation ou non, destiné au croisement de la ligne du Tramway avec les piétons, et là aussi, un certain nombre de vélomoteurs continue à les emprunter.
- Plateforme de la ligne où malheureusement certains vélomoteurs et piétons continuent à accéder dans leurs déplacements, surtout en période de pointe pour éviter de circuler sur la chaussée et trottoir encombrés.

La Figure 5 montre la répartition des accidents par catégorie d'emplacement. Il en résulte que la plupart a eu lieu au niveau des carrefours (29%), des intersections (23%) et des plateformes des lignes (20%).

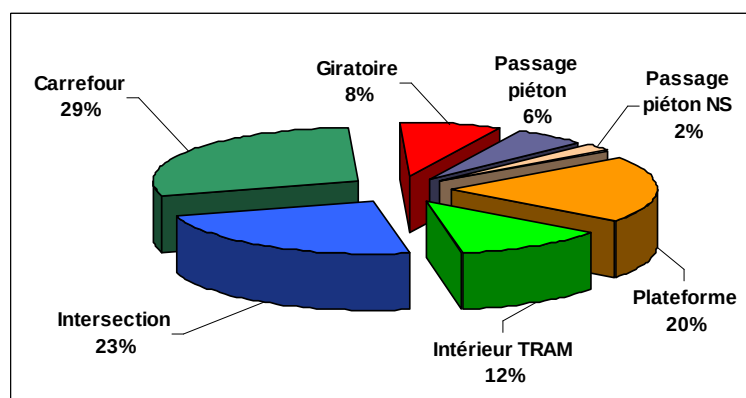


Fig. 5 Répartition des collisions par mois (2011 à mai 2012)

VI.2.2.2. Type des tiers en cause

Les statistiques des accidents fournis par l'exploitant des deux lignes du Tramway indiquent le type de tiers en cause dans chaque accident. La figure 6 montre la répartition de ces types de tiers.

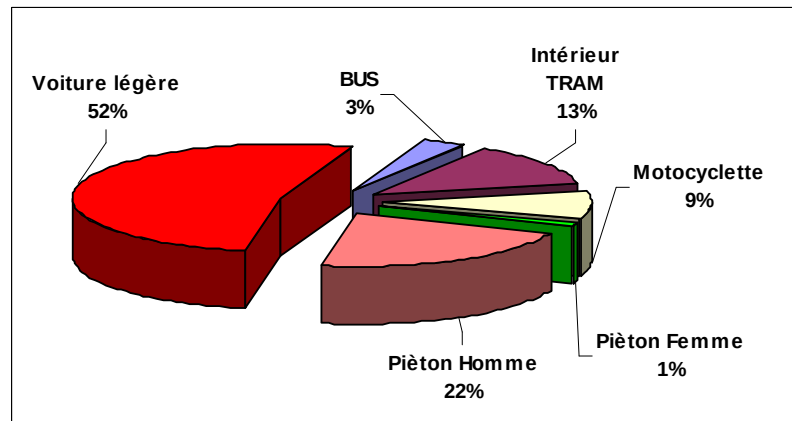


Fig. 6 Répartition des accidents par type de tiers (juin 2011 à mai 2012)

Les voitures légères arrivent en tête des tiers en cause dans les accidents Tramway (52 %), suivies des piétons de sex masculin (22 %) et des accidents à l'intérieur des rames du Tramway (13 %) qui sont la conséquence de chutes ou heurts des passagers à l'intérieur de la rame.

Des études [Cast12] [Chal09] ont montré que dans l'ensemble, les usagers ont peu conscience du risque d'accident avec le Tramway. Cette perception du risque d'accident peut être dû aux faibles vitesses de Tramways et à la conduite prudente des conducteurs de Tramway. Cependant, le manque de sensibilisation des risques de Tramway, conduit les usagers de la route à adopter un comportement risqué, qui parfois aboutit à des accidents.

VI.2.2.3. Statistiques mensuelles des accidents

Les statistiques des accidents du Tramway avec les tiers entre juin 2011 et mai 2012 affichent une irrégularité du nombre des accidents au cours des mois. L'évolution reste aléatoire (figure 7), malgré les campagnes de sensibilisation et les actions entreprises par l'exploitant du Tramway Rabat/Salé, qui ont pour objectif de sensibiliser les usagers

de la route, aux risques encourus et au respect des signalisations et priorité de passage du Tramway.

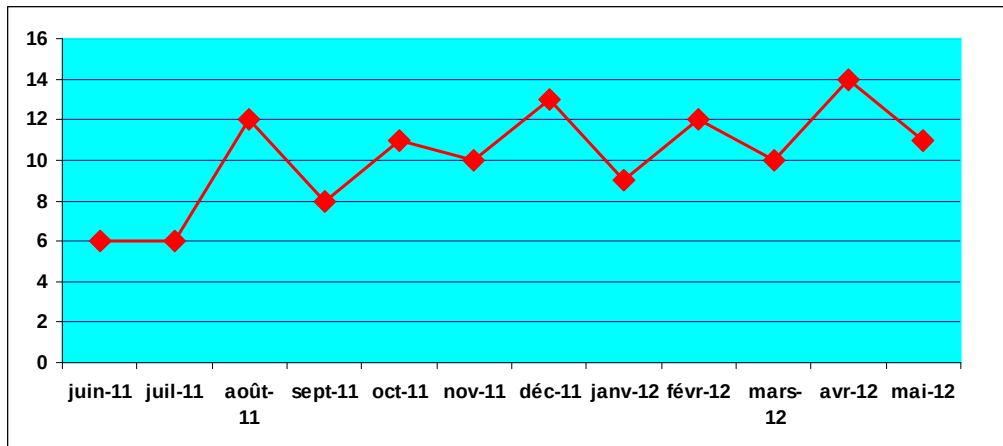


Fig. 7 Statistiques des accidents mensuels (juin 2011 à mai 2012)

VI.2.2.4. Gravité des accidents survenus

Les statistiques enregistrent un taux élevé des accidents corporels de types 1 et des accidents matériels de types 1 et 2. Cependant, deux accidents mortels ont été enregistrés pendant la période de juin 2011 à mai 2012.

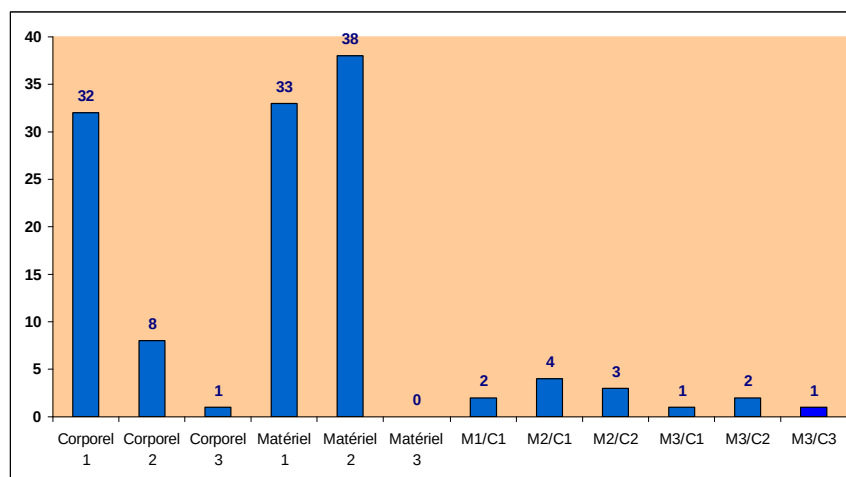


Fig. 8 Répartition des accidents par gravité (juin 2011 à mai 2012)

VI.2.2.5. Répartition des accidents par lignes

Les statistiques des accidents par type de ligne indiquent un pourcentage légèrement supérieur de la ligne L1 (53%) par rapport à la ligne L2 (39%). Ceci est justifié par la longueur de la ligne L1 (11,7 Km) supérieure à la ligne L2 (7,8 Km). Cette

ligne dessert plus de stations (22 stations) et compte dans son trajet plus de croisement avec les véhicules et les passages piétons, lieux favorables à la survenue des accidents.

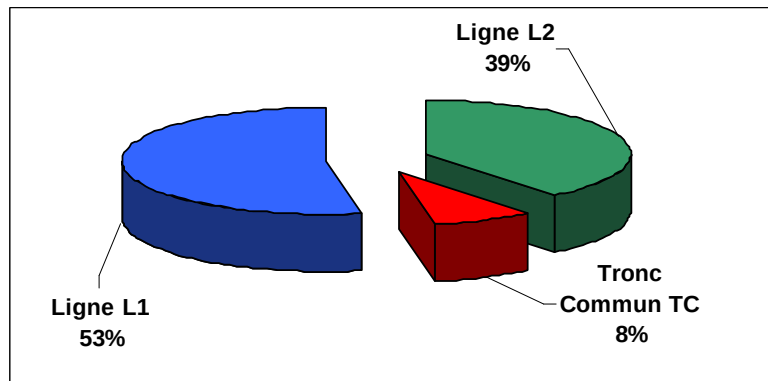


Fig. 9 Répartition des accidents par ligne (juin 2011 à mai 2012)

VI.2.2.6. Répartition des accidents par type de voie

Les statistiques des accidents par type de voie indiquent un pourcentage légèrement supérieur de la voie 1 (51%) par rapport à la voie 2 (49%). Ceci est justifié par la configuration du tracé du Tramway en sites axial et latéral, et par le fait que dans la configuration latérale qui représente 30% du linéaire de la voie ferroviaire, la voie 1 reste toujours limitrophe à la chaussée et donc le Tramway qui l'emprunte reste toujours exposé aux risques d'accidents avec les tiers.

