

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Mémoire de Master pour l'obtention du diplôme de Master
Filière : QHSE-GRI

**Evaluation de la fiabilité des systèmes
complexes**

MOULOUDI Lamia

Sous la direction de : M. A. KERTOUS Maitre-assistant

M. M. OUADJAOUT Maitre-assistant

Présenté et soutenu publiquement le 22/06/2016

Composition du Jury :

Président	Mme S.ZEBOUDJ	Professeur	ENP
Rapporteur 1	M. A.KERTOUS	Maitre-assistant	ENP
Rapporteur 2	M. M.OUADJAOUT	Maitre-assistant	ENP
Examineur 1	Mme. N.OUSSEDIK	Maitre-assistant	ENP
Examineur 2	M. M.BOUSBAL	Maitre-assistant	ENP

ENP-2016-

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Mémoire de Master pour l'obtention du diplôme de Master
Filière : QHSE-GRI

Evaluation de la fiabilité des systèmes complexes

MOULOUDI Lamia

Sous la direction de : M. A. KERTOUS

Maitre-assistant

M. M. OUADJAOUT

Maitre-assistant

Présenté et soutenu publiquement le 22/06/2016

Composition du Jury :

Président	Mme S. ZEBODJ	Professeur	ENP
Rapporteur 1	M. A. KERTOUS	Maitre-assistant	ENP
Rapporteur 2	M. M. OUADJAOUT	Maitre-assistant	ENP
Examineur 1	Mme. N. OUSSEDIK	Maitre-assistant	ENP
Examineur 2	M. M. BOUSBAI	Maitre-assistant	ENP

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تقييم واحدا من اهم المعايير من اجل أنشأ نظم الامن وهو الموثوقية يتم تقييم الموثوقية مع الأخذ في الاعتبار تصميم النظم. درسنا التصميم البسيط القائم على الطرق الموضحة في CEI 61508 و 615011. ثم درسنا تصميم معقد عن طريق إدخال اثنين من المفاهيم الجديدة التي هي نظريات الرسوم البيانية وشبكات المصادقية. بعد ذلك طبقنا أساليب مختلفة على نظام مستمد من تركيب محطة توليد الكهرباء حمة الثاني. أخيرا قارنا إنجازاتهم وأعطينا رأينا فيما يتعلق باستخدامها.

الكلمات المفتاحية: الموثوقية, نظرية الرسم البياني, شبكات المصادقية, SIS, CEI 615011

Abstract

The aim of this work is to evaluate the reliability of any instrumented system of safe by considering their architectures that represent one of the most important criteria for their construction and implementation. We studied the simple architectures by using the methods described in the standards the CEI 615011 and 61508. We studied the complexes systems by introducing two new concepts that are graph theory and networks of reliabilities. We made their application in one SIS implemented in the installation of electrical power Hamma II to compare their realization and to give our opinion in their utilization express an opinion on their use.

Key words: SIS, Norm CEI 61511, Reliability, networks of reliabilities, graph theory

Résumé

L'objectif de ce travail est d'évaluer la fiabilité des systèmes instrumentés de sécurité en se basant sur leurs architectures qui représente l'un des critères les plus importants pour leur construction et mise en place. Nous avons étudié les architectures simples en se basant sur les méthodes décrites dans les normes CEI 615011 et 61508 et celle complexes en introduisant deux nouveaux concepts qui sont théories des graphes et des réseaux de fiabilités. Leur application s'est fait sur un système tiré de l'installation de la centrale électrique Hamma II afin de comparer leurs réalisations et ainsi donner un avis sur leur utilisation.

Mots-Clés : SIS, Norme CEI 61511, Fiabilité, Réseaux de fiabilité, Théorie des graphes.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mon frère Nacim

A Ma mère et Mon père

A tous mes amis

Lamia

Remerciements

Le présent travail a été effectué au sein de la Centrale Electrique Hamma II sous la responsabilité de M. Samir KACI, responsable HSE. Nous tenons à lui adresser mes sincères remerciements ainsi qu'à l'ensemble du personnel des deux départements HSE et exploitation pour leur disponibilité et leurs efforts qui m'ont permis de réaliser ce travail.

J'exprime toute notre gratitude à mes deux encadreurs académiques, M. A. KERTOUS, Enseignant à l'ENP, et M. M. OUADJAOUT, Enseignant Chercheur à l'ENP et Directeur du Cycle Préparatoire –ENP, pour le privilège qu'ils m'ont fait en dirigeant mon Master et pour le suivi continu pour l'aboutissement de ce projet. Leur intérêt, leur soutien et leurs compétences ont été un atout indispensable pour l'accomplissement de mon travail.

J'aimerais aussi remercier les membres du jury, en premier, Mme Zeboudj, Professeur à l'ENP et Responsable de la Filière QHSE-GRI, qui m'a fait l'honneur de présider ce Jury, Mme Oussedik et M. Bousbai, enseignants à l'ENP, qui ont bien voulu accepter d'examiner et de juger ce travail.

Nous adressons nos remerciements au corps professoral de la Filière QHSE-GRI qui nous ont guidés durant ces 3 dernières années, pour leur dévouement à accomplir leur devoir.

Enfin, un grand merci à tous nos amis pour leurs sincères encouragements et nos familles pour leur soutien.

Tables des matières

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Nomenclature	
Liste des tableaux	9
Liste des figures	10
Liste des abréviations	11
Nomenclature	12
Introduction générale.....	11
Chapitre 1 : Méthodes d'évaluation de la fiabilité.....	12
Introduction	13
1.1. Termes et définitions.....	13
1.1.1. Notion de danger	13
1.1.2. Notion de risque	13
1.1.3. Notion de sécurité.....	14
1.1.4. Sécurité fonctionnelle	14
1.2. Normes relatives à la sécurité fonctionnelle	15
1.2.1. Norme CEI 61508	15
1.3. Systèmes instrumentés de sécurité (SIS)	17
1.3.1. Composants d'un Système instrumenté de sécurité.....	17
1.3.2. Intégrité de sécurité d'un SIS.....	18
1.3.3. Performance d'un système instrumenté de sécurité	18
1.3.4. Classification des défaillances selon leurs effets sur la fonction de sécurité	20

1.4.	Evaluation de la fiabilité des systèmes instrumentés de sécurité.....	22
1.4.1.	Les équations simplifiées.....	22
1.4.2.	Bloc diagramme de fiabilité	23
1.5.	Théorie des graphes et réseaux de fiabilité	26
1.5.1.	Théorie des graphes	26
1.5.2.	Réseaux de fiabilité.....	27
1.6.	Evaluation de la fiabilité des systèmes complexes	29
1.6.1.	Technique de la table de vérité booléenne :.....	29
1.6.2.	Méthode d'inclusion-exclusion :	31
Chapitre 2 : Application.....		32
Introduction		33
2.1.	Présentation de l'organisme d'accueil.....	33
2.1.1.	Présentation du groupe SONELGAZ	33
2.1.2.	Activités du groupe SONELGAZ.....	33
2.1.3.	La centrale électrique Hamma II	34
2.2.	Application des méthodes de calcul de fiabilité.....	37
2.2.1.	Application des équations simplifiées	37
2.2.2.	Application de la méthode du bloc diagramme de fiabilité.....	39
2.2.3.	Application de la technique de la table de vérité booléenne	40
2.2.4.	Application de la méthode d'inclusion exclusion.....	42
Conclusion générale		44
Références bibliographiques		45
Annexe		47

Liste des tableaux

Tableau 1 Les niveaux de SIL en fonction du mode de sollicitation	19
Tableau 2 équations mathématiques des différentes architectures.....	23
Tableau 3 schéma des structure simple d'un SIS.....	25
Tableau 4 Exemple de table de vérité	30
Tableau 5 les données utilisées	38
Tableau 6 calcul des PFD_{avg} pour chaque architecture d'un sous-système du SIS et chaque taux DC	38
Tableau 7 Calcul de la fiabilité et du PFD_{avg} du SIS pour chaque taux DC.....	38
Tableau 8 Fiabilité et PFD_{avg} de chaque composant	39
Tableau 9 Probabilité de defaillance et fiabilité des composants.....	41
Tableau 10 Table de vérité	41

Liste des figures

Figure 1 Courbe de FARMER (Farmer.F.R, 1967)	14
Figure 2 Les normes sectorielles de la CEI 61508	16
Figure 3 Schéma d'un SIS (Mkhida, 2009)	17
Figure 4 Répartition des défaillances et de leurs taux selon la norme CEI 61508	20
Figure 5 Graphe orienté.....	26
<i>Figure 6 Exemple de schéma de connexion et de son réseau de fiabilité</i>	<i>27</i>
<i>Figure 7 Exemple d'un réseau de fiabilité</i>	<i>28</i>
Figure 8 Diagramme de fiabilité	30
Figure 9 Système d'arrêt d'urgence	37
Figure 10 Configuration du SIS après optimisation	40
Figure 11 Réseau de fiabilité de la structure optimisée du système d'arrêt d'urgence	40
Figure 12 Représentation éclatée du réseau de fiabilité du système d'arrêt d'urgence	43

Liste des abréviations

CEI	International Electrotechnical Commission
DC	Diagnostic Coverage
HSE	Hygiène, Sécurité et Environnement
ISO	International Organization for Standardization
MDS	Méthode du Diagramme de Succés
MRT	Mean Repair Time
MTTR	Mean Time To Restoration
OFAF	Oil Forced- Air Forced
OHSAS	British Standard Occupational Health and Safety Advisory Services
PDF	Probability a Dangerous Failure
PDF_{avg}	Average Probability of Failure on Demand
PFH	Probability of a dangerous Failure per Hour
RRF	Risk Reduction Factor
SIF	Safety Instrumented Function
SIL	Safety Integrity Level
SONELGAZ	Société Nationale de l'Electricité et du Gaz

Nomenclature

λ	Taux de défaillance aléatoire
λ_S	Taux de défaillance aléatoire en sécurité du matériel
λ_D	Taux de défaillance aléatoire dangereuse du matériel
λ_{DD}	Taux de défaillance dangereuse détectée
λ_{DU}	Taux de défaillance dangereuse non détectée
λ_{SD}	Taux de défaillance sûre détectée
λ_{SU}	Taux de défaillance sûre non détectée
β	Facteur défaillances de cause commune
R_S	Fiabilité du système

Introduction générale

L'évaluation de la fiabilité d'une barrière de sécurité technique est une étape très importante pour garantir son adéquation aux exigences émises après une étude d'analyse des risques. Ce critère a fait l'objet de plusieurs normes afin d'aider les constructeurs ainsi que les fiabilistes à définir la meilleure architecture. C'est ce qui fera l'objet de la première partie de notre travail.

Les méthodes décrites dans les normes internationales ne traitent que des structures simples des barrières techniques de sécurité. Elles ne tiennent pas compte du fait qu'ils peuvent y avoir des structures complexes qui représentent les solutions adéquates et optimales

Mais les méthodes décrites sont destinées seulement aux structures simples des barrières techniques, donc ils ne tiennent pas compte du fait qu'ils peuvent avoir des structures complexes qui représentent les solutions optimales et adéquates. Afin de pallier à cette insuffisance, plusieurs travaux de recherche ont tenté de proposer des méthodes permettant d'évaluer la fiabilité des systèmes complexes. Elles se basent sur la théorie des graphes et du concept de réseau de fiabilité qui nous permettent d'évaluer le critère de sécurité des barrières de sécurité et ainsi atteindre un double objectif qui est l'optimisation de l'architecture structurelle des barrières en termes d'exigence de sécurité et du coût.