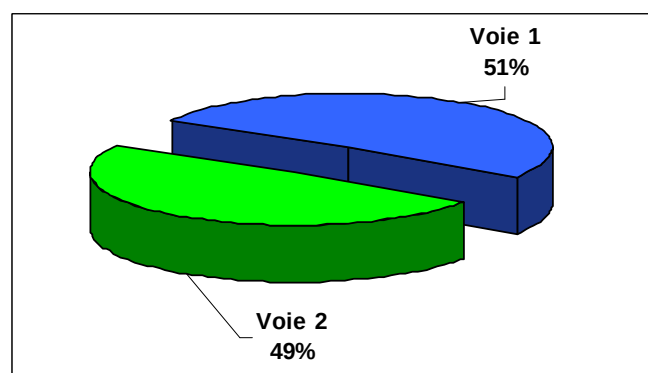


Fig. 10 Répartition des accidents par voie (juin 2011 à mai 2012)

VI.2.2.7. Répartition des accidents par heure de journée

La figure 11 illustre le nombre d'accidents par heure de journée. Le pic coïncide toujours avec les heures de pointe du trafic routier, correspondant aux horaires de trajets vers les administrations et la sortie des élèves des écoles. Les valeurs maximales sont enregistrées vers 14 h et 18 h de la journée.

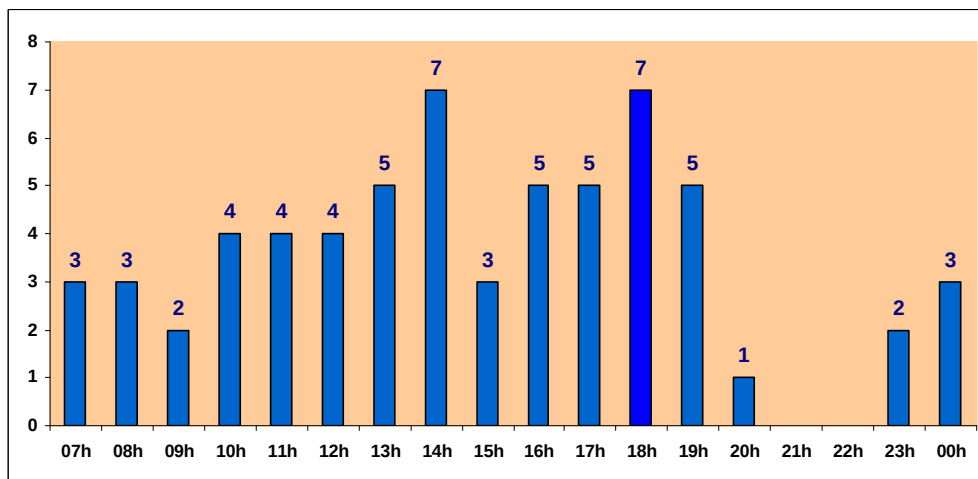


Fig. 11 Répartition des accidents par heure de journée (juin 2011 à mai 2012)

VI.2.3. Revue et exploitation de la base de donnée Tramway

En examinant cette la base de donnée fournie par l'exploitant du Tramway, nous avons constaté ce qui suit :

1. Les informations contenues ne font pas apparaître systématiquement tous les événements causes des accidents, qui relèvent éventuellement de l'environnement du Tramway,
2. Il y a lieu de reprendre la base de données en spécifiant d'autres champs à renseigner afin de faire ressortir les événements majeurs qui peuvent conduire à un accident avec le Tramway.

En effet, l'analyse du dysfonctionnement du système Tramway dans son environnement global, est basée sur l'analyse préliminaire des risques (APR) [Mort02-2] [Vill88] et la représentation graphique des chaînes de causalité suite à la survenue de l'accident. Ces causes relèvent éventuellement de ces trois composantes du système Tramway:

1. Interface avec les tiers,
2. Types de tiers,
3. Tramway.

Le principal avantage de cette méthode est de pouvoir visualiser l'ensemble des combinaisons d'événements élémentaires conduisant à l'accident avec le Tramway.

Notre analyse a aussi examiné les rapports d'accidentologie des Tramways, en particulier en France et en Belgique [Chal09] [Arra11], dans lesquelles certaines causes ont été identifiées relevant à la fois de la signalisation, de l'infrastructure et du comportement des usagers de la route. Nous ressortons ci après à l'issu de ce travail, notre nouvelle base de données à compléter, constituée des champs suivants [Bouc12c] (Fig. 12):

- ✓ Type accident : corporel ou matériel de types 1, 2 ou 3 ;
- ✓ Ligne : L1, L2 ou TC ;
- ✓ Type du lieu de l'accident : intersection, carrefour, giratoire, passage piéton avec ou sans signalisation ou plateforme ;
- ✓ Lieu de l'accident : identification géographique du lieu de l'accident ;
- ✓ Tiers accidenté : bus, voiture légère, motocyclette, piéton Homme ou Femme, etc ;
- ✓ Visibilité : bonne, moyenne ou insuffisante ;
- ✓ Comportement Tiers : imprudence ou non respect signalisation;
- ✓ Trafic lieu accident : fort, moyen ou faible ;
- ✓ Signalisation : fonctionnelle, incompatible ou hors service ;
- ✓ Evitabilité conducteur TRAM : pourcentage d'évitabilité de l'accident par le conducteur du Tramway suite à l'analyse à chaud des circonstances de l'accident par l'exploitant du Tramway.

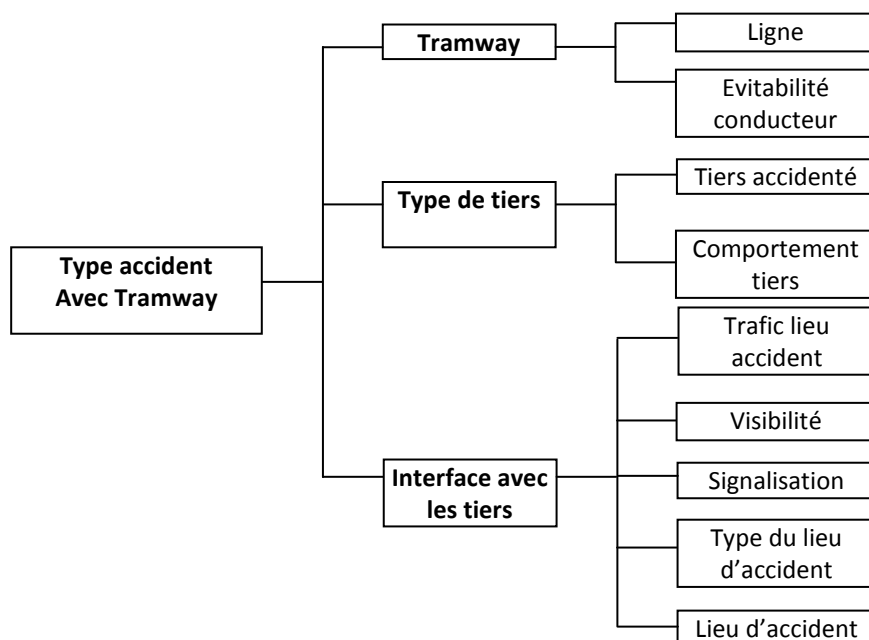


Fig. 12 Système d'évaluation du type d'accident avec le Tramway

Nous présenterons ci après un extrait de notre nouvelle base de données améliorée de 2011 à mai 2012 (tableau 2) précisant les états des ces événements considérés majeurs dans la survenue des accidents avec le Tramway.

Type accident	Ligne	Voie	Lieu de l'accident	Tiers accidenté	Visibilité	Comportement Tiers	Trafic lieu accident	Signalisation	Evitabilité Conducteur TRAM
C1	L2	2	Passage piétons	Motocyclette	Bonne	Imprudence	Moyen	Fonctionnelle	50%
M2	T.C	1	Carrefour	Voiture légère	Bonne	Non respect	Fort	Fonctionnelle	0%
M2/C1	L2	2	Plateforme	Piéton H	Mauvaise	Imprudence	Faible	Fonctionnelle	0%
C1	L1	1	Plateforme	Piéton H	Bonne	Imprudence	Moyen	Fonctionnelle	100%

Tab.2 : Extrait de la nouvelle Base de Données améliorée (juin 2011 à mai 2012)

Cette base de donnée améliorée servira à la modélisation et l'analyse des accidents du Tramway , en adoptant l'approche bayésienne.

VI.3. Modèle bayésien des accidents Tramway

L'utilisation des réseaux bayésiens dans l'analyse des événements incertains des accidents du Tramway, permet une description qualitative entre les différentes variables représentant les événements (le graphe causal) et la description quantitative des dépendances entre les événements (probabilités conditionnelles).

Pour ce faire, et à partir de la base de donnée améliorée des accidents survenus entre juin 2011 et mai 2012, nous allons à l'aide du Réseau Bayésien [Bouc12c]:

- Concevoir la structure du graphe causal entre les différents événements en se basant sur les données REX,
- Tenir compte des avis des experts dans le domaine, et apporter des modifications à la structure et donc à certains liens de causalités entre nœuds,
- Tester la pertinence de quelques actions sécurité à entreprendre par l'exploitant en faisant des simulations grâce à des calculs de probabilités de certains états à partir de la probabilité des autres (inférence dans le graphe).

VI.3.1. Les différents types de noeuds

Nous présentons dans le tableau 3 les nœuds et leurs modalités (valeurs discrètes) qui constituent le graphe causal :

Trafic lieu accident	Discret	Modalités	Agrégats	Lieu accident	Discret	Modalités	Agrégats		
		Faible	Faible			Carrefour	Carrefour		
		Fort	Fort			Giratoire	Giratoire		
		Moyen	Moyen			Intersection	Intersection		
Voie	Discret	Modalités	Agrégats			Passage piétons	Passage piétons		
		1	1			Passage piétons Non Signalé (NS)	Passage piétons Non Signalé (NS)		
		2	2			Plateforme	Plateforme		
Type accident	Discret	Modalités	Agrégats	Comportement – Tiers	Discret	Modalités	Agrégats		
		C1	C1	Conforme					
		C2	C2	Non respect		Non respect			
		M1	M1						
		M1/C1	M1/C1	Ligne	Discret	Modalités	Agrégats		
		M2	M2			L1	L1		
		M2/C1	M2/C1			L2	L2		
		_M2/C2	M2/C2			T.C	T.C		
		_M3/C2	M3/C2						
_M3/C3	M3/C3	Visibilité	Discret		Modalités	Agrégats			
				Bonne	Bonne				
				Mauvaise	Mauvaise				
				Moyenne	Moyenne				
Signalisation	Discret	Modalités	Agrégats	Tiers accidenté	Discret	Modalités	Agrégats		
		Fonctionnelle	Fonctionnelle			BUS	BUS		
		Hors Service	Hors Service			Motocyclette	Motocyclette		
		Incompatible	Incompatible			Piéton F	Piéton F		
Evitabilité_ TRAM	Discret	Modalités	Agrégats			Piéton H	Piéton H		
		0%	0%			Voiture légère	Voiture légère		
		100%	100%						
		50%	50%						

Tab. 3: Modalités des nœuds du Réseau Bayésien

VI.3.2. Apprentissage de la structure

Nous présentons dans la figure 13, le modèle construit par apprentissage par découverte d'association selon l'arbre de recouvrement maximal (MWST). Les données introduites sont celles des 64 accidents enregistrés entre juin 2011 et mai 2012.

Les liens de causalité entre les différents nœuds du graphe construit sont analysés, et une modification et ajout de certains liens ont été apportés pour tenir compte à la fois des avis des experts dans ce domaine, qui se sont appuyés sur les résultats

d'analyses effectués sur les causalités des incidents réels survenus, qui ont montré l'existence de certaines dépendances entre des événements.

Le nouveau graphe obtenu est montré dans la figure 14. Les différentes probabilités des différents nœuds estimées par apprentissage sont illustrées dans la figure15.

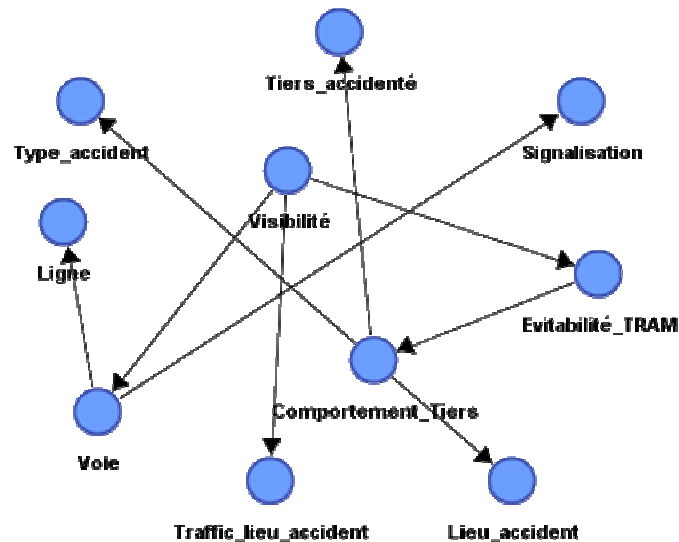


Fig.13 Structure par apprentissage du Réseau Bayésien des accidents du Tramway

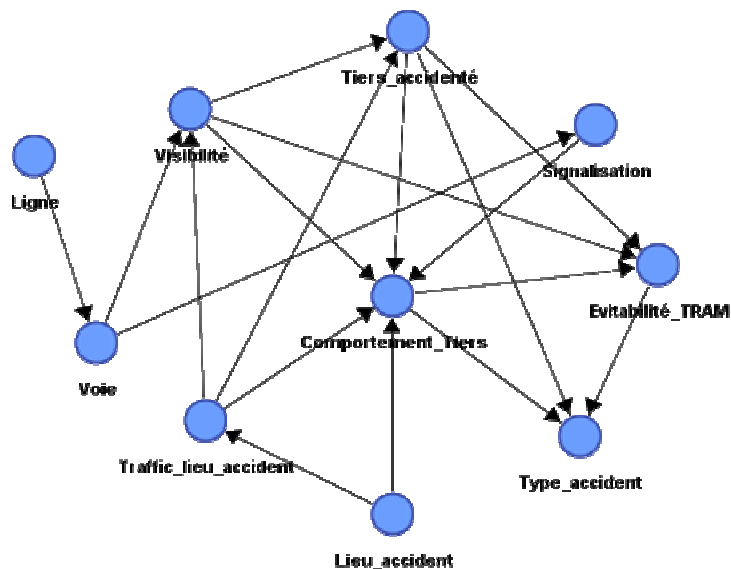


Fig.14 Réaffectation des associations du Réseau Bayésien des accidents du Tramway

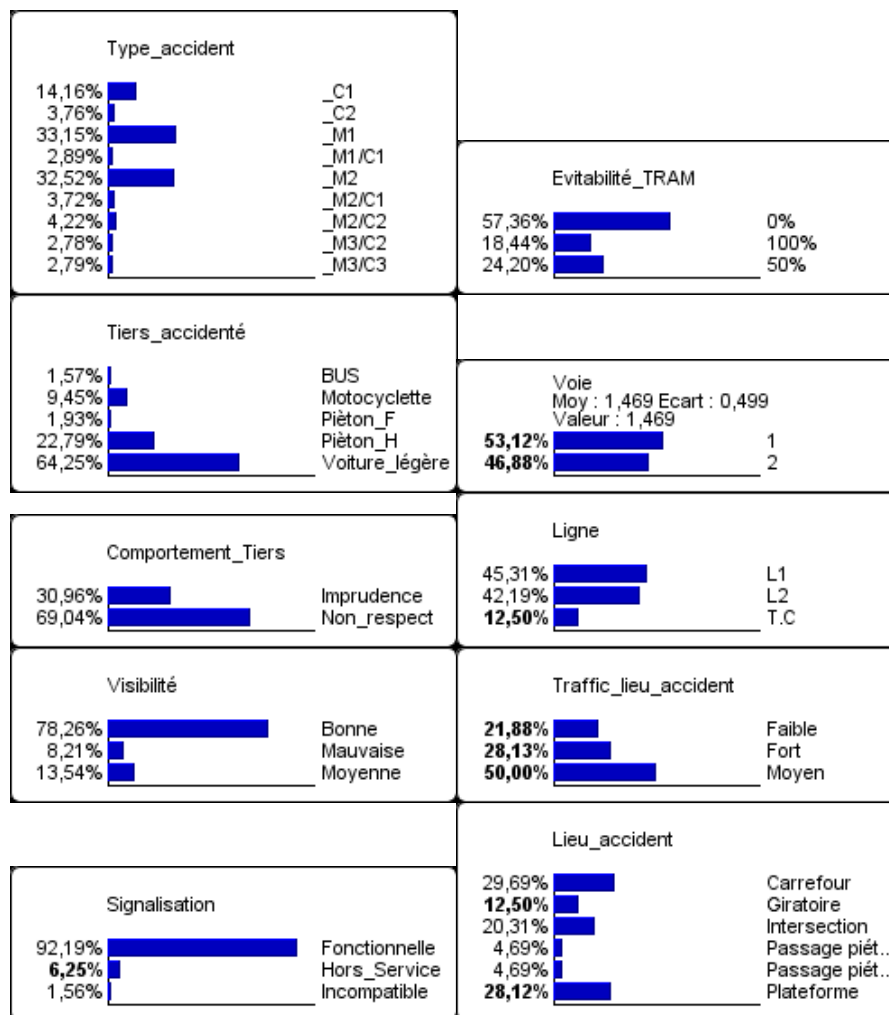


Fig.15 Résultats de l'apprentissage du Réseau Bayésien des accidents Tramway

VI.4. Simulations sur le modèle Bayésien

Dans les figures qui suivent, nous allons tester la pertinence de quelques actions sécurité envisagées par l'exploitant du tramway, en faisant des simulations sur les états de certains nœuds constituant le graphe de notre modèle de risque élaboré sur la base du Réseau Bayésien, et nous allons grâce aux calculs d'inférence, estimer les différentes probabilités d'occurrence des accidents et leurs types à la suite de chaque simulation.

VI.4.1. Simulation n°1 : Evitabilité des accidents par le conducteur du Tramway améliorée à 80%

En utilisant notre modèle Bayésien des accidents avec le Tramway, nous simulerons l'impact de l'amélioration de l'évitabilité des conducteurs du Tramway, initialement estimée à 18,44% à 80%, par le biais de formations dispensées à ces

conducteurs de Tramway, sur la conduite défensive visant à anticiper les dangers susceptibles d'émaner des usagers de la route.

Nous constatons donc suite à cette simulation, que le accidents diminueront de **64** à **15**, soit une réduction considérable de **76%**.