Chapitre 1 : Méthodes d'évaluation de la fiabilité

Introduction

Les industries doivent mettre en place des barrières de sécurité pour réduire les risques, en se basant sur une démarche d'analyse des risques. Cette dernière nous permet de définir les exigences sur la performance que les barrières doivent avoir afin qu'elles puissent rendre les risques acceptables.

Dans la première partie nous allons définir les concepts liés à la gestion des risques ainsi que les barrières techniques de sécurité qu'on retrouve dans les installations industrielles. Par la suite, nous allons présenter les différentes normes relatives à ces notions.

La deuxième partie du chapitre sera consacrée aux méthodes proposées par les normes internationales afin d'évaluer la fiabilité pour les systèmes simples et d'autres, retrouvées dans la littérature, destinées aux systèmes complexes.

1.1. Termes et définitions

1.1.1. Notion de danger

La norme IEC 61508 (IEC61508, 1998) définit le danger comme : « une nuisance potentielle pouvant porter atteinte aux biens (détérioration ou destruction), à l'environnement, ou aux personnes ».

Selon le référentiel OHSAS 18001 [OHSAS18001, 1999] : « un danger est une source ou une situation pouvant nuire par blessure ou atteinte à la santé, dommage à la propriété et à l'environnement du lieu de travail ou une combinaison de ces éléments ».

1.1.2. Notion de risque

Selon Villemeur (Villemeur, 1998): « le risque est une mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences. »

Cependant, il existe de nombreuses définitions pour caractériser le sens du mot risque, la définition suivante est celle que l'on rencontre souvent : « la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un dommage et la gravité de ce dernier » (ISO, 2002).

Le terme combinaison est généralement matérialisé par une opération de multiplication, ce qui nous permet la formulation suivante :

$$\text{Risque (R)} = \text{Probabilité (P)} \times \text{Gravité (G)}. \quad (1.1)$$

La représentation graphique (figure 1) de cette relation est une droite ou une courbe décroissante. Elle dérive de la courbe dite de Farmer (LIEVENS, 1976) qui illustre les relations existant entre la gravité et la probabilité d'un risque, avec les variations qui découlent du traitement de ce risque.

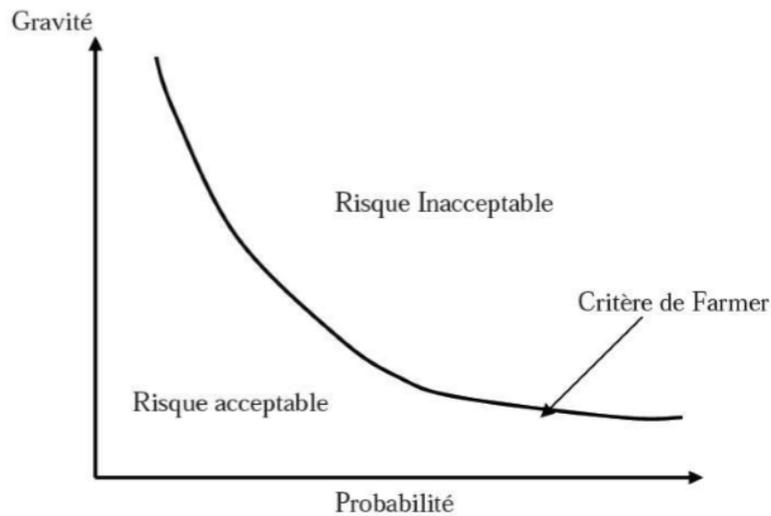


Figure 1 Courbe de FARMER (Farmer.F.R, 1967)

1.1.3. Notion de sécurité

La sécurité est généralement définie par l'absence de phénomènes dangereux, de risque inacceptable, d'accident ou de situations catastrophiques. D'après le guide ISO (ISO, 2002), la sécurité est " l'absence de risque inacceptable, de blessure ou d'atteinte à la santé des personnes, directement ou indirectement, résultant d'un dommage au matériel ou à l'environnement. ".

La sécurité d'un système peut être définie en termes d'aptitude : " La sécurité d'un système est son aptitude à fonctionner ou à dysfonctionner sans engendrer d'événement redouté à l'encontre de lui-même et de son environnement, notamment humain." (F.INNAL, 2008)

Dans le cadre des systèmes industriels, la sécurité consiste à mettre en œuvre des moyens évitant l'apparition de dangers. Elle s'énonce par l'absence de risque inacceptable (IEC61508, 1998).

1.1.4. Sécurité fonctionnelle

La sécurité fonctionnelle a pour objet de contrôler les risques inacceptables qui pourraient provoquer des accidents dangereux. Elle couvre les systèmes mettant en œuvre des solutions de protection appliquées dans plusieurs domaines. Elle est définie selon la norme IEC 61508 (IEC61508, 1998) par « un sous ensemble de la sécurité globale qui se rapporte au système commandé et qui dépend du bon fonctionnement des systèmes relatifs à la sécurité basée sur une autre technologie et des dispositifs externes de réduction de risque.

1.2. Normes relatives à la sécurité fonctionnelle

La norme internationale de sécurité IEC 61508 est une des dernières normes dédiées à la sécurité fonctionnelle. Elle est devenue avec ses normes filles les plus récentes et les plus connues des acteurs de la sécurité dans les secteurs industriels.

1.2.1. Norme CEI 61508

C'est une norme internationale qui a été conçue comme une norme générique contenant un ensemble d'informations et de lignes directrices visant à l'amélioration de la sécurité via l'utilisation des systèmes électriques, électroniques programmables E/E/PE que sont les SIS. Elle propose une démarche opérationnelle permettant de mettre en place un système E/E/PE à partir de l'étude des exigences de sécurité issues notamment d'une analyse et d'une évaluation des risques.

La norme CEI 61508 [38] se compose de sept volets comme suit :

- 61508-1 présente les définitions des prescriptions générales.
- 61508-2 traite les prescriptions spécifiques aspect matériel des systèmes E/E/EP.
- 61508-3 dédiée à la présentation des prescriptions spécifiques, aspect logiciel, des systèmes E/E/EP. Elle est développée dans la troisième partie de norme.
- 61508-4 présente les définitions et les abréviations utilisées.
- 61508-5 donne des exemples de méthode pour la détermination des niveaux d'intégrité de sécurité.
- 61508-6 fournit les guides d'application des parties 2 et 3 de la norme.
- 61508-7 présente les techniques et les mesures recommandées lors de la validation des systèmes E/E/EP.

Mais la complexité de la norme CEI 61508 a conduit ses concepteurs à développer des normes relatives à des secteurs bien précis (ex : machines, processus industriels, ferroviaire, centrales nucléaires . . .).

La figure 2 montre la norme CEI 61508 générique ainsi que ses normes filles selon le secteur d'activité concerné.

Chapitre 1

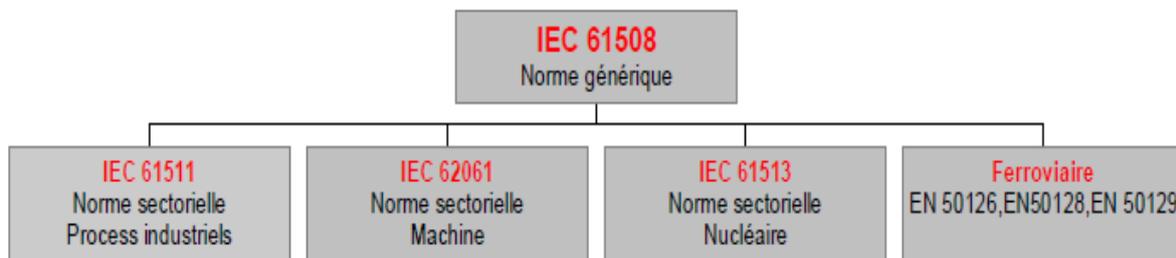


Figure 2 Les normes sectorielles de la CEI 61508

- Norme CEI 61511

La CEI 61511 (CEI 61511, 2003), s'intéresse à la sécurité fonctionnelle des SIS pour le secteur de l'industrie des procédés continus. Cette norme est composée de trois grandes parties

- 61511-1 présente les définitions et les exigences des systèmes (matériel et logiciel).
- 61511-2 traite les lignes directrices pour l'application de la première partie de la norme.
- 61511-3 fournit des conseils pour la détermination des niveaux d'intégrité de sécurité.

La CEI 61511 (IEC61508, 1998) détaille les définitions et les prescriptions relatives à la conception, l'exploitation et la maintenance d'un système instrumenté de sécurité, afin de maintenir le procédé dans une position de sécurité convenable.

La CEI 61508 est une norme complexe, difficile à mettre en œuvre, elle est destinée surtout aux fabricants et fournisseurs de systèmes E/E/EP, alors que la norme CEI 61511 est plus facile à utiliser, elle présente une simplification de la CEI 61508, en se limitant aux éléments nécessaires pour l'industrie de process (M.Sallak, 2007).

- Norme CEI 62061

La CEI 62061 est destinée à être utilisée par les concepteurs de machines et les fabricants de systèmes de commande électroniques relatifs à la sécurité de machines. Elle concerne la spécification des prescriptions et fait des recommandations pour la conception, l'intégration et la validation de ces systèmes (W.MECHRI, 2011).

- Norme CEI 61513

La CEI 61513 (CEI61513, 2001) concerne le secteur de la sûreté des centrales nucléaires. Elle présente les prescriptions relatives aux systèmes de contrôle commande utilisés pour accomplir les fonctions de sécurité des centrales nucléaires. La conception des systèmes de contrôle commande peuvent être réalisés à l'aide d'une combinaison de composants traditionnels câblés à des composants informatiques. La conformité à la CEI 61513 facilite la compatibilité avec les exigences de la CEI 61508 telles qu'elles ont été interprétées dans l'industrie nucléaire.

- Norme EN 50126

La norme EN 50126 (EN50126, 1999) s'intéresse essentiellement aux applications ferroviaires. Elle permet de spécifier les principaux concepts de la sûreté de fonctionnement des systèmes tels que : la fiabilité, la disponibilité et la sécurité, etc. Cette norme est constituée de deux normes filles. L'EN 50128 est destinée à la partie logicielle des systèmes de protection ferroviaire. L'EN 50129 (EN50129, 1998) concerne les systèmes électroniques de sécurité pour la signalisation.

1.3. Systèmes instrumentés de sécurité (SIS)

Selon la norme CEI 61511 (CEI 61511, 2003), le système instrumenté de sécurité (SIS) est l'ensemble de matériels utilisés pour mettre en œuvre une ou plusieurs fonctions instrumentées de sécurité.

Tel qu'une fonction de sécurité est une fonction ayant pour but la réduction de la probabilité d'occurrence et/ou des effets et conséquences d'un événement non souhaité dans un système.

Les principales actions assurées par les fonctions de sécurité en matière d'accidents majeurs dans les installations classées sont (Sklet, 2005): empêcher, éviter, détecter, contrôler, limite.

Un système instrumenté de sécurité vise à mettre le procédé en un état stable ne présentant pas de risque pour l'environnement et les personnes lorsque le procédé s'engage dans une voie comportant un risque réel pour le personnel et l'environnement (explosion, feu...). (Mkhida, 2009)

1.3.1. Composants d'un Système instrumenté de sécurité

Ils se composent de n'importe quelle combinaison de capteur (s), d'unités logique (s) et d'élément (s) terminal (aux) (figure 3).