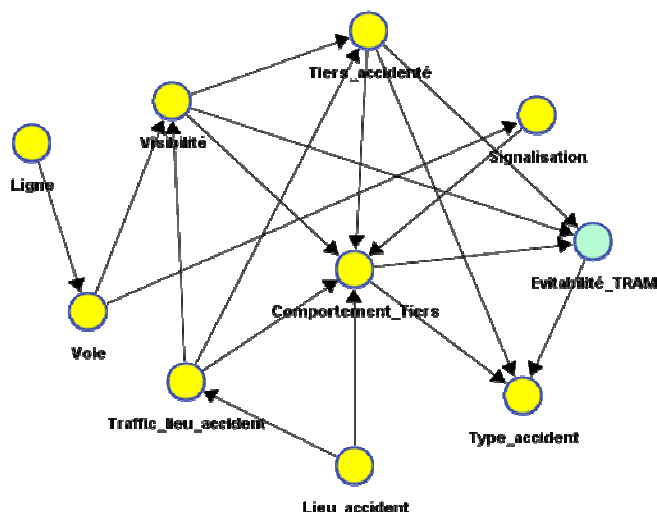
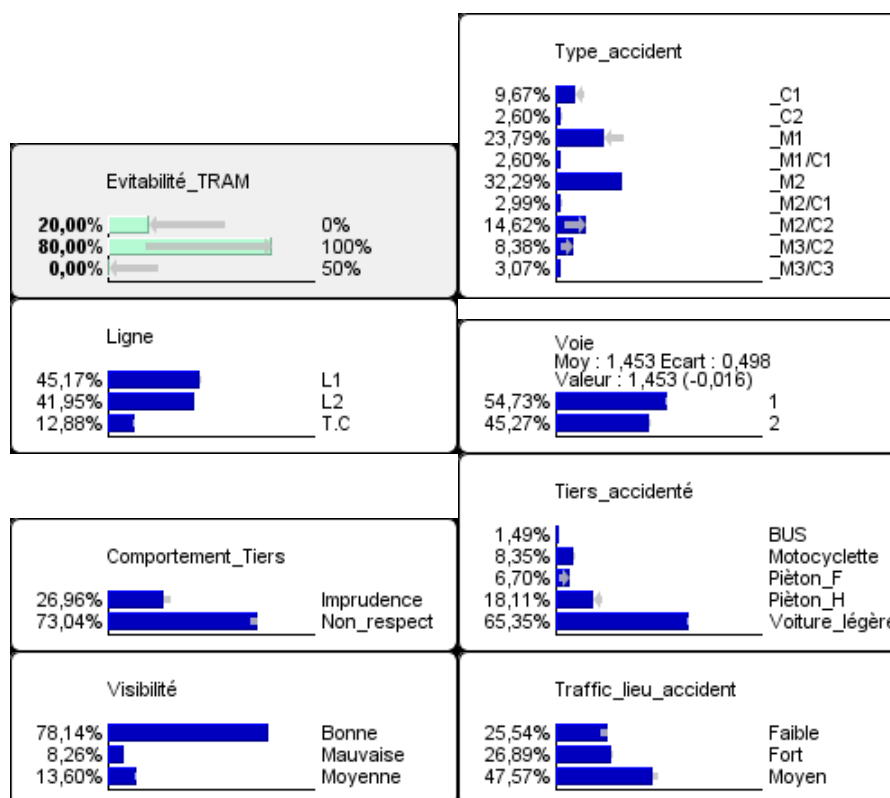


Fig.16 Simulation évitabilité des accidents par le conducteur du Tramway améliorée à **80%**



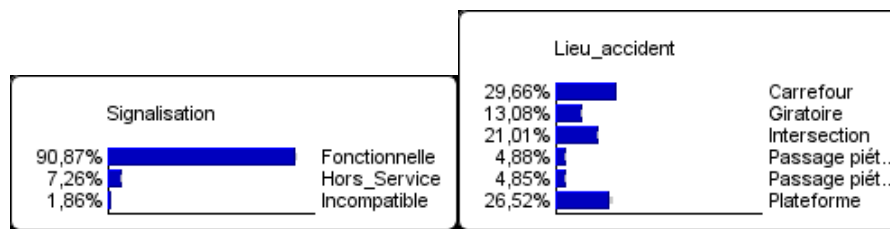


Fig. 17 Résultats de l'inférence du graphe causal après simulation évitabilité 80%

La figure 17 ci-dessus montre les calculs d'inférence du graphe suite à cette simulation. On peut constater que notamment sur les 15 accidents estimés, **9,6%** seront de type corporel 1 et **2,6 %** seront de type corporel 2.

VI.4.2. Simulation n°2 : Respect du code de la route 100% par les tiers

Dans la simulation suivante, nous allons considérer que les usagers de la route respectent le code de circulation, et donc le non respect du code est évalué à 0%. Ainsi, les accidents avec le Tramway ne peuvent être causés que dans des cas d'imprudences. Nous constatons d'après les calculs d'inférence au niveau de notre modèle, qu'il y a une nette diminution de la sinistralité au niveau du Tramway qui passerait à **20** accidents, soit une réduction de **68%**.

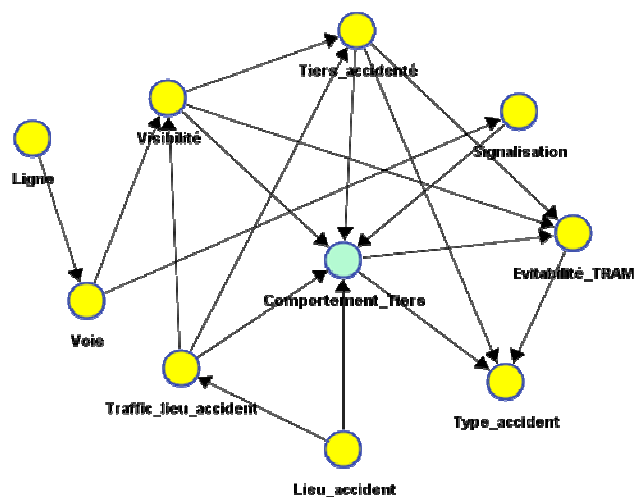
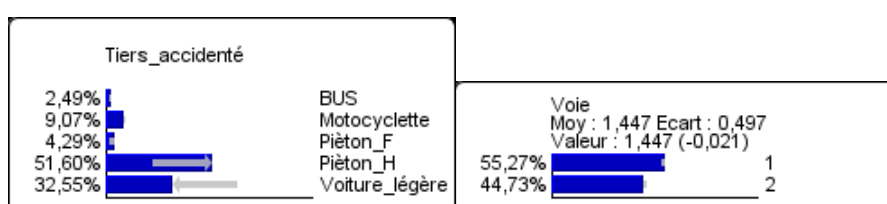


Fig. 18 Nœud comportement tiers avec 100% respect du code de la route



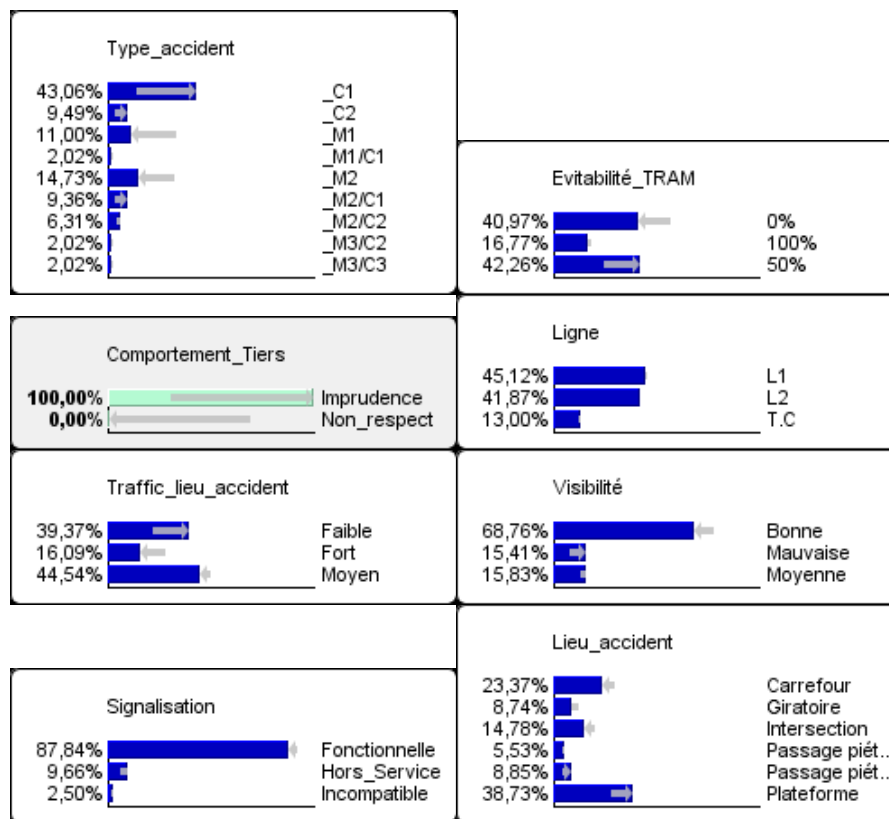


Fig. 19 Résultats de l'inférence du graphe causal après simulation non respect du code 0%

VI.4.3. Simulation n°3 : Visibilité bonne à 100%

Dans la simulation suivante, nous allons considérer que la visibilité au niveau des intersections entre le Tramway et la route est bonne à 100% et nous constatons d'après les calculs d'inférence du modèle, que les accidents avec le Tramway diminuent à 50, soit une réduction de **22%**.

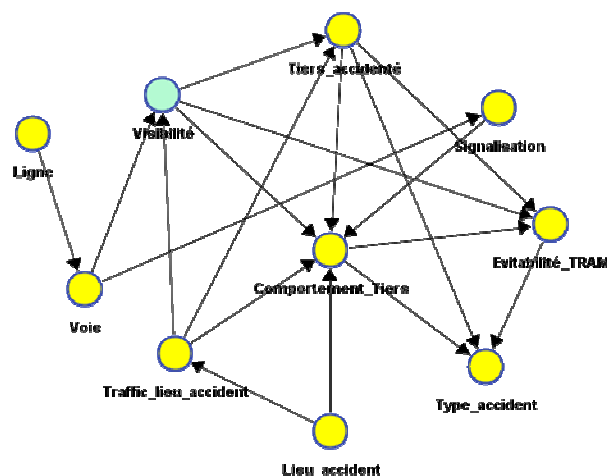


Fig. 20 Simulation visibilité bonne à 100%

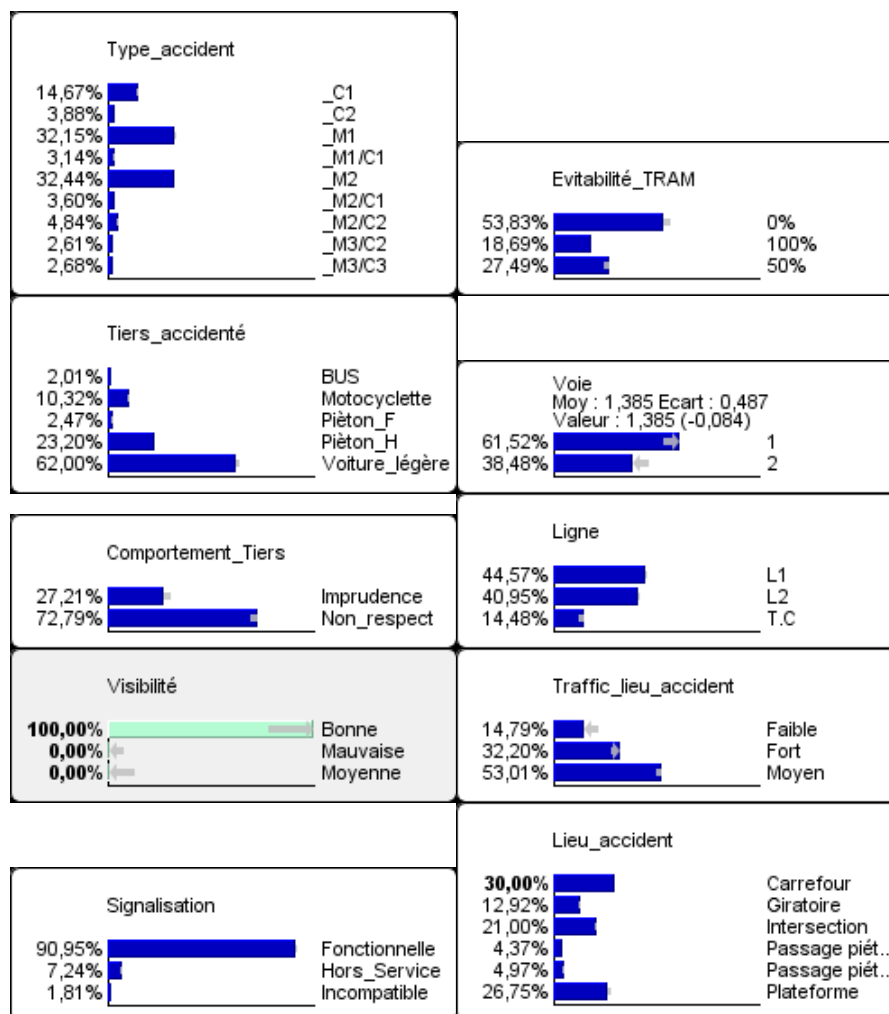


Fig.21 Résultats de l'inférence du graphe causal après simulation de la visibilité bonne à 100%

VI.4.4. Simulation n°4 : Evitabilité des accidents 80% et 50% des accidents de types corporel 1 et matériel 1

Dans la simulation suivante (Figure 22), nous considérons que l'opérateur vise à améliorer le taux d'accidents évitables à 80% en effectuant des séances de formation pour les conducteurs de Tramway, et de réduire la gravité des accidents et des dégâts matériels à des niveaux acceptables : corporelle de type 1 (50%) et matérielle de type 1 (50%).

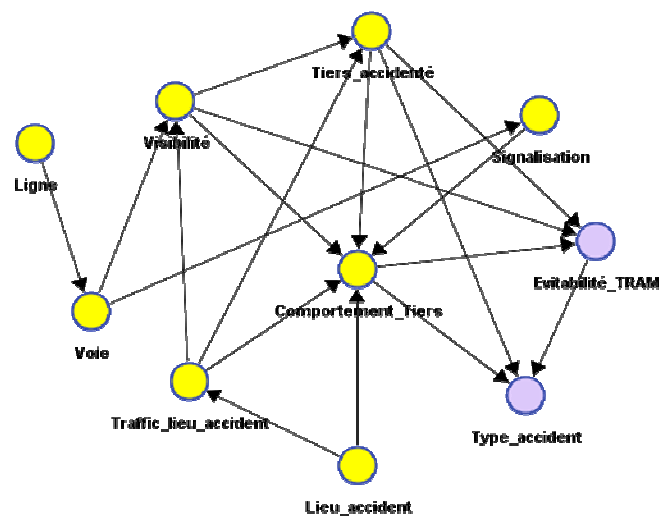
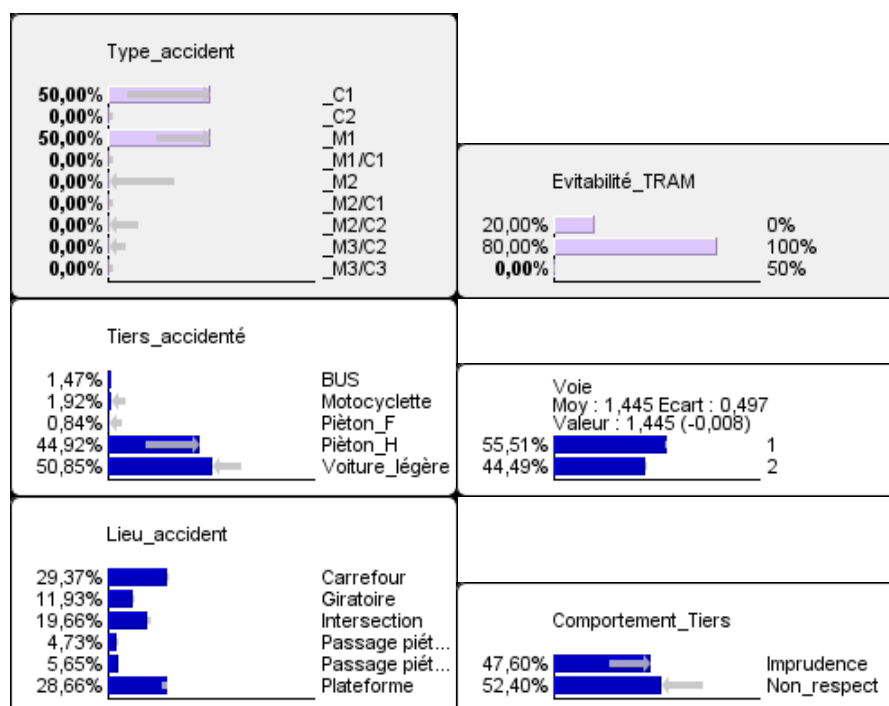


Fig. 22 Simulation de l'évitabilité 80% , accidents C1 50% et accidents M1 50%

Nous constatons que dans la figure 23 ci après, qui illustrent les résultats du calcul d'inférence au niveau de notre modèle, que le taux du non respect des usagers de la route doit diminuer à **52%** pour tenir cet objectif. Ce résultat montre que malgré les actions visant à améliorer la sécurité menées par l'exploitant du Tramway, l'utilisateur de la route reste un facteur déterminant dans la survenue des accidents, et les performances de ces actions ne peuvent pas être atteintes sans l'implication effective des piétons et conducteurs de véhicules, à respecter le code de la route et du Tramway.



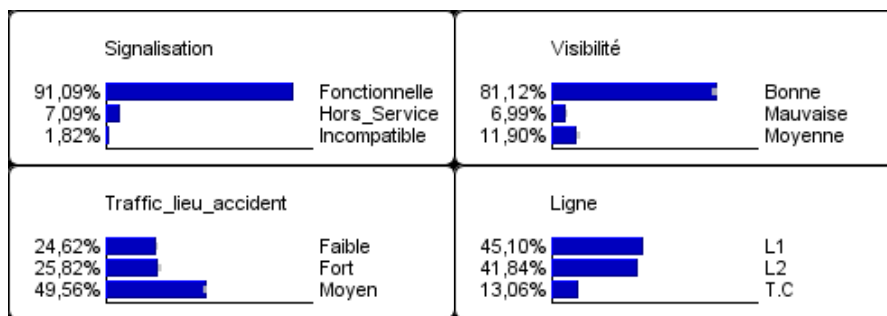


Fig. 23 Résultats de l'inférence du graphe causal après simulation de l'évitabilité 80%, accidents C1 50% et accidents M1 50%

VI.5. Conclusion

Notre modèle de risque proposé s'appuie sur une vision systémique de l'analyse des risques dont le but est de tenter de comprendre comment ce système Tramway réagit en fonction de ses éléments et par rapport à son environnement.

Il permet une approche macroscopique dans son contexte général et de manière transversale. Il présente aussi l'avantage d'appréhender ce système :

- de manière globale car il considère le système Tramway étudié comme un tout, et cherche à étudier les relations entre les éléments et les sous-systèmes qui peuvent conduire à des accidents,
- en tenant compte ainsi de son environnement puisque le système Tramway est étudié en tenant compte des interactions qu'il entretient avec son environnement,
- en fonction de ses finalités car il focalise l'analyse sur l'étude de ce qui est attendu par le système, qui de garantir un transport aux voyageurs en veillant à leurs sécurité et à celles des usagers de la route.

Les simulations réalisées par notre modèle d'évaluation du risque des accidents du Tramway, en prenant différents états des nœuds constituant le graphe causal, ont pour objectif de proposer aux gestionnaires de sécurité routières et Tramway un outil de décision sur les actions sécurité à mener à la fois sur l'infrastructure du Tramway, la signalisation ferroviaire et routière ainsi que sur le comportement des usagers de la route.

Il a été constaté à travers les résultats des inférences effectuées dans le modèle construit, que le comportement des usagers de la route reste un facteur déterminant dans la survenue des accidents, et que toute amélioration de la sécurité passe avant par une sensibilisation des tiers et une formation des conducteurs des Tramway à anticiper les accidents, car il ne faut pas oublier que le Tramway est guidé par des rails, et donc ne peut pas effectuer une manœuvre pour éviter un piéton ou un véhicule en croisement.

Quelques consignes ci-dessous, sont destinées à inciter chaque usager de la route à adopter de bons comportements pour un nouveau partage de la route avec le Tramway :

- **Piétons :** En zone de traversée piétonne, il faut vérifier que la plate-forme est dégagée, avant de traverser en respectant la signalisation. Même dans cette zone, le Tramway est toujours prioritaire. Il faut éviter de marcher sur la plate-forme et éviter de traverser près de la rame en stationnement, car un autre Tramway peut arriver.
- **Deux-roues :** Il faut faire attention aux reliefs créés par les rails en traversant aux croisements. Il faut veiller à ne pas coincer la roue dans la gorge du rail et ne pas emprunter la plateforme.
- **Automobilistes et bus:** il faut s'assurer que le passage est libre avant de s'engager en respectant les feux de signalisation mis en place dans les croisements. En tournant, il faut s'assurer que le Tramway ne se trouve pas dans votre angle mort. Enfin, la circulation est interdite sur la plate-forme destinée uniquement au Tramway.