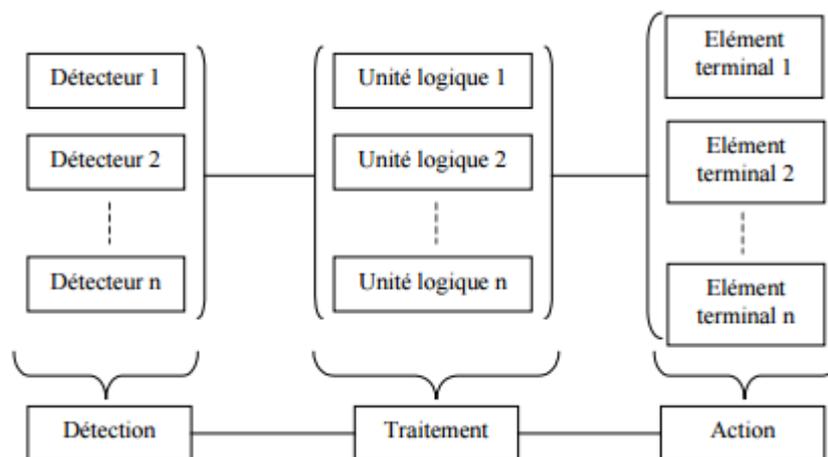


Figure 3 Schéma d'un SIS (Mkhida, 2009)

Chapitre 1

- *Détecteur* : Cette sous-fonction de sécurité peut être assurée par différents détecteurs de paramètres (pression, température, débit, concentration...). Il est généralement constitué de 2 éléments un capteur et un transmetteur :
- *Traitement de l'information* : Cette fonction est principalement réalisée par des relais ou par des automates programmables. Elle peut se résumer simplement à acquérir une grandeur mesurée par un capteur et à l'indiquer. Elle peut aussi consister à activer la commande d'un ou plusieurs actionneurs à partir d'une fonction combinatoire des informations délivrées par différents capteurs. Les unités de traitement peuvent être classées en deux catégories selon leur technologie : les technologies câblées et les technologies programmées
- *Actionneur* : Cette sous-fonction est réalisée par des actionneurs et des éléments terminaux. Les actionneurs transforment un signal (électrique, pneumatique ou hydraulique) en phénomène physique qui permet de commander le démarrage d'une pompe, la fermeture ou l'ouverture d'une vanne...

Remarque

L'unité de traitement est reliée aux capteurs et aux actionneurs par des moyens de transmission. Il peut s'agir de câbles électriques, d'ondes électromagnétiques (transmission hertzienne), de fibres optiques (bus de terrain) ou de tuyauteries (transmissions pneumatique ou hydraulique).

1.3.2. Intégrité de sécurité d'un SIS

La norme CEI 61508 (IEC61508, 1998) la définit comme suit : "probabilité pour qu'un système relatif à la sécurité (SRS) exécute de manière satisfaisante les fonctions de sécurité requises dans toutes les conditions spécifiées et pour une période de temps spécifiée". Elle indique également que cette définition est centrée sur la fiabilité des SRS dans l'exécution de leurs fonctions de sécurité.

Les prescriptions concernant l'intégrité de sécurité des fonctions de sécurité à allouer aux SIS sont spécifiées en termes de niveau d'intégrité de sécurité (SIL) : niveau discret parmi quatre possibles, le SIL 4 possède le plus haut degré d'intégrité de sécurité. Sa détermination dépend du mode de fonctionnement du SIS. Ce point est évoqué dans ce qui suit

1.3.3. Performance d'un système instrumenté de sécurité

La performance d'une fonction instrumentée de sécurité associée à un SIS se mesure en terme de probabilité de défaillance sur demande (PFD) sur une période donnée que l'on qualifie par un niveau de SIL (*Safety Integrity Level*).

Chapitre 1

Tel que

- Le SIL d'une fonction de sécurité est le niveau de réduction du risque qu'elle apporte.
- La Probabilité moyenne de défaillance sur demande PFD est la probabilité que le système ne puisse pas exécuter la fonction pour laquelle il a été conçu au moment où la demande de cette fonction est faite. C'est un nombre sans dimension. Il existe deux types de PFD en fonction du mode de sollicitation
 - PFDavg la moyenne de la probabilité de défaillance à la demande est évaluée à partir de l'architecture d'un du système instrumenté de sécurité réalisant la fonction instrumentée de sécurité faiblement sollicité. Le mode de fonctionnement à faible sollicitation est considéré lorsque la fréquence de demande n'est pas plus grande qu'une par an.
 - PFH la probabilité de défaillance dangereuse par heure est évaluée à partir de l'architecture du SIS réalisant la FIS fortement sollicité. Le mode de fonctionnement à forte sollicitation il est considéré lorsque la fréquence de demande est élevée, plus grande qu'une par ans

La norme IEC 61508 (IEC61508, 1998) définit les niveaux de SIL en fonction du mode de sollicitation des SIS comme le précise le tableau 1.

Tableau 1 Les niveaux de SIL en fonction du mode de sollicitation

Sollicitation	Faible	Elevée
SIL	<i>PFDavg</i>	Défaillance/heure
1	$[10^{-2}; 10^{-1}[$	$[10^{-6}; 10^{-5}[$
2	$[10^{-3}; 10^{-2}[$	$[10^{-7}; 10^{-6}[$
3	$[10^{-4}; 10^{-3}[$	$[10^{-8}; 10^{-7}[$
4	$[10^{-5}; 10^{-4}[$	$[10^{-9}; 10^{-8}[$

Sachant que :

$$Fiabilité = 1 - PFDavg \quad (1.2)$$

Donc plus le *PFDavg* est petit plus le SIS est grand et plus la fiabilité du système est importante.

1.3.4. Classification des défaillances selon leurs effets sur la fonction de sécurité

Toutes les défaillances, selon leurs effets, peuvent être classées dans l'une des deux catégories suivantes : défaillances en sécurité ou défaillances dangereuses.

Les définitions de ces deux catégories selon la norme CEI 61508 sont données ci-après :

- Défaillance dangereuse : « défaillance qui a la potentialité de mettre le système relatif à la sécurité dans un état dangereux ou dans l'impossibilité d'exécuter sa fonction ».
- Défaillance en sécurité : « défaillance qui n'a pas la potentialité de mettre le système relatif à la sécurité dans un état dangereux ou dans l'impossibilité d'exécuter sa fonction ».

Donc, une défaillance dangereuse est une défaillance qui tend à inhiber la fonction de sécurité en cas de demande émanant de l'équipement à protéger qui sera alors dans un état dangereux.

Une défaillance sûre est une défaillance intempestive qui tend à anticiper le déclenchement de la fonction de sécurité, en l'absence de toute demande, en conduisant effectivement l'équipement à protéger dans un état sûr. C'est-à-dire tel que l'occurrence de tout événement dommageable n'y est plus possible.

Compte tenu de cette décomposition, le taux de défaillance aléatoire du matériel (λ) comporte deux composantes :

$$\lambda = \lambda_S + \lambda_D \quad (1.3)$$

- λ_S : taux de défaillance aléatoire en sécurité du matériel,
- λ_D : taux de défaillance aléatoire dangereuse du matériel.

Une autre partition résulte du fait que ces défaillances peuvent être ou non détectées par des tests de diagnostic. Les premières sont dénommées défaillances détectées et les secondes, qui ne peuvent être révélées que lors des tests périodiques hors ligne ou lors de la sollicitation du SIS par le système surveillé, sont dénommées défaillances non détectées

La figure 4 résume cette double partition [IDDIR, 2009].

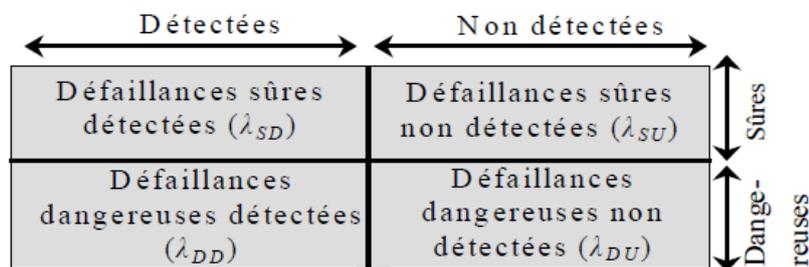


Figure 4 Répartition des défaillances et de leurs taux selon la norme CEI 61508

Chapitre 1

Donc Nous obtenons que :

$$\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU} \quad (1.4)$$

$$\lambda_S = \lambda_{SD} + \lambda_{SU} \quad (1.5)$$

Taux de couverture des tests de diagnostique

Chaque SIS nécessite des tests de diagnostic pour vérifier si la fonction de sécurité fonctionne toujours. L'expression "taux de couverture des tests de diagnostic" (généralement abrégé en DC) est utilisée pour caractériser l'efficacité des tests. Le DC n'est pas basé uniquement sur le nombre de composants pouvant présenter une défaillance dangereuse. Il prend en compte le taux total de défaillance dangereuse. ". DC exprime la relation entre les taux d'apparition des deux types suivants de défaillance dangereuse :

Cette couverture est exprimée par un nombre allant de 0 à 1, ou comme un pourcentage.

La norme EN/CEI 62061 divise DC en quatre plages de base :

<60 % = aucun

60 % à <90 % = faible

90 % à <99 % = moyen

+99 % = élevé

Par ailleurs, il existe des défaillances qui peuvent affecter simultanément tous les canaux constitutifs d'une architecture redondante : les défaillances de cause commune (DCC).

L'introduction des défaillances de mode commun est généralement modélisée par le facteur β qui varie de 0.5 à 5 %. Le choix de ce facteur est laissé à l'appréciation subjective de l'utilisateur

1.3.5. Architecture KooN d'un SIS

Les systèmes instrumentés de sécurité sont constitués en plusieurs architectures qui définissent leurs modes de fonctionnements. Dans ce qui suit nous donnons une description détaillée des différentes architectures *KooN* (*1oo1*, *1oo2*, *1oo3*, *2oo2* et *2oo3*) avec K le nombre de composants, sur N le nombre de composants total dans un sous-système, qui doivent être fonctionnels afin que le SIS soit fonctionnel.

- *1oo1* : Cette architecture comprend un seul élément, et toute défaillance dangereuse de cet élément empêche le traitement correct de tout signal d'alarme valide.
- *1oo2* : Cette architecture comprend deux éléments connectés en parallèle de façon que chacun puisse traiter la fonction de sécurité. Ainsi, il faudrait la défaillance dangereuse des deux éléments pour qu'un signal d'alarme valide ne soit pas traité correctement.
- *2oo2* : Cette architecture comprend deux éléments connectés en parallèle de sorte qu'il est nécessaire que les deux éléments demandent la fonction de sécurité avant que

celle-ci ne survienne. La défaillance dangereuse d'un seul élément empêche le traitement correct de tout signal d'alarme valide.

- 2oo3 : Cette architecture comprend trois éléments connectés en parallèle avec un dispositif à logique majoritaire pour les signaux de sortie de telle sorte que l'état de sortie n'est pas modifié lorsqu'un seul élément donne un résultat différent des deux autres éléments. Il faudrait la défaillance dangereuse des deux éléments pour qu'un signal d'alarme valide ne soit pas traité correctement.