Conclusions

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire de thèse, ont pour objectif de proposer une approche d'évaluation de dysfonctionnement des systèmes complexes, en orientant les études d'analyse et de modélisation vers une approche systémique décrivant le système à travers ses propriétés et ses comportements.

Le cas d'étude examiné dans ce mémoire, est celui des accidents du système de transport ferroviaire, illustré à travers les deux exemples de Passage à Niveau et Tramway. Vu le caractère aléatoire des accidents qui surviennent dans ce système, dont une grande partie relève du comportement humain, nous avons adopté une approche probabiliste qui est celle des Réseaux Bayésiens.

En effet, les méthodologies de l'ingénierie du risque sont suffisantes pour un système entièrement constitué d'objets techniques, car l'essentiel des événements que subit un système technique est constitué par des défaillances ou une variation de l'environnement qui sont identifiées dès la conception ou surveillées pendant la durée de vie du système. Pour un système complexe ou sociotechniques, tel que le système de transport ferroviaire, où les causes des accidents trouvent beaucoup moins leurs origines dans la défaillance technique de ses composants que dans la défaillance des organisations et les comportements humains, les outils de l'ingénierie du risque qui abordent généralement le système par ses organes ou ses flux ne suffisent plus, et il est donc nécessaire de l'appréhender à travers une approche systémique visant à analyser le système par son comportement et ses objectifs.

Face à la complexité des systèmes ferroviaires et au besoin de la recherche de performances toujours plus élevées, il devient nécessaire de pouvoir développer des modèles compréhensibles et utilisables par les exploitants, présentant le caractère de décidabilité et offrant l'ouverture nécessaire pour l'adaptation du modèle face aux changements technologiques des composants du système, ainsi que la prise en compte de paramètres humains, qu'ils s'agissent des opérateurs du système ou les tierces personnes (usagers de la route, voyageurs etc.).

Dans ce contexte, notre approche basée sur les méthodes d'analyse de risques combinés avec les Réseaux Bayésiens, intègre le paramètre humain dans le système et en particulier dans l'action résultante. Étant donné que le comportement humain est très étroitement lié aux situations rencontrées, à la connaissance que l'être humain a du système et du fonctionnement de ce dernier.

Pour effectuer l'analyse globale du système de Passage à Niveau et Tramway, au regard des aspects de complexité qui les caractérisent, nous avons présenté dans les chapitres V et VI notre démarche d'analyse des risques de ces deux systèmes, qui s'est appuyée en premier lieu sur la connaissance des modes de fonctionnement normal, résultat d'une première étape d'analyse fonctionnelle du PN et Tramway ainsi que les comportements des usagers de la route. En second lieu, une représentation tabulaire de la connaissance des modes de dysfonctionnement par l'Analyse Préliminaire des Risques ainsi que l'exploitation de la base des connaissances des causes des incidents antérieurs, ont permis l'identification des événements du système PN et du système Tramway, susceptibles d'affecter leur fonctionnement.

Ces événements considérés majeurs dans l'apparition des accidents ont fait l'objet de modélisation par les Réseaux Bayésiens adaptés pour la représentation des systèmes qui évoluent d'une manière stochastique, sous l'influence des actions choisies par un planificateur (opérateurs ONCF, Tramway) ou des événements extérieurs (usagers de la route).

Ces deux modèles dont les paramètres ont été extraits à partir des deux bases de données des accidents ONCF et Tramway, nous ont permis:

- De concevoir par apprentissage la structure du graphe causal entre les événements du système en se basant sur les données recueillies des incidents antérieurs, et en utilisant une méthode d'apprentissage des Réseaux Bayésiens.
- De modifier éventuellement la structure et donc certains liens de causalité par les experts dans ce domaine.
- De réaliser les calculs d'inférence dans le graphe causal, en exploitant les données de Retour d'EXpérience des incidents antérieurs, et donc de découvrir l'ensemble des relations probabilistes significatives présentes dans les données et ainsi d'identifier les liens entre les différents facteurs de risque identifiés.

Le modèle des accidents établi pour les Passages à Niveau et Tramway, constitue également un outil d'aide à la décision, qui permettrait de cibler les actions pertinentes, en vue d'atteindre les objectifs définis par l'exploitant en matière de réduction des risques au niveau des PN et Tramway. En effet, à travers des simulations d'états d'occurrences des événements constituant le graphe causal, il nous a été possible d'apprécier leurs impacts sur les accidents.

La pertinence de ces actions et leur cohérence avec les objectifs définis constituent donc un des indicateurs de performance du système de sûreté ferroviaire, et les plans d'actions engagés suite aux résultats de ce modèle permettront une hiérarchisation des actions en fonction des niveaux de risques identifiés, et permettront aussi une gestion efficace des budgets alloués à la maîtrise des risques.

Enfin, notre approche offre une capacité d'évolution du modèle d'accidentologie du système, et la prise en compte de l'évolution des performances de ses composantes. En effet, il est toujours possible d'approfondir les analyses en considérant des sous systèmes, et cela revient au niveau de notre modèle, de faire une décomposition des nœuds et de leurs liens de causalité.

Les liens entre les différents nœuds du modèle établi montrent que les éléments du système sont liés les uns aux autres : si un des paramètres se modifie, tout le système peut être amené à changer. Cette prise en compte de la dynamique au niveau de l'étape d'évaluation des événements redoutés, reste liée étroitement à la fiabilité des données contenues dans la base des connaissances des accidents, et à l'analyse très fine de cette base de données pour dégager les événements sources de dangers.

D'autres perspectives de recherches peuvent viser l'amélioration de la prise en compte de toutes les contraintes liées au fonctionnement et à l'environnement du système, d'étudier la possibilité de développer un modèle générique à partir d'une formalisation de patterns garantissant son réutilisabilité à la fois pour les systèmes ferroviaires que routiers, à l'introduction éventuelle du facteur coût dans le modèle, permettant ainsi de pouvoir comparer les performances de chaque action sécurité sur le système, et d'optimiser par la suite les différentes décisions à prendre.

BIBLIOGRAPHIE

- [Afis01] AFIS. L'ingénierie Système : un atout majeur pour la compétitivité des entreprises, Actes de la 2ème Conférence Annuelle d'Ingénierie Système, Association Française d'Ingénierie Système (2001).
- [Arra11] M. Arras, A. Dusserre. Accidentologie des Tramways : Analyse des évènements 2010, évolution 2003- 2010, Ministère Français de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (2011).
- [Bade03] Badea, L. Inferring large gene networks from microarray data : a constraint-based approach. IJCAI-2003 Workshop on Learning Graphical Models for Computational Genomics (2003).
- [Baue05] BAUER (B.) et ODELL (J.). UML 2.0 and agents: how to build agent-based systems with the new UML standard. Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 18, pp. 141-157 (2005).
- [Baye] Bayesia. Logiciel bayesialab - <http://www.bayesia.com/>
- [Bens08] Abdeljabbar BEN SALEM. Modèles Probabilistes de Séquences Temporelles et Fusion de Décisions. Application à la Classification de Défauts de Rails et à leur Maintenance, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy 1 (2008).
- [Berr07] Abdelaziz Berrado. Modeling risk to increase safety at the level crossing in the Moroccan rail way–Al AKHAWAYN University (2007).
- [Biro97] Birolini, A. Quality and Reliability of Technical Systems. Springer, Berlin (1997).
- [Blai03] Blaise J.C, Lhoste P. et Ciccotelli J. Formalisations of normative knowledge for safe design. Safety Science 41 (263):PP 241-261 (2003).
- [Bobb01] Bobbio A, Portinale L, Minichino M, Ciancamerla. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. Reliability Engineering and System Safety 71 (2001). p. 249–260.
- [Bobb99] Bobbio A, Portinale L, Minichino M, Ciancamerla E. Comparing fault trees and Bayesian networks for dependability analysis. Proceedings of the 18th International Conference on Computer Safety, Reliability and Security, SAFECOMP99, vol. 1698 (1999).
- [Bouc07] Anass BOUCHIBA, Abdelghani CHERKAOUI. Contribution de la modélisation combinée avec l'approche bayésienne dans l'amélioration des performances des processus métiers : Cas de la sûreté ferroviaire au niveau de l'ONCF, CPI'2007 – Rabat (2007).
- [Bouc11a] Anass BOUCHIBA, Abdelghani CHERKAOUI, Abdessamad KOBI, Mihaela BARREAU. Evaluation de Dysfonctionnement des Passages à Niveau par Approche Bayésienne QUALITA' 2011, ANGERS (2011).
- [Bouc11b] Anass BOUCHIBA, Abdelghani CHERKAOUI, Abdessamad KOBI, Mihaela BARREAU. Evaluating Dysfunction of Level Crossing by Bayesian Approach, In Proceedings of

the International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, (IESM'2011), pages 1029 – 1039 Metz, France. École nationale d'ingénieurs de Metz (ENIM), International Institute for Innovation, Industrial Engineering and Entrepreneurship (I4e2). ISBN 978-2-9600532-3-4 (2011).

[Bouc12] Anass BOUCHIBA, Mihaela BARREAU, Abdessamad KOBİ, Abdelghani CHERKAOUI, Improving dependability analysis by combining functional and dysfunctional methods to Bayesian Network: Level Crossing case study, International Symposium On Security and Safety of Complex Systems 2SCS' 2012, Agadir, Morocco (2012).

[Bouc12b] Anass BOUCHIBA, Mihaela BARREAU, Abdessamad KOBİ, Abdelghani CHERKAOUI. Sécurité et Facteurs Humains dans les Moyens de Transport : Une approche multidisciplinaire, pages 49 – 72. ISBN 978-2-296-99665-6 (2012).