1.4. Evaluation de la fiabilité des systèmes instrumentés de sécurité

Le calcul de la probabilité moyenne de défaillance (PFD_{avg}) du SIS permet de déterminer sa fiabilité et l'évaluation de cette performance est réalisée par l'utilisation de différentes méthodes quantitatives préconisées dans les annexes de la norme IEC 61508 [54]. Parmi ces méthodes, on trouve les équations simplifiées, les arbres de défaillances (Signoret.J.P, 2006), les blocs diagramme fiabilité, les réseaux de Pétri ainsi que les chaînes de Markov (Inna.F, 2008)

Dans ce qui suit, nous allons présenter les équations simplifiées ainsi que le bloc diagramme de fiabilité qui sont choisis dans le cadre de notre travail.

1.4.1. Les équations simplifiées

Les normes de sécurité fonctionnelle fournissent des formules approchées pour les architectures courantes. En se basant sur le fait que les performances probabilistes d'une fonction de sécurité, assurée par un SIS donné, sont déterminées par le calcul et la combinaison des performances de ses trois sous-systèmes (*capteurs(S) traitement logique(LS) actionneurs (FE)*). Cela peut être exprimé par les formules suivantes :

$$PFD_{avg}^{SIS} = PFD_{avg}^S + PFD_{avg}^{LS} + PFD_{avg}^{FE} \quad (1.6)$$

Bien évidemment, chacun de ces trois sous-systèmes est représenté par une architecture *KooN*.

Les différentes formules mathématiques retrouvées dans la littérature pour les architectures *KooN* usuelles sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 Equations mathématiques des différentes architectures

Architecture	PFD _{avg} [CEI 61508, 2009]
1oo1	$(\lambda_{DC} + \lambda_{DD}) t_{CE}$
1oo2	$2((1 - \beta_D)\lambda_{DD} + (1 - \beta)\lambda_{DU})^2 t_{CE} t_{GE} + \beta \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} (\frac{T_1}{2} + MRT)$
1oo3	$6((1 - \beta_D)\lambda_{DD} + (1 - \beta)\lambda_{DU})^3 t_{CE} t_{G2E} t_{GE} + \beta \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} (\frac{T_1}{2} + MRT)$
2oo2	$2\lambda_D t_{CE}$

Avec :

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left(\frac{T_1}{2} + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \quad (1.7)$$

$$t_{GE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left(\frac{T_1}{3} + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \quad (1.8)$$

$$t_{G2E} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left(\frac{T_1}{4} + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \quad (1.9)$$

Tel que :

- MTTR (Mean Time To Restoration) : temps moyen de restauration d'une défaillance dangereuse détectée.
- MTTR (Mean Time To Repair) : temps moyen de réparation d'une défaillance dangereuse non détectée. La norme suppose que $MRT \approx MTTR$
- La norme ne tient pas compte des défaillances de cause commune pour les architectures série,
- T_1 : est le temps entre deux diagnostic

1.4.2. Bloc diagramme de fiabilité

La méthode des blocs diagrammes de fiabilité est une des premières méthodes à avoir été utilisée pour analyser les systèmes et permettre des calculs de fiabilité (Kleinerman & Weiss, 1954). Elle est aussi appelée la Méthode du Diagramme de Succès (MDS). C'est une représentation de la logique de fonctionnement des systèmes car elle est souvent proche de leur schéma fonctionnel. Cette méthode est basée sur l'utilisation de blocs pour représenter les composants, les sous-systèmes ou les fonctions.

Les représentations de la logique de fonctionnement les plus utilisés ainsi que le calcul de leur fiabilité sont présentés ci-après.

1.4.2.1. Diagramme série

C'est une représentation d'un système est un caractérisé par un enchaînement linéaire de n éléments. La défaillance de l'un des n composants entraînera la défaillance du système complet (Christiane, 1997). La fiabilité du système complet R_S est égale au produit des fiabilités de chaque composant :

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i \quad (1.10)$$

1.4.2.2. Diagramme parallèle

C'est une représentation d'un système caractérisé par une association parallèle de tous les composants. C'est la défaillance de tous les composants qui entrainera la défaillance du système. Alors la fiabilité R_S du système est :

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (1.11)$$

1.4.2.3. Diagramme série parallèle

C'est une représentation d'un système qui est constitué de n sous-systèmes connectés en parallèle tel que chaque sous-système est composé de k éléments placée en série. Pour le calcul de la fiabilité, on doit modéliser chaque sous-système en série par un seul composant, tel que la fiabilité d'un sous-système en série i est égale à :

$$R_i = \prod_{j=1}^k R_{ij} \quad (1.12)$$

Alors la fiabilité R_S du système complet est

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (1.13)$$

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \prod_{j=1}^k R_{ij}) \quad (1.14)$$

1.4.2.4. Diagramme parallèle-série :

C'est une représentation (Figure 6) d'un système constitué de n sous-système connectés en série tel que chaque sous-système est composé de k éléments placés en parallèle (Christiane, 1997).

Le calcul de la fiabilité se fait en réduisant le système complet en un système série tel que chaque sous système en parallèle est modélisé par un seul composant.

La fiabilité d'un sous-système en parallèle j est égale à :

$$R_j = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - R_{ij}) \quad (1.15)$$

Alors que la fiabilité R_S du système complet est égale à :

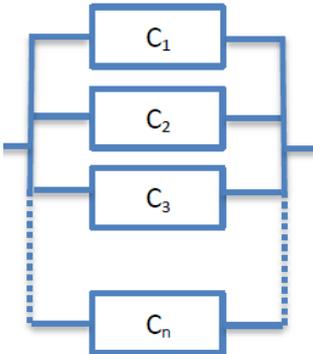
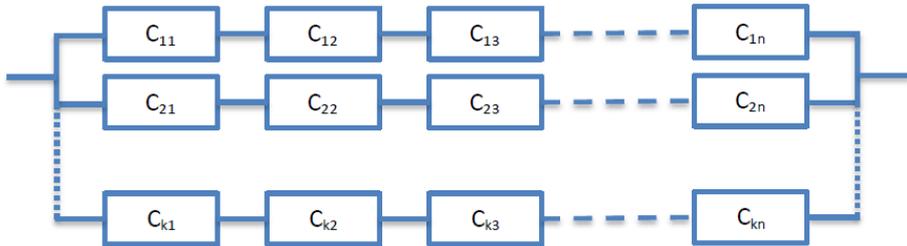
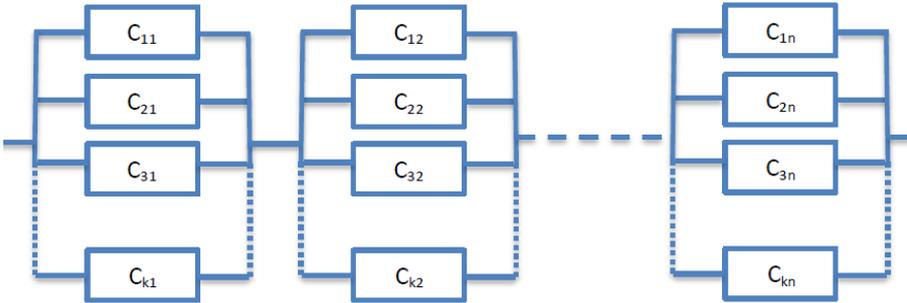
$$R_S = \prod_{j=1}^n R_j \quad (1.16)$$

$$R_S = \prod_{j=1}^n [1 - \prod_{i=1}^k (1 - R_{ij})] \quad (1.17)$$

Chapitre 1

Ci-joint un tableau regroupant les structures précédentes.

Tableau 3 schéma des structures simples d'un SIS

Structure	Schéma
Série	
Parallèles	
Série parallèle	
Parallèle série	

Les blocs diagrammes de fiabilité privilégient la représentation de systèmes parallèle-série ou série-parallèle. En conséquence, le calcul de la fiabilité dans ce cadre est aisé, mais il existe d'autres configurations d'un SIS qui permettent d'atteindre le SIL.

Ainsi, pour définir de nouvelles structures du SIS, Les réseaux de fiabilité proposés par Kaufmann *et al* (Kaufmann, Grouchko, & Cruon, 1975) sont utilisés.

1.5. Théorie des graphes et réseaux de fiabilité

Un réseau de fiabilité c'est une représentation d'un système qui se base sur la théorie des graphes. Nous introduirons quelques notions de base de la théorie des graphes afin de pouvoir introduire les réseaux de fiabilité.

1.5.1. Théorie des graphes

Un graphe permet de représenter la structure et les connexions d'un ensemble complexe en exprimant les relations entre ses éléments. (Cogie & Robert , 2003).

Les graphes constituent une méthode qui permet de modéliser une grande variété de problème en se ramenant à l'étude de sommets et d'arcs.

Il existe deux types de graphes, le graphe non orienté, c'est-à-dire ne présentant pas un sens dans les liaisons entre ses éléments et le graphe orienté ou digraphe. Dans notre étude, nous utiliserons les digraphes.

1.5.1.1. Définition

Un digraphe $G(V,E)$ est défini par l'ensemble fini $V=\{v_1,v_2,\dots,v_n\}$, dont les éléments sont appelés sommets et par l'ensemble fini $E\{e_1,e_2,\dots,e_n\}$, dont les éléments sont appelés arcs et $e = (u,v)$ est définis par une paire ordonnée de sommets. L'arc e va de l'extrémité initiale u à l'extrémité finale v .

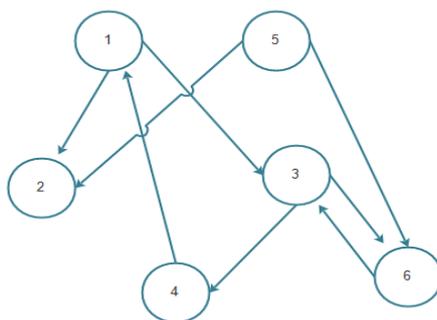


Figure 5 Graphe orienté

L'ensemble des arcs et des sommets dans le graphe de la figure 5 sont : $V=\{1,2,3,4,5,6\}$ et $E=\{(1,2),(1,3),(3,4),(3,6),(4,1),(5,2),(5,3),(6,3)\}$.

Un chemin conduisant d'un sommet a au sommet b est une suite ayant pour élément alternativement des sommets et des arcs commençant et se terminant par un sommet. Le chemin conduisant de l'élément 1 à l'élément 6 est : $\{1, (1, 3), 3, (3, 6), 6\}$.

1.5.2. Réseaux de fiabilité

Un réseau est un système dans lequel les entités communiquent entre elles, en envoyant un flux qui circule d'un nœud source à un nœud cible ce qui correspond à un diagramme dont les nœuds et les arcs peuvent tomber en panne suivant une certaine probabilité.

1.5.2.1. Définition

Un réseau de fiabilité R est un graphe orienté $G=(V,E)$ dont les arcs représentent les composants $E=\{C_1,C_2,\dots,C_n\}$ et les sommets $V=\{V_1,V_2,\dots,V_n\}$ représentent les nœuds.

Un réseau de fiabilité est caractérisé par deux sommets $S \in V$ et $T \in V$ qui sont appelés respectivement « origine » et « extrémité ». Tous arcs reliés à l'origine sont sortant et rentrant dans le cas de l'extrémité du sommet (Kaufmann, Grouchko, & Cruon, 1975).

Chaque arc $U_i \in U$ est noté $(V_jV_k)_{C_l}$ Tel que $V_jV_k \in V$ et $C_l \in E$ avec U , l'ensemble des arcs du graphe.

L'application $\Omega : U \rightarrow V \times V$ fait correspondre à chaque arc du graphe un couple de ses extrémités. Le même couple d'extrémités peut représenter plusieurs arcs tels que chaque arc correspond à un composant.

L'application $\Delta : V \times V \rightarrow E$ fait correspondre à chaque arc du graphe représenté par ses extrémités initiale et finale un composant. Plusieurs arcs peuvent représenter le même composant.

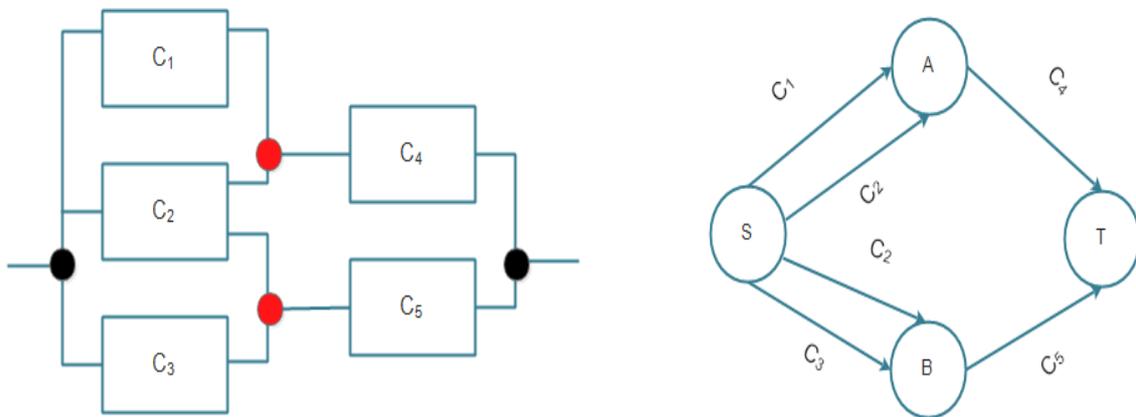


Figure 6 Exemple de schéma de connexion et de son réseau de fiabilité

La figure 6 représente un schéma de connexion d'un système avec une structure mixte et le réseau de fiabilité lui correspondant. Tel que les points de connexion (rouge) dans le schéma de connexion sont présentés par les sommets A et B et les points noirs sont présentés par les

Chapitre 1

sommets origine S et extrémité T . L'ensemble des nœuds est $V = \{S, A, B, T\}$. L'ensemble des composants est $E = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}$.

L'application oméga est définie tel que :

$$\Omega : U \rightarrow V \times V \quad (1.9)$$

$$\Omega(C_1) = (S, A)$$

L'application delta est définie tel que :

$$\Delta : V \times V \rightarrow E \quad (1.10)$$

$$\Delta(A, T) = C_4$$

Le couple (S, A) est représenté par deux arcs $(SA)_{C_1}$ et $(SA)_{C_2}$ (c'est-à-dire 2 composants relient ces deux points dans le schéma de connexion) et il existe deux arcs représentés par le couple (S, A) et (S, B) qui sont générés par le même composant C_2 (Rhazali, 2015).

1.5.2.2. Lien minimal et coupe minimale

Un lien C d'un réseau R est chemin conduisant du point d'origine à l'extrémité du réseau, c'est-à-dire, un sous ensemble d'arc $U' \subset U$ connectant le point S au point T .

Un lien est dit minimal lorsque aucun sous-ensemble $U'' \subset U'$ ne peut présenter un lien, tel que U' est l'ensemble des arcs du lien C .

Une coupe D d'un réseau E d'un réseau R est un sous ensemble de composants $E' \subset E$, tel que l'élimination de ces composants déconnecterait les deux extrémités du réseau, et par conséquent, il n'existerait aucun chemin reliant le point d'origine S au point d'extrémité T .

Une coupe D est dite minimale lorsqu'aucun sous ensemble de composant $E'' \subset E'$ ne peut présenter une coupe, tel que E' est l'ensemble des composants de la coupe D .

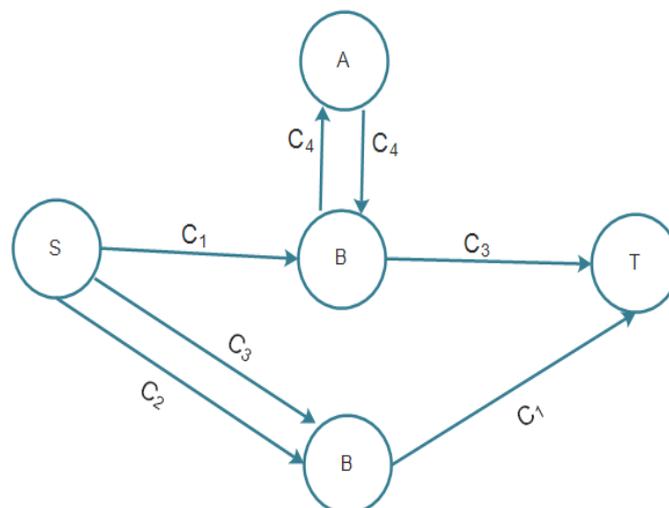


Figure 7 Exemple d'un réseau de fiabilité

Chapitre 1

Il existe 5 chemins entre le point S et le point T dans le réseau de la figure 7 et qui sont :

$$C_1 = \{(SB)_{C_1}, (BA)_{C_2}, (AB)_{C_4}, (BT)_{C_3}\}$$

$$C_2 = \{(SB)_{C_1}, (BT)_{C_3}\}$$

$$C_3 = \{(SB)_{C_1}, (BC)_{C_4}, (CT)_{C_1}\}$$

$$C_4 = \{(SC)_{C_3}, (CT)_{C_1}\}$$

$$C_5 = \{(SC)_{C_2}, (CT)_{C_1}\}$$

Les liens C_2, C_3, C_4 et C_5 sont des liens minimaux du réseau de fiabilité par contre C_1 n'est pas un lien minimal car l'ensemble des arcs du lien C_2 sont inclus dans l'ensemble des arcs du lien C_1 .

$\{C_1, C_2, C_3\}$ et $\{C_1, C_3\}$ sont des coupes du réseaux mais elles ne sont pas minimales alors que $\{C_1\}$ et $\{C_2, C_3, C_4\}$ sont des coupes minimales.

Toutes les architectures d'un SIS peuvent être modélisées par des réseaux de fiabilité. En effet, les réseaux de fiabilité est l'une des méthodes qui permettant l'évaluation de la fiabilité des systèmes complexes (Rhazali, 2015).

1.6. Evaluation de la fiabilité des systèmes complexes

Nous allons présenter les différentes méthodes et techniques utilisées pour estimer la fiabilité des systèmes binaires à deux états de fonctionnement « marche » et « arrêt ».

1.6.1. Technique de la table de vérité booléenne :

L'approche de la table de vérité booléenne est une méthode fastidieuse mais simple, elle est basée sur l'énumération de toutes les combinaisons possibles des états des composants du système. Elle nécessite la connaissance des éléments qui entraînent l'échec du système et la connectivité entre les différents blocs.

La table de vérité contient n entrées et 2^n lignes (2^n combinaisons possibles) tel que n et le nombre des composants du système. Chaque colonne représente un élément du système et les lignes représentent les différents états de ces éléments ; un « 1 » signifie que le bloc est en marche et un « 0 » signifie que le bloc est défaillant. Chaque ligne est examinée indépendamment pour définir l'état du système complet

Chapitre 1

La probabilité de chaque combinaison est calculée en multipliant les probabilités des états des composants. Ensuite, la fiabilité du système est obtenue en sommant toutes les probabilités des combinaisons qui conduisent à un bon fonctionnement.

Exemple d'application

Soit le diagramme de fiabilité d'un système (figure 8) composé de trois éléments.



Figure 8 Diagramme de fiabilité

La table de vérité de ce système est donnée dans le tableau 4.

Tableau 4 Exemple de table de vérité

A	B	C	Système	Probabilité
0	0	0	0	$P1 = (1-PA). (1-PB).(1-PC)$
0	0	1	0	$P2 = (1-PA). (1-PB).PC$
0	1	0	0	$P3 = (1-PA).PB.(1-PC)$
0	1	1	1	$P4 = (1-PA).PB.BC$
1	0	0	0	$P5 = PA$
1	0	1	1	$P6 = PA.(1-PB).PC$
1	1	0	0	$P7 = PA.PB.PC$
1	1	1	1	$P8 = PA.PB.PC$

La fiabilité du système est égale à :

$$Rs = P4 + P6 + P8 \quad (1.18)$$

où :

$$Rs = 1 - (P1 + P2 + P3 + P5 + P7) \quad (1.19)$$

Cette méthode est pratique seulement pour les systèmes à petite dimension. Dans le cas contraire, l'approche devient fortement limitée. En effet, la table de vérité de tel système est complexe et longue, comme il n'est pas évident des fois de prévoir l'état du système complet à partir des états de ses composants.

1.6.2. Méthode d'inclusion-exclusion :

L'énumération de tous les chemins minimaux ou les coupes minimales du réseau à étudier est la première étape. L'évaluation de la fiabilité de la structure est basée sur la formule de Poincaré.

Par le biais de cette formule, la fiabilité du système est exprimée par la probabilité de la réunion de l'ensemble des coupes minimales ou chemins minimaux en fonction de leur nombre et leurs probabilités d'intersection. En général, les calculs peuvent se faire soit en utilisant la technique des chemins minimaux soit la technique des coupes minimales. L'adoption de l'une de ces deux approches repose sur le nombre des chemins minimaux et les coupes minimales qu'on peut extraire du réseau, plus le nombre est faible plus le calcul est allégé.

La formule de Poincaré généralisée pour m chemins minimaux s'écrit sous la forme:

$$P(\cup_{i=1}^m C_i) = \sum_{i=1}^m P(C_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq m} P(C_i \cap C_j) + \sum_{1 \leq i < j < k \leq m} P(C_i \cap C_j \cap C_k) + \dots + (-1)^{m+1} P(C_1 \cap \dots \cap C_m) \quad (1.20)$$

Le point fort de cette méthode réside dans sa capacité de traiter une large gamme de problèmes quel que soit le type de la structure, toutefois les formules permettant de calculer la fiabilité sont lourdes de mise en œuvre lorsqu'il s'agit d'un grand réseau. C'est pour cette raison qu'on utilise généralement une formule approximative simplifiée en gardant seulement les premiers termes du théorème.

Chapitre 2 : Application

Introduction

L'évaluation de la fiabilité des systèmes simples et complexes sera menée au sein de la centrale électrique Hamma II pour le système instrumenté de sécurité d'arrêt d'urgence mis en place dans le circuit de refroidissement à hydrogène de l'alternateur.

La première partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation de l'organisme d'accueil, son organisation et son process de production.

La deuxième partie sera consacrée à l'évaluation de la fiabilité par les méthodes décrites dans le chapitre précédent.

2.1. Présentation de l'organisme d'accueil

Dans cette partie nous allons présenter l'organisme d'accueil SONELAZ ainsi que ses activités.

2.1.1. Présentation du groupe SONELGAZ

SONELGAZ est une entreprise algérienne appartenant au secteur économique spécialisée dans la production, le transport et la distribution de l'électricité et du gaz.