[Bouc12c] Anass BOUCHIBA, Mihaela BARREAU, Abdessamad KOBİ, Abdelghani CHERKAOUI. Safety Analysis of a Railway Transport System By Bayesian Network: Rabat/Salé Tramway Case, Canadian Journal on Computing in Mathematics, Natural Sciences, Engineering and Medicine, pages 170 – 179. ISSN: 1923-1660 (2012).

[Bren01] Brenier (H.). Les spécifications fonctionnelles. Collection EEA, Éditions Dunod (2001).

[Cauf06] Cauffriez L, Benard V. et Renaux D. A new formalism for designing and specifying RAMS parameters for safe complex distributed control systems: the safe SADT formalism. IEEE transactions on reliability (2006).

[Cast12] Carole Castanier, Françoise Paran, Patricia Delhomme. Risk of crashing with a Tram: Perceptions of pedestrians, cyclists, and motorists, Transportation Research Part F 15 387–394 (2012).

[CEI 61882] Etudes de danger et d'exploitabilité (études HAZOP) - Guide d'application. Paris: AFNOR (2001)

[Chal09] Isabelle Chalanton et Muriel Jadoul. Etude des accidents entre un Tram et un piéton en région de Bruxelles capitale, Institut Belge pour la Sécurité Routière (IBSR) (2009).

[Chen02] Cheng, J., Greiner, R., Kelly, J., Bell, D., et Liu, W. Learning bayesian networks from data : An information-theory based approach. Artificial Intelligence, 137(1-2) :43–90 (2002).

[Chez03] Cheze (N.). Statistique inférentielle. Estimation. Techniques de l'Ingénieur, AF 168 (2003).

[Cler77] CLERGUE (G.). L'apprentissage de la complexité. Éditions Hermès (1977).

[Corm94] T. Cormen, C. Leiserson, and R. Rivest. Introduction à l'algorithmique. Dunod (1994).

[Corn02] Antoine Cornuéjols, Laurent Miclet. Apprentissage artificiel: Concepts et algorithmes, édition Eyrolles (2002).

[Dash03] Dash, D. et Druzdzel, M. Robust independence testing for constraint-based learning of causal structure. The Nineteenth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI03), pages 167–174 (2003).

[Dela07] Alain DELAPLACE. Approche évolutionnaire de l'apprentissage de structure pour les réseaux bayésiens, Thèse de Doctorat, Université de TOURS (2007).

- [Demp77] A. Dempster, N. Laird et D. Rubin. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. – Journal of the Royal Statistical Society, B 39: 1-38 (1977).
- [Dutu97] Dutuit, Y., Châtelet, E., Signoret, J.-P., et Thomas, P. Dependability modelling and evaluation by using stochastic petri nets : Application to two test cases. Reliability Engineering & System Safety, 55(2) :117–124 (1997).
- [Elbo05] Nabila ELBOUKHARI, Contribution à la Gestion des Risques liés au matériel roulant et à son utilisation et étude du facteur humain, EMI/Génie Mécanique, DESS (2005).
- [EN 292/ISO 12100]. Sécurité des machines : Notions fondamentales, principes généraux de conception. ISO/CEN (1995).
- [EN50126] EN 50126. Applications ferroviaires : Spécification et démonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité (FDMS). Paris: AFNOR (2000).
- [EN50128] : EN 50128. Applications ferroviaires, systèmes de signalisation, de télécommunication et de traitement – Logiciels pour systèmes de commande et de protection ferroviaire. Norme Européenne (2001).
- [EN50129] EN 50129. Applications ferroviaires, systèmes électroniques relatifs à la sécurité pour la signalisation (2003).
- [Esta11] ESTAMPE Dominique. – Modèles d'évaluation de la performance supply chain. Techniques de l'Ingénieur, AG5170 (2011).
- [Frie97] Friedman, N. Learning belief networks in the presence of missing values and hidden variables. ICML, pages 125–133 (1997).
- [Frie98] Friedman, N. The bayesian structural EM algorithm. Proceedings of the 14th Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-98), pages 129– 13, San Francisco, CA. Morgan Kaufmann (1998).
- [Gari94] Garin, H. AMDEC/AMDE/AEEL L'essentiel de la méthode. AFNOR, Paris (1994).
- [Ghaz08] Ghazel M. Approche d'évaluation quantitative du risque de collision sur les passages à niveau, Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement – Avignon 6-10 (2008).
- [Gira06] Giraud (M.). Sûreté de fonctionnement des systèmes. Analyse des systèmes réparables. Techniques de l'Ingénieur, E 3 852 (2006).
- [Heck97] Heckerman (D), Bayesian Networks for Data Mining, Data Mining and Knowledge Discovery 1, 79–119 (1997).
- [ISO/CEI Guide 51. (1999)]. Aspects liés à la sécurité – principes directeurs pour les inclure dans les normes. ISO/CEI (1999).
- [ISO/CEI Guide 73. (2002)]. Management du risque – Vocabulaire – principes directeurs pour les inclure dans les normes. ISO/CEI (2002).
- [Jens90] Jensen, F., Lauritzen, S., & Olesen, K. bayesian updating in causal probabilistic networks by local computations. Computational Statistics Quaterly, 4, 269–282. 42, 43, 44 (1990).
- [Jens96] Jensen, F.V., An Introduction to Bayesian Networks, Springer-Verlag, New York (1996).

- [Jord98] M. I Jordan. Learning in Graphical Models, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands (1998).
- [Juta06] Jutak O, Simon P. Washington, Doohee Nam. Accident prediction model for railway-highway interfaces. Accident Analysis and Prevention 38, pages 346-356 (2006).
- [Kevi02] Kevin Patrick Murphy. Dynamic Bayesian Networks: Representation, Inference and Learning. Thèse de Doctorat, U.C. Berkeley (2002).
- [Kevi98] Kevin (M). A Brief Introduction to Graphical Models and Bayesian Networks (1998).
- [Klet97] Kletz, T. A. Hazop – past and future. Reliability Engineering and System Safety, 55:263-266 (1997).
- [Koll99] KOLLER (G.). Risk assessment and Decision Making in Business and Industry. A Practical Guide. CRC Press LCC (1999).
- [Lade89] Ladet, P. Réseaux de Petri. Techniques de l'Ingénieur, R 7252 :1–17 (1989).
- [Lapr96] Laprie (J.C). Guide de la sûreté de fonctionnement, Cépaduès (1996).
- [Laro11] Laronde (R). Fiabilité et durabilité d'un système complexe dédié aux énergies renouvelables. Application à un système photovoltaïque. Thèse de Doctorat, ANGERS (2011).
- [Leco01] Le coz (E.). Méthodes et outils de la qualité. Outils classiques. Techniques de l'Ingénieur, AG 1 770 (2001).
- [Legro09] Dominique LEGROS. Maîtrise des risques dans les systèmes de transport : Proposition d'une nouvelle approche de modélisation dynamique. Thèse de Doctorat. Ecole nationale supérieure des mines de Paris (2009).
- [Lera06] Philippe Leray. Réseaux bayésiens : apprentissage et modélisation de systèmes complexes. Dans Soutenance Habilitation à Diriger les Recherches (2006).
- [Maal03] Maalej M. Delcroix V. et Piechowiak S. Les réseaux bayésiens pour la recherche des diagnostics. PENTOM 2003 – Performances et Nouvelles Technologies en maintenance, Valenciennes, France, PP 315-327, Presses Universitaires de Valenciennes. ISBN 2 (2003).
- [Math02] MATHERON (J.P.). Comprendre Merise : outils conceptuels et organisationnels. Éditions Eyrolles (2002).
- [Mazo08] Mazouni (MH). Pour une Meilleure Approche du Management des Risques : De la Modélisation Ontologique du Processus Accidentel au Système Interactif d'Aide à la Décision. Thèse de Doctorat, Nancy (2008).
- [Mél01] MÉLÉARD (S.). Probabilités. Concepts fondamentaux. Techniques de l'Ingénieur, AF 166 (2001).
- [Mich11] Michael G. Lenné, Christina M. Rudin-Brown, Jordan Navarro, Jessica Edquist, Margaret Trotter, Nebojsa Tomasevic, Driver behaviour at rail level crossings: Responses to flashing lights, traffic signals and stop signs in simulated rural driving. Applied Ergonomics 42 pages 548 -554 (2011).
- [Miha07] Mihalache A.G. Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarqué. Thèse de Doctorat, ANGERS (2007).
- [Moig94] Le Moigne (J.L.). La théorie du système général, théorie de modélisation (4ème édition). Paris, ISBN 2-13-046515-3 (1994).

- [Moig99] LE MOIGNE (J.L.). La modélisation des systèmes complexes. Éd. Dunod, Paris (1999).
- [Mont08] Montani S, Portinale L, Bobbio A, Codetta-Raiteri D. RADYBAN: a tool for reliability analysis of dynamic FTs through conversion into dynamic Bayesian networks. *Journal of Reliability Engineering and System Safety*. 93:922–32 (2008).
- [Mort01] MORTUREUX (Y.). La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques. *Techniques de l'Ingénieur* (2001).
- [Mort02] MORTUREUX (Y.). Arbres de défaillance, des causes et d'événement. *Techniques de l'Ingénieur*, SE 4 050 (2002).
- [Mort02-2] MORTUREUX (Y.). Analyse préliminaire de risques. *Techniques de l'Ingénieur*, SE 4 010 (2002).
- [Naim04] Patrick Naim, Pierre-Henri Wullemmin, Philippe Leray, Olivier Pourret, et Anna Becker. – Réseaux bayésiens ,2ème édition. Eyrolles (2004).
- [NF EN 50126]. Applications ferroviaires : Spécification et démonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité (FDMS). Paris: AFNOR (2000).
- [NF EN 61508]. Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques et électroniques programmables relatifs à la sécurité. Paris: AFNOR (1998).
- [NF EN 61508]. Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques et électroniques programmables relatifs à la sécurité. Paris: AFNOR (1998).
- [Noye02] NOYES (D.). Approche analytique par espace d'états : Markov. *Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement des Systèmes de Production*, Collection IC2, Hermès (2002).
- [Noye07] NOYES (D.) et PERES (F.). Analyse des systèmes : sûreté de fonctionnement. *Techniques de l'Ingénieur*, [AG 3 520] (2007).
- [Oliv05] François, O. et Leray, P. Bayesian network structural learning and incomplete data. *The International and Interdisciplinary Conference on Adaptive Knowledge Representation and Reasoning (AKRR 2005)*, pages 33–40 (2005).
- [Oliv06] François Olivier. De l'identification de structure de réseaux bayésens à la reconnaissance de formes à partir d'informations complètes ou incomplètes. Thèse de Doctorat - l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen (2006).
- [ONCF09] Communiqué de l'ONCF du 15 décembre (2009).
- [ONCF87] ONCF – Cours de formation des chefs de districts Passage à Niveau (1987).
- [Page80] Pagès, A. et Gondran, M. Fiabilité des systèmes. Eyrolles, Paris (1980).
- [Pear00] Judea Pearl. – *Causality : Models, Reasoning, and Inference*, Cambridge University Press (2000).
- [Pear86] Pearl, J. "Fusion, Propagation, and Structuring in Belief Networks," *Artificial Intelligence*, Vol. 29 (1986).
- [Pear88] Judea Pearl. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems : Networks of Plausible Inference*. Morgan Kaufmann Publishers (1988).