Créée en Algérie, l'entreprise s'est progressivement développée pour devenir aujourd'hui un groupe industriel international, composé de 29 filiales et employant plus de 47000 travailleurs.

2.1.2. Activités du groupe SONELGAZ

SONELGAZ est composée de trois branches d'activités : la production, le transport, la distribution et la commercialisation de l'électricité et du gaz, tant en Algérie qu'à l'étranger.

- Activité production : c'est l'activité consistant à transformer l'énergie calorifique ou hydraulique en énergie mécanique puis électrique.
- Activité transport : cette activité englobe le transport de l'électricité et le transport du gaz.
- Activité distribution électricité et gaz : consiste à alimenter l'ensemble des clients industriels et les abonnés domestiques.

Ajoutant aussi que SONELGAZ a toujours joué un rôle prépondérant dans le développement économique et social du pays. Sa contribution dans la concrétisation de la politique énergétique nationale est à la mesure des programmes de réalisation importants en matière d'électrification rurale et de distribution publique du gaz, qui ont permis de hisser le taux de couverture en électricité à plus de 99% et le taux de pénétration du gaz à plus de 52 %.¹

¹ www.sonelgaz.dz

2.1.3. La centrale électrique Hamma II

Conçue et réalisée dans le but de sécuriser la ville d'Alger en matière d'alimentation en énergie électrique et d'assurer un appoint au réseau général interconnecté. La centrale électrique HAMMA II a été mise en service en 2002.

Cette centrale affiche en matière de disponibilité de production, un taux élevée allant jusqu'à 99% supérieur à la moyenne internationale qui est de 95%.

2.1.3.1. Description générale

La centrale est équipée de deux groupes turbines à gaz monté par le constructeur italien ANSALDO sous licence SIEMENS. La puissance totale nominale de base aux bornes usine est égale à 418 MW (209 MW chacune). L'énergie est évacuée à travers un poste de transformation de 220KV.

La centrale peut fonctionner avec deux combustibles

- Gaz naturel (combustible principale) ;
- Fuel (combustible de secours)

Chaque groupe thermique est alimenté par un système de réseau gaz composé de quatre lignes ou rampes de détente et de pompage du combustible. Le gaz naturel est délivré à la centrale HAMMA II à travers un gazoduc provenant de la ville de Hassi R'Mel.

Les groupes sont installés dans des enceintes appelées « package » et placé dans une salle de machines commune avec possibilités d'exploitation à partir d'une salle de commande.

2.1.3.2. Organisation

L'établissement est placé sous la responsabilité d'un Directeur unique. Il est représenté par un comité de Direction comprenant :

- Le responsable de division Technique ;
- Le responsable de la subdivision Production ;
- Le responsable de la subdivision finance /comptabilité ;
- Le responsable des Ressources Humaines.

Le service Hygiène, Sécurité et Environnement (HSE) est rattaché directement au Directeur de l'établissement. Ce service anime et coordonne la sécurité de l'ensemble de l'établissement ainsi que la formation du personnel.

2.1.3.3. Description de l'installation

L'installation est composée d'équipements et d'infrastructures décrits ci-dessous. Le plan de masse de la centrale est présenté en annexe 1.

2.1.3.3.1. Salle des machines

Dans cette salle, on trouve les différents composants des deux tranches de production tels que : les deux turbines, l'alternateur, le transformateur, et les différents systèmes auxiliaires (système pneumatique,).

2.1.3.3.2. Compresseur

Le compresseur de la turbine est un compresseur axial à 17 étages, muni d'un étage à orientation variable qui permettra de réguler le débit d'air admis au compresseur, ainsi il permet de réguler la température des gaz d'échappement afin d'éviter la baisse du rendement.

2.1.3.3.3. Turbine

La turbine est à quatre étages comportant un châssis horizontalement dédoublé donnant l'accès aux pièces internes ainsi que des aubes de turbine en alliage, démontables individuellement et d'un dispositif d'échappement axial à perte basse idéal pour des applications de récupération de chaleur.

Elle est dotée d'une technologie de refroidissement avancée où l'air de décharge du compresseur est utilisé pour refroidir les composants internes.

2.1.3.3.4. Chambre de combustion

La chambre de combustion de la turbine, est une chambre annulaire munie de 24 brûleurs hybrides, fonctionnant à combustible gazeux et liquide. Elle est conçue de sorte à limiter les émissions des NOx.

2.1.3.3.5. Echappement de la turbine

Le système d'échappement est conçu en vue de mener les gaz chauds (517°) ou en excès à la cheminé d'évacuation.

2.1.3.3.6. Alternateur

C'est l'élément responsable de la transformation de l'énergie mécanique produite par la turbine en énergie électrique sous forme de courant alternatif, devant être débité au réseau interconnecté.

C'est une machine synchrone d'une puissance apparente de 270 MVA et d'un facteur de puissance ($\cos\phi = 0.8$), sa tension nominale est de 15,75kV, une fréquence de 50 Hz, et est refroidi à l'hydrogène sous pression.

L'excitation de l'alternateur s'effectue par une excitatrice statique. L'alternateur comporte essentiellement deux enroulements : le rotor et le stator

Chapitre 2

Le rotor excité par un courant continu, produit un champ tournant au cours de sa rotation. Ce champ engendre des forces électromotrices dans chacune des phases de l'enroulement du stator. Ces forces sont engendrées par le champ rotorique tournant ; elles sont donc en fonction du courant d'excitation et de la vitesse.

2.1.3.3.7. Transformateur

Le transformateur principal de la centrale est un transformateur élévateur de tension, avec un rapport de transformation de (225 KV/15 ,75 KV) en tension, et de (667,2 A / 9530,9 A) en intensité, sa puissance nominale est de 260 MVA, le refroidissement quant à lui est assuré par un système OFAF (Oil Forced- Air Forced).

2.1.3.3.8. Groupe Diesel de secours

Le groupe Diesel est un moteur thermique destiné à produire l'énergie électrique indispensable au lancement des groupes de la centrale et à l'alimentation des auxiliaires, en cas de rupture de tous les systèmes de transformations.

Ce moteur se caractérise par une puissance active de 4114 KW et d'une puissance apparente nominale de 6050 KVA. Sa vitesse de rotation nominale est de 1000 tr /min à 50 Hz, comptant une tension de 6KV et un courant de 582,2 A.

2.1.3.4. Production d'électricité

Le process de production d'électricité est composé de plusieurs étapes, décrites ci-dessous :

- L'air comprimé en provenance du compresseur pénètre dans l'espace annulaire constituant la chambre de combustion, au même moment où les injecteurs introduisent le combustible qui se mélange à l'air. L'allumage s'effectue grâce à deux bougies rétractables.
- Les gaz chauds issus de la combustion traversent ensuite les quatre étages de la turbine où ils se détendent. Chaque étage se compose d'un ensemble d'aubes fixes suivies d'une rangée d'aubes mobiles. Dans chaque rangée d'aubes fixes, l'énergie cinétique du jet de gaz augmente, en même temps que la pression chute. Une partie de l'énergie cinétique du jet est convertie en travail utile transmis au rotor de la turbine sous la forme d'un couple mécanique.
- Après leur passage dans les aubes du quatrième étage, les gaz brûlés sont évacués vers la cheminée.
- La rotation résultante de l'arbre entraîne le rotor de l'alternateur, l'axe du compresseur ainsi que d'autres auxiliaires.

2.2. Application des méthodes de calcul de fiabilité

L'étude effectuée au sein de la centrale électrique Hamme II a déterminé les systèmes critiques et les risques qu'ils induisent. L'une des barrières de sécurité mises en place pour réduire ces risques est le système d'arrêt d'urgence mis en place dans le circuit de refroidissement à hydrogène, qu'on a choisi d'étudier.

Afin de réduire le risque d'explosion due à une fuite d'hydrogène utilisé pour refroidir l'alternateur, l'entreprise a mis en place un SIS composé de 3 capteurs d'hydrogène, 1 traitement logique et 1 vanne d'arrêt d'urgence dont la configuration est présentée dans la figure 9. La structure de ce SIS est de type parallèle-série.

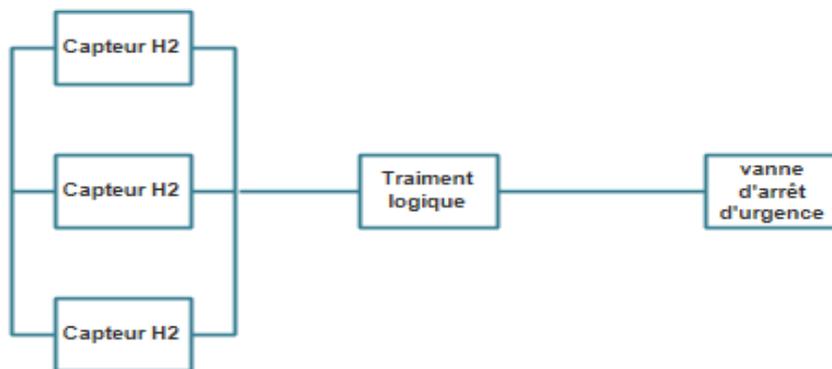


Figure 9 Système d'arrêt d'urgence

2.2.1. Application des équations simplifiées

Nous avons un système composé de :

- 3 Capteurs avec une architecture 1oo3 ;
- Un traitement logique ;
- Une vanne d'arrêt d'urgence avec une architecture 1oo1.

Donc l'équation permettant de calcul le PFD_{avg}^{SIS} de ce SIS est donnée comme suit :

$$PFD_{avg}^{SIS} = PFD_{avg}^{1oo3} + PFD_{avg}^{1oo1} + PFD_{avg}^{1oo1}$$

$$PFD_{avg}^{SIS} = \left[6 \left((1 - \beta_D) \lambda_{DD} + (1 - \beta) \lambda_{DU} \right)^3 t_{CE} t_{G2E} t_{GE} + \beta \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} \left(\frac{T_1}{2} + MRT \right) \right] + [(\lambda_{DC} + \lambda_{DD}) t_{CE}] + [(\lambda_{DC} + \lambda_{DD}) t_{CE}]$$

Chapitre 2

Hypothèses de calculs

- Il n'existe pas de défaillance de cause commune alors $\beta = 0$;
- Le temps entre deux diagnostic est égale à 1 ans donc $T_1 = 1$

Les données sur les différents composants sont tirées de la base de données OREDA (tableau 5).

Tableau 5 Données sur les composants du système d'arrêt d'urgence

Composant	λ_D	MTTR
Capteur de H ₂	0.22.10-6 h	4,3 h
Traitement logique	0.5*10-3 h	24 h
Vanne d'arrêt d'urgence	2.59.10-6 h	16 h

Pour le calcul du PFD_{avg} , on va choisir plusieurs valeurs de DC selon la norme 61508 et les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 6.

Tableau 6 calcul des PFD_{avg} pour chaque architecture d'un sous-système du SIS et chaque taux DC

Architecture	Détecteur H ₂ 1oo3	Traitement logique 1oo1	Vanne d'arrêt 1oo1
DC			
60%	0.015768	0.0086724	0.0025436
90%	0.015426	0.00838332	0.00277468
99%	0.015312	0.008296596	0.0026597

Après avoir effectué le calcul par les formules analytique nous avons obtenu pour chaque taux de diagnostic une fiabilité. Les résultats sont donnés dans le tableau 7.

Tableau 7 Calcul de la fiabilité et du PFD_{avg} du SIS pour chaque taux DC

DC	PFD	Fiabilité
60%	0.0268841	0.973116
90%	0.026584	0.973416
99 %	0.026269	0.973731

D'après le tableau 7, nous remarquons que pour les trois taux de diagnostique nous obtenons un SIL 1.

2.2.2. Application de la méthode du bloc diagramme de fiabilité

La structure du système étudié est une structure de type parallèle-série dont le calcul de sa fiabilité est simple et est donné par la formule suivante :

$$R_{sys} = (1 - (1 - R_{capteur})^3) \times (1 - (1 - R_{traitement})^1) \times (1 - (1 - R_{Actionneur})^1$$

Les données sur la fiabilité des composants de ce SIS sont données dans le tableau 8 et sont tirées de la base de données OREDA.

Tableau 8 Fiabilité et PFD_{avg} de chaque composant

Composant	PFD _{avg}	Fiabilité R
Capteur Hydrogène	0,00489465	0.995105
Traitement logique	0,0846862	0.9153138
Vanne d'arrêt d'urgence	0,01677826	0.98322174

En remplaçant les données de fiabilité de chaque composant dans la formule du tableau 2, on obtient que la fiabilité du système soit égale à 0.9832216 et que la probabilité de défaillance égale à 0.01649, ce qui correspond à un SIL 1.

- Analyse des résultats

Nous remarquons que les deux méthodes utilisées ont donné des résultats presque similaires de la fiabilité du système tel que la première s'appuie sur des formules analytiques tirées de la norme CEI 61508 et la deuxième utilise les formules associées au bloc diagramme de fiabilité. Le résultat obtenu correspond au niveau de SIL 1 ce qui signifie que la probabilité de défaillance est élevée.

Remarque

Ce dernier n'étant pas considéré adéquat, une optimisation et une transformation de la structure du système SIS en un système complexe a été réalisée ² et la nouvelle configuration est représentée dans la figure 10.

² Notre PFE

Chapitre 2

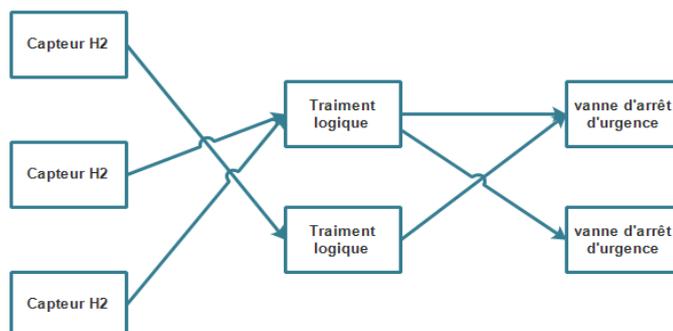


Figure 10 Configuration du SIS après optimisation

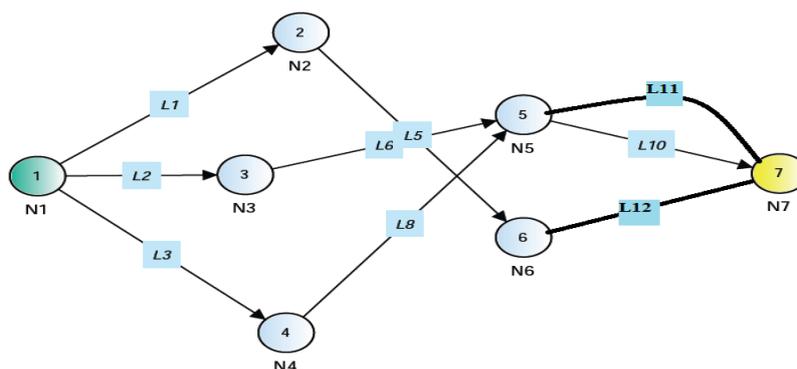


Figure 11 Réseau de fiabilité de la structure optimisée du système d'arrêt d'urgence

Le réseau de fiabilité lui correspondant est présenté dans la figure 11, avec :

- L1, L2, L3 sont les capteurs ;
- L5, L6, L8 sont les unités de traitement logique ;
- L11, L10, L12 sont les vannes.

2.2.3. Application de la technique de la table de vérité booléenne

Afin de vérifier l'adéquation de ce SIS par rapport à l'exigence de sécurité qu'il doit satisfaire c'est-à-dire qu'il doit être de SIL 2, nous avons entamé le calcul de sa fiabilité par la méthode « Technique de la table de vérité booléenne » décrite dans le paragraphe (1.4.1).

La première étape consiste à énumérer les composants du système. Dans notre cas nous avons 7 composants qui sont :

- 3 capteurs ;
- 2 traitements logiques ;
- 2 vannes d'arrêt d'urgence

Chapitre 2

Dans la deuxième étape, on construit la table de vérité, qui est constituée de 7 colonnes et de 2^7 lignes. Cette table contient toutes les combinaisons possibles des états des composants du système.

La troisième étape consiste à déterminer qu'elles sont les combinaisons qui mènent à l'échec et celles qui mènent à la marche du système en suivant le réseau de fiabilité établi.

Le but de la quatrième et dernière étape, est de calculer la probabilité de chaque combinaison en multipliant les probabilités des états des composants (fiabilité et probabilité de d représentés dans le tableau 9.

Tableau 9 Probabilité de défaillance et fiabilité des composants

Composant	PFDavg	Fiabilité
Capteur Hydrogène	0,00489465	0.995105
Traitement logique	0,0846862	0.9153138
Vanne d'arrêt	0,01677826	0.98322174

Ensuite, la fiabilité du système est obtenue en sommant toutes les probabilités des combinaisons qui conduisent à son bon fonctionnement.

Le tableau 10 donne un exemple de combinaisons possibles de l'état des composants (défaillant ou en marche) avec le calcul de leurs fiabilités.

Tableau 10 Table de vérité

C ₁	C ₂	C ₃	TL ₁	TL ₂	V ₁	V ₂	Etat du système	Probabilité	Résultats
1	0	1	0	1	1	1	1	$P_{C1} \cdot (1-P_{C2}) \cdot P_{C3} \cdot (1-P_{TL1}) \cdot P_{TL2} \cdot P_{V1} \cdot P_{V2}$	0,000363199
1	1	0	0	1	0	1	0	$P_{C1} \cdot P_{C2} \cdot (1-P_{C3}) \cdot (1-P_{TL1}) \cdot P_{TL2} \cdot (1-P_{V1}) \cdot P_{V2}$	

- Dans le premier cas
 - Le capteur 1 en marche
 - Le capteur 2 en panne
 - Le capteur 1 en marche
 - Le traitement logique 1 marche
 - Le traitement logique 2 marche

Chapitre 2

- La vanne 1 en marche
- La vanne 2 en marche

En suivant la logique de fonctionnement du système on déduit qu'il est en marche.

- Dans le deuxième cas
 - Le capteur 1 en marche
 - Le capteur 2 en marche
 - Le capteur 1 en panne
 - Le traitement logique 1 en panne
 - Le traitement logique 2 en marche
 - La vanne 1 en panne
 - La vanne 2 en marche

En suivant la logique de fonctionnement du système on déduit qu'il est en marche.

Ainsi en suivant la même démarche nous avons pu calculer la fiabilité des 128 combinaisons des états des composants de ce SIS, tel que nous avons trouvé :

- 82 combinaisons où le système est en panne ;
- 46 combinaisons où le système est en marche.

La synthèse des résultats de cette table de vérité est présentée dans l'annexe N°1.

La fiabilité du SIS est donnée par la formule suivante :

$$R_{\text{système}} = \sum_{L=1}^{46} P_L$$

Avec P_L représente la probabilité d'une combinaison des états des composants du SIS tel que le SIS puisse remplir sa fonction. Après calcul, on trouve :

$$R_{\text{système}} = 0,992202299$$

2.2.4. Application de la méthode d'inclusion exclusion

La première étape est de dénombrer les différents liens minimaux menant du point N1 au point N7 figure de la figure 12. L'ensemble de ces liens sont :

$$C_1 = \{(1,2)_{L1}; (2,6)_{L5}; (6,7)_{L12}\}$$

$$C_2 = \{(1,3)_{L2}; (3,5)_{L6}; (5,7)_{L11}\}$$

$$C_3 = \{(1,3)_{L2}; (3,5)_{L6}; (5,7)_{L10}\}$$

$$C_4 = \{(1,4)_{L3}; (4,5)_{L8}; (5,7)_{L11}\}$$

$$C_5 = \{(1,4)_{L3}; (4,5)_{L8}; (5,7)_{L10}\}$$

Chapitre 2

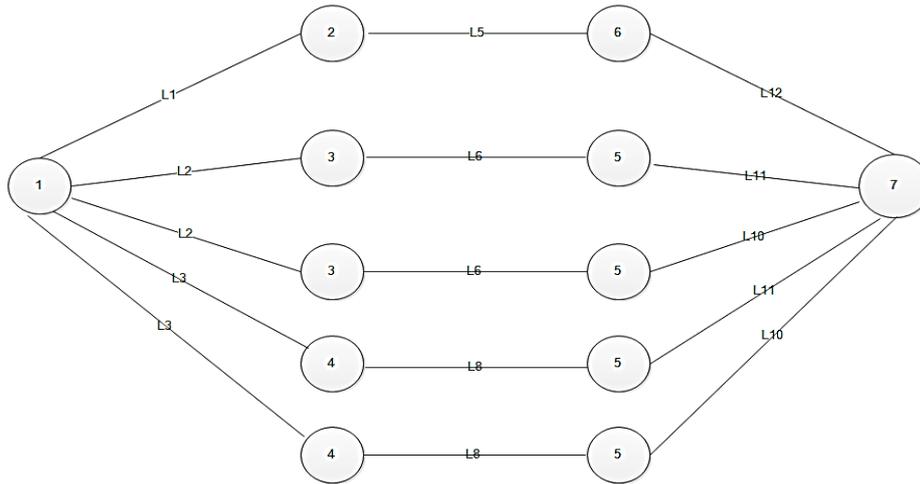


Figure 12 Représentation éclatée du réseau de fiabilité du système d'arrêt d'urgence

D'après l'équation de Poincaré nous avons :

$$R(S) = P\left(\bigcup_{i=1}^5 C_i\right) = \sum_{i=1}^5 P(C_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq 5} P(C_i \cap C_j) + \sum_{1 \leq i < j < k \leq 5} P(C_i \cap C_j \cap C_k) + \dots + (-1)^{5+1} P(C_1 \cap \dots \cap C_5)$$

L'opérateur intersection dans la formule précédente fait le produit de la fiabilité des éléments contenu dans les liens minimaux en ne prenant pas en compte la répétition des mêmes composants dans les liens minimaux. En remplaçant les liens minimaux par la fiabilité des composants du SIS, on obtient la fiabilité du SIS est égale à :

$$R_{\text{système}} = 0.991$$

- **Résultat et discussion**

Par l'utilisation de la technique de la table de vérité ainsi que de la méthode inclusion exclusion, nous avons pu obtenir la fiabilité de système d'arrêt d'urgence avec des valeurs très rapprochées, tel que la première méthode donne une valeur de 0.9922 et la deuxième méthode 0.991.