- [Pear91] Judea Pearl and Tom Verma. A theory of inferred causation. In James Allen, Richard Fikes, and Erik Sandewall, editors, KR'91 : Principles of Knowledge Representation and Reasoning, pages 441- 452, San Mateo, California, Morgan Kaufmann (1991).
- [Pear97] Pearl, J. – Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems : Networks of Plausible Inference. Morgan Kaufmann, 2nd edition (1997).
- [Poir92] POIRIER (J.). – Table statistiques. Techniques de l'Ingénieur, R 270 (1992).
- [Proc96] Procaccia (P) et Morilhat (P). Fiabilité des structures des installations industrielles. Théorie et Applications de la mécanique probabiliste (1996).
- [Raus04] Rausand M. et Hoyland A. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods and Applications (2nd ed). Wiley series in probability and statistics. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-47144-X (2004).
- [Rido99] RIDOUX (M.). AMDEC – Moyens Techniques de l'Ingénieur, AG 4 220 (1999).
- [Robi77] Robinson, R. W. Counting unlabeled acyclic digraphs. Dans Little, C. H. C. (Ed.), Combinatorial Mathematics V, volume 622 of Lecture Notes in Mathematics, (pp. 28–43)., Berlin. Springer. 14, 64 (1977).
- [Robo93] ROBOAM (M.). La méthode Grai. Principes, outils, démarche et pratiques. Éditions Teknea (1993).
- [Rosn75] De Rosnay J. Le Macroscopie, vers une vision globale. Paris, le Seuil. ISBN 2-02-004567-2 (1975).
- [Royer09] ROYER Michel. Analyse HAZOP : une méthode d'analyse des risques. Techniques de l'Ingénieur, SE 4 030- SE 4 031- SE 4 032 (2009).
- [SELC08] SELCAT-D3. Report on Risk Modelling Techniques for level crossing risk and system safety evaluation (2008).
- [SELC08] SELCAT–Safer European Level Crossing Appraisal and Technology–D15–Final Report for Publication–September (2008).
- [SETRA08] SETRA, Amélioration de la sécurité aux passages à niveau (Adaptation de l'infrastructure et de la signalisation routière) (2008).
- [Shen09] Zhu Sheng-xue, Lu Jian, Xiang Qiao-jun, Yan Linli. Intersection Safety Evaluation Method Based on bayesian Network, International Conference on Measuring Technomogy and Mechatronics Automation, IEEE -234-237 (2009).
- [Sign05] Signoret (J.P). Analyse des risques des systèmes dynamiques : approche markovienne. Techniques de l'Ingénieur, SE 4 071 (2005).
- [Sign08] Signoret (J.P). Analyse des risques des systèmes dynamiques : réseaux de Petri - Principes. Techniques de l'Ingénieur, SE 4 072 (2008).
- [Simo10] Joe Simon, Clive Roberts. Using functional analysis to determine the requirements for changes to critical systems: Railway level crossing case study, Reliability Engineering and System Safety 95 216-225 (2010).
- [Spir00] Peter Spirtes, Clark Glymour, and Richard Scheines. Causation, Prediction, and Search, The MIT Press, 2nd edition (2000).

- [Spir93] Peter Spirtes, Clark Glymour, and Richard Scheines. Causation, prediction, and search. Springer-Verlag (1993).
- [Terr05] TERRIER (F.) et GÉRARD (S.). UML pour le temps réel : le langage et les méthodes. Techniques de l'Ingénieur, S 8 070 (2005).
- [Todd03] Todd A. Stephenson. An introduction to Bayesian network theory and usage, IDIAP-RR 00-03 (2003).
- [Todd03] Todd A. Stephenson. An introduction to Bayesian network theory and usage, IDIAP-RR 00-03 (2003).
- [Tram08] Tramway de Rabat-Salé. Dossier de présentation (2008).
- [Verr07] Sylvain VERRON. Diagnostic et surveillance des processus complexes par réseaux bayésiens, Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale d'ANGERS (2007).
- [Vese81] VESELY (W.E.), GOLDBERG (F.F.), ROBERTS (N.H.) et HAASL (D.F.). Fault tree Handbook. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, USA (1981).
- [Vill88] VILLEMEUR (A.). Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité, facteurs humains, informatisation. Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France. Éd. Eyrolles, Paris (1988).
- [Wall77] WALLISER (B.). Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse de systèmes. Éditions du Seuil (1977).
- [Wash06] Simon Washington, Jutae Oh, Bayesian methodology incorporating expert judgment for ranking countermeasure effectiveness under uncertainty: Example applied to at grade railroad crossings in Korea, Accident Analysis and Prevention 38 - 234–24 (2006).
- [Xued10] Xuedong Yan, Stephen Richards, Xiaogang Su. Using hierarchical tree-based regression model to predict train-vehicle crashes at passive highway-rail grade crossings, Journal of Accident Analysis and Prevention 42 - 64-74 (2010).
- [Yehe05] Yehezkel, R. et Lerner, B. Recursive autonomy identification for bayesian network structure learning. The 10th International Workshop on Artificial Intelligence and Statistics, AISTATS 2005, pages 429–436 (2005).
- [Zwin99] ZWINGELSTEIN (G.). Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes – Analyse prévisionnelle et bases de données de fiabilité. Techniques de l'Ingénieur, S 8251 (2009).

Résumé

Le développement de transport ferroviaire en milieu urbain ou non urbain, s'accompagne évidemment d'une amélioration continue de la sécurité, qui reste une des préoccupations principales dans ce domaine de transport, où les accidents continuent à engendrer d'importants dégâts, et causer un nombre élevé de victimes.

La maîtrise des risques du transport ferroviaire, implique d'une part l'identification et la prévision des risques, et d'autre part, la réduction de ces risques en agissant sur les moyens de diminution de leurs occurrences, leurs gravités, l'atténuation de leurs conséquences grâce à des moyens d'évitement et de protection contre les risques.

Dans ce contexte, le présent travail de cette thèse vise à développer un outil d'évaluation et d'analyse des risques au niveau des Passages à Niveau du réseau ferroviaire de l'ONCF (Office National des Chemins de Fer) qui comporte 521 Passages à Niveau dont 80% environ ne sont pas gardés, ainsi que celui du réseau ferroviaire du Tramway à l'agglomération de Rabat/Salé, qui s'étend sur 20 km et dont l'insertion urbaine n'a pas été sans effet sur la ville, car les accidents entre le Tramway et les usagers de la route qu'ils soient des piétons ou des véhicules, continuent à avoir lieu et on enregistre une dizaine d'accidents par mois de différentes gravités.

L'analyse des risques de ces deux systèmes est basée en premier lieu sur des études fonctionnelles et dysfonctionnelles de ces deux systèmes, puis en second lieu sur une modélisation des risques par Réseaux Bayésiens. En effet, l'approche Bayésienne dans l'évaluation des dysfonctionnements et la quantification des risques encourus, constitue une approche d'analyse permettant la prise en compte des aspects comportemental et temporel du système (événements liés aux facteurs humain ou matériel, événements aléatoires des accidents, conséquences non maîtrisées des accidents etc.). Ce modèle de risque proposé permet aussi d'établir une prévision des risques à partir des données recueillies du passé (Retour d'EXpériences).

MOTS-CLÉS : Sûreté Ferroviaire ; Passage à Niveau; Tramway ; Risque ; Réseaux Bayésiens.

Summary

The development of railway in urban and non urban, is accompanied by recess continuous improvement of safety, which remains a primary concern in this area of transport, where accidents continue to cause significant damage, and cause a large number of victims.

The control of risks of rail transport implies firstly the identification and prediction of risk, and secondly, reducing these risks by acting on ways to decrease their occurrence, their severity, mitigating their consequences by means of avoidance and protection against risks.

In this context, the present work of this thesis is to develop an assessment tool and risk analysis at Level Crossings of the Moroccan railway network, which has 521 level crossings with about 80% are not guarded, and the railway network of tram in the cities of Rabat/Salé, which extends on 20 km and which its urban integration has not been without effect on the city, because accidents between the tram and road users whether pedestrians or vehicles, continue to occur and recorded about ten accidents per month of varying severity.

The risk analysis of these two systems is based primarily on the functional and dysfunctional studies, then secondly on risk modelling by Bayesian Networks. In fact, the Bayesian approach in evaluating dysfunctions and quantification of the risks constitutes an analysis approach allowing taking into account the behavioural and temporal aspects of the system (events related to human factors or equipment, of random events of accidents, uncontrolled consequences of accidents etc.). The risk model proposed also allows for a risk prediction based on data collected from the past (feedback).

KEYWORDS: Railway security; Level Crossing; Tram; Risk; Bayesian Networks.