Mais nous avons remarqué que la technique de la table de vérité à nécessité plus de temps et donc très fastidieuse malgré le nombre limité de composant (7 composants) que contient ce système, en comparaison à l'application de la méthode d'inclusion et d'exclusion qui a nécessité moins d'énergie et qui a mené à un résultat presque similaire.

Conclusion générale

Les systèmes instrumentés de sécurité sont aujourd'hui des mesures incontournables pour réduire les risques dans les procédés industriels. Mais du fait de leur principe de fonctionnement, ils peuvent être eux même sujets à défaillance. De là l'évaluation de leur performance est une étape essentielle dans le processus de réduction de risque.

Par ailleurs, les systèmes instrumentés de sécurité peuvent avoir plusieurs configurations et structures. Dans ce mémoire, nous avons traité de l'évaluation de la fiabilité des systèmes instrumentés de sécurité qui ont des structures simples par deux méthodes qui sont les équations simplifiées et le bloc diagramme de fiabilité et des structures complexes par deux méthodes qui sont la technique de la table de vérité booléenne et la méthode d'inclusion-exclusion.

L'exemple d'application qu'on a pris pour illustrer ces deux méthodes concerne le système d'arrêt d'urgence du système de refroidissement de la centrale électrique Hamma II.

Références bibliographiques

- CEI 61511. (2003). *Sécurité fonctionnelle-Système instrumenté de sécurité pour le domaine de la production par processus.*
- CEI61513. (2001). *Norme CEI 61513, Centrales nucléaires : Instrumentation et contrôle commande des systèmes importants pour la sureté, Prescriptions générales pour les systèmes. Commission Electrotechnique Internationale, Genève, Suisse; 2001.*
- Christiane, C.-T. (1997). *Processus stochastiques et fiabilité des systèmes.* Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Cogie, O., & Robert , C. (2003). *Théorie des graphes : Au delà des ponts de Königsberg, Problèmes, théorèmes, algorithmes .* Paris: Vuibert.
- EN50126. (1999). *EN 50126, Railway applications. The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS); 1999.*
- EN50129. (1998). *EN 50129, Safety related electronic systems for signaling; 1998.*
- F.INNAL. (2008). *F. INNAL, Contribution à la modélisation des systèmes instrumentés de sécurité et à l'évaluation de leurs performances Analyse critique de la norme CEI 61508, Thèse de Docteur de L'Université BORDEAUX 1 ; 2008.*
- Farmer.F.R. (1967). *Farmer., F. R. ,Siting criteria : a new approach. Atom, chapter 128, page 152166, 1967.*
- IEC61508. (1998). *Norme CEI 61508. Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques / Électroniques / électroniques programmables relatifs à la sécurité – Parties 1 à 7. Commission Electrotechnique Internationale, Genève, Suisse, 1998-2000.*
- Inna.F. (2008). *Innal, F. ,Contribution à la modélisation des systèmes instrumentés de sécurité et à l'évaluation de leurs performances Analyse critique de la norme CEI 61508. PhD thesis, Université Bordeaux I, France, 2008.*
- ISO. (1999). *[ISO, 1999] ISO/CEI Guide 51. Aspects liés à la sécurité : Principes directeurs pour les inclure dans les normes. Organisation internationale de normalisation (ISO), 1999.*
- ISO. (2002). *ISO Management du risque : Vocabulaire, Principes directeurs pour l'utilisation dans les normes. Organisation internationale de normalisation (ISO) ; 2002.*
- Kaufmann, A., Grouchko, D., & Cruon, R. (1975). *Modèles mathématiques pour l'étude de la fiabilité des systèmes. .* Paris: Masson et Cie.
- Kleinerman, M. M., & Weiss, G. H. (1954). *On the reliability of networks. Proceeding of the National Electronics Conference, volume 10, 128-136.*
- LIEVENS. (1976). *[LIEVENS, 1976] C. Lievens «Sécurité des systèmes ». Cepadues éditions, Toulouse, France, 1976.*
- M.Sallak. (2007). *M. Sallak. Evaluation de paramètres de sûreté de fonctionnement en présence d'incertitudes et aide à la conception : Application aux Systèmes Instrumentés de Sécurité. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine ; 2007.*

Références bibliographiques

- Mkhida, A. (2009). *"Contribution à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes instrumentés de sécurité intégrant de l'intelligence"*, thèse de doctorat . Lorraine : Ecole Doctorale IAEM Lorraine.
- OHSAS18001. (1999). *Système de management de la santé et de la sécurité au travail* Spécification - BSI, Afnor.
- Oméga10. (2008). *Evaluation des performances des Barrières Techniques de Sécurité*.
- Rhazali, K. (2015). *Optimisation de la disponibilité des systèmes multi-Etats, mémoire d'ingénieur*. Compiègne: UTC.
- Signoret.J.P. (2006). *Signoret, J.-P, Managing risks in hips by making sil calculations effective*. In IQPC2006, Aberdeen, Great Britain, 2006.
- Sklet, S. (2005). Safety barriers : Definitions, classification and performance. *Journal of Loss Prevention in the process industries*, 494-506.
- Villemeur. (1998). [Villemeur, 1998] Villemeur A. « Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels ». Number 2. Eyrolles, 1998. Eyrolles.
- W.MECHRI. (2011). *W. MECHRI. Evaluation de la performance des Systèmes Instrumentés de Sécurité à paramètres imprécis, Thèse de Docteur de L'Université de Tunis El Manar ; 2011 .*

Annexe

Table de vérité booléenne de système d'arrêt d'urgence

c1	c2	c3	t1	t2	v1	v2	Sortie	Fiabilité
0	1	0	1	0	0	1	1	3,04855E-08
1	1	1	0	1	1	1	1	0,073840109
0	0	1	1	0	0	1	1	3,04855E-08
0	0	1	1	0	1	0	1	3,04855E-08
0	0	1	1	0	1	1	1	1,78648E-06
0	0	1	1	1	0	1	1	3,29496E-07
0	0	1	1	1	1	1	0	3,29496E-07
0	0	1	1	1	1	1	1	1,93088E-05
0	1	0	1	0	1	0	1	3,04855E-08
0	1	0	1	0	1	1	1	1,78648E-06
0	1	0	1	1	0	1	1	3,29496E-07
0	1	0	1	1	1	0	1	3,29496E-07
0	1	0	1	1	1	1	1	1,93088E-05
0	1	1	1	0	0	1	1	6,19784E-06
0	1	1	1	0	1	0	1	0,000363199
0	1	1	1	1	0	1	1	0,000363199
0	1	1	1	1	0	1	1	6,69881E-05
0	1	1	1	1	1	1	0	6,69881E-05
0	1	1	1	1	1	1	1	0,003925567
1	0	0	0	0	1	1	0	3,04855E-08
1	0	0	0	0	1	1	1	1,66309E-06
1	0	0	1	1	1	1	0	3,29496E-07
1	0	0	1	1	1	1	1	1,93088E-05
1	0	1	0	1	1	0	1	6,19784E-06
1	0	1	0	0	1	1	1	0,000363199
1	0	1	1	0	0	1	1	6,19784E-06
1	0	1	1	0	1	0	1	6,19784E-06
1	0	1	1	0	1	1	1	0,000363199
1	0	1	1	1	1	0	1	8,13217E-05
1	0	1	1	1	1	1	0	8,13217E-05
1	0	1	1	1	1	1	1	0,004846849
1	1	0	0	0	1	1	0	6,19784E-06
1	1	0	0	0	1	1	1	0,000363199
1	1	0	1	0	0	1	1	6,22833E-06
1	1	0	1	0	1	0	1	6,19784E-06
1	1	0	1	0	1	1	1	0,000364986
1	1	0	1	1	0	1	1	6,69881E-05
1	1	0	1	1	1	0	1	6,69881E-05
1	1	0	1	1	1	1	1	0,003925567
1	1	1	0	1	1	0	1	0,00126005

1	1	1	1	0	0	1	1	0,00126005
1	1	1	1	0	1	0	1	0,00126005
1	1	1	1	0	1	1	1	0,073840109
1	1	1	1	1	0	1	1	0,013618997
1	1	1	1	1	1	0	1	0,013618997
1	1	1	1	1	1	1	1	0,798085997
0	0	0	0	0	0	0	0	/
0	0	0	0	0	0	1	0	/
0	0	0	0	0	1	0	0	/
0	0	0	0	0	1	1	0	/
0	0	0	0	1	0	0	0	/
0	0	0	0	1	0	1	0	/
0	0	0	0	1	1	0	0	/
0	0	0	0	1	1	1	0	/
0	0	0	1	0	0	0	0	/
0	0	0	1	0	0	1	0	/
0	0	0	1	0	1	1	0	/
0	0	0	1	1	0	0	0	/
0	0	0	1	1	0	1	0	/
0	0	0	1	1	1	1	0	/
0	0	1	0	0	0	0	0	/
0	0	1	0	0	0	1	0	/
0	0	1	0	0	1	0	0	/
0	0	1	0	0	1	1	0	/
0	0	1	0	1	1	1	0	/
0	0	1	1	0	0	0	0	/
0	0	1	1	1	0	0	0	/
0	1	0	0	0	0	0	0	/
0	1	0	0	0	0	1	0	/
0	1	0	0	0	1	0	0	/
0	1	0	0	0	1	1	0	/
0	1	0	0	1	0	0	0	/
0	1	0	0	1	1	0	0	/
0	1	0	0	1	1	1	0	/
0	1	0	1	0	0	0	0	/
0	1	0	1	1	0	0	0	/
0	1	1	0	0	0	0	0	/
0	1	1	0	0	0	1	0	/
0	1	1	0	0	1	0	0	/

0	1	1	0	0	1	1	0	/
0	1	1	0	1	0	0	0	/
0	1	1	0	1	0	1	0	/
0	1	1	0	1	1	0	0	/
0	1	1	0	1	1	1	0	/
0	1	1	0	0	0	0	0	/
0	1	1	1	1	0	0	0	/
1	0	0	1	0	0	0	0	/
1	0	0	0	0	0	1	0	/
1	0	0	0	0	1	0	0	/
1	0	0	0	0	1	1	0	/
1	0	0	0	1	0	0	0	/
1	0	0	0	0	0	0	0	/
1	0	0	1	0	0	1	0	/
1	0	0	1	0	1	0	0	/
1	0	0	1	0	1	1	0	/
1	0	0	1	1	0	0	0	/
1	0	0	1	1	0	1	0	/
1	0	1	0	0	0	0	0	/
1	0	1	0	0	0	1	0	/
1	0	1	0	0	1	0	0	/
1	0	1	0	0	1	1	0	/
1	0	1	0	1	0	0	0	/
1	0	1	1	0	0	0	0	/
1	0	1	1	1	0	0	0	/
1	1	0	0	0	0	0	0	/
1	1	0	0	0	0	1	0	/
1	1	0	0	0	1	0	0	/
1	1	0	0	0	1	1	0	/
1	1	0	0	1	0	0	0	/
1	1	0	1	0	0	0	0	/
1	1	0	1	1	0	0	0	/
1	1	1	0	0	0	0	0	/
1	1	1	0	0	0	1	0	/
1	1	1	0	0	1	0	0	/
1	1	1	0	0	1	1	0	/
1	1	1	0	1	0	0	0	/
1	1	1	0	1	0	1	0	/
1	1	1	1	0	0	0	0	/
1	1	1	1	1	1	0	0	/
1	0	0	0	1	0	1	0	/
1	1	0	0	1	0	1	0	/