

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES  
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**



**Département Transport et Equipements  
des Hydrocarbures**

## **Mémoire de Master**

**Domaine :** Sciences et technologies

**Filière :** Hydrocarbures

**Option :** Transport et distribution des hydrocarbures

Présenté par :

**BALOUL Nour El Houda et DELLAG Zoubida**

## **Thème**

---

**Modélisation de la fiabilité, maintenabilité et disponibilité du système  
de transport de gaz (GK1)**

---

Soutenu publiquement le .../07/2022

Devant le jury :

.....

UMBB

**Président**

.....

UMBB

**Encadreur**

.....

UMBB

**Examineur**

.....

UMBB

**Examineur**

Année universitaire : 2021/2022



**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**

**Département :** Transport et Equipement des Hydrocarbures

**Filière :** Hydrocarbures

**Spécialité :** Génie mécanique -Transport et Distribution des hydrocarbures

## **Autorisation de soutenance**

**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**En vue de l'obtention du diplôme :**

# **MASTER**

## **Thème**

Modélisation de la fiabilité, maintenabilité et disponibilité du système de transport de gaz (GK1)

**Nom :**  
Baloul  
Dellag

**Prénom :**  
Nour El Houda  
Zoubida

Le : .....

**Le promoteur :**



# Remerciements

*Louange à Allah, le Tout Puissant, pour nous avoir donné la force, la santé et la capacité nécessaire pour accomplir ce modeste travail et pour nous avoir permis de le mener à bien.*

*Nous ne serions jamais assez remercier notre encadreur Monsieur Younsi.K, Docteur à la faculté des Hydrocarbures et de la chimie l'université de Boumerdes. Qu'il trouve ici l'expression de notre haute considération et notre profonde gratitude pour toutes ses qualités professionnelles et humaines, pour son aide précieuse et bénéfique, pour ses orientations riches et pour ses directives constructives et objectives.*

*Nos vifs remerciements vont aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail. Nous tenons à exprimer également nos respectueux remerciements à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation.*

*Nous remercions chaleureusement nos familles, nos parents, en premier lieu, pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur patience durant les étapes difficiles de notre cursus universitaire.*

*Nous garderons un très bon souvenir des moments passés à l'INH en compagnie de tous nos amis. Nous tenons à les remercier vivement pour leur sympathie, leurs encouragements et leur gentillesse.*

*Enfin, nous témoignons nos remerciements à tous ceux qui n'ont pas été cités mais qui ont contribué d'une manière ou d'une autre, chacun à sa manière, à l'élaboration et au bon déroulement de ce modeste travail*

*Baloul Nour El Houda / Dellag Zoubida*



***A** ma très chère mère 'Kheira'*

*Tu as toujours été pour moi un exemple de mère respectueuse honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer la femme que tu es.*

*Grâce à toi mama j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension... Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi.*

*Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployés pour mon éducation et ma formation. Je t'aime mama et j'implore le tout-puissant pour qu'il t'accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse.*

***A** mon très cher père 'Houari'*

*J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde !*

***A** ma sœur 'Soumia'*

*Aucune dédicace ne peut exprimer mon amour et ma gratitude de t'avoir comme sœur. Je ne pourrais jamais imaginer la vie sans toi, tu comptes énormément pour moi, tu es la sœur qui assure son rôle comme il faut, je n'oublierais jamais ton encouragement et ton soutien le long de mes études, je t'estime beaucoup et je t'aime beaucoup. Je te souhaite beaucoup de succès, de prospérité et une vie pleine de joie et de bonheur.*

*Nour ElHouda*



*A mon frère ' Houari Nadjib '*

*A tous les moments passés avec toi mon frère, en gage de ma profonde estime pour l'aide que tu m'as apporté. Tu m'as soutenu, réconforté et encouragé. Puissent nos liens fraternels se consolider et se pérenniser encore plus.*

*A ma tante ' Fatima '*

*Je profite de la présente occasion pour vous remercier pour tout le soutien, la sympathie et l'amour que vous m'accordez. Que Dieu le tout puissant vous comble de santé, de bonheur et vous prouve une longue vie pleine de joie.*

*A M. Belabdi*

*Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'importance que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle. Que Dieu le Tout Puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.*

*A mon amie et mon binôme ' Dellag Zoubida ' et à toute sa famille*

*Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour t'exprimer mon affection et mes pensées, tu es pour moi une sœur et une amie sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je te dédie ce travail et je te souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.*

*A toutes ces personnes je dédie ce modeste travail en termes d'amour et de profonde gratitude.*

*Nour El Houda*





*A l'homme de ma vie,*

*Je suis la personne forte et courageuse que je suis aujourd'hui à cause de tout ton amour et de tes conseils. Tu m'as appris tout ce que j'avais besoin d'apprendre et tu as rendu l'apprentissage tellement amusant. Tu m'inspires à être gentil, à rêver plus grand et à travailler plus dur. Tu es le meilleur mentor, conseiller et motivateur. Je sais combien tu as sacrifié pour moi même si tu ne dis rien alors merci d'être le meilleur père du monde. Je suis tellement fier d'être ta fille c'est pourquoi tous ce que je réalise pour te rendre fier, papa.*

*A mon exemple éternel,*

*Maman chérie, mon vrai binôme durant cinq années d'études, cette merveilleuse femme qui a œuvré pour ma réussite, Aucun mot n'est assez fort pour te remercier de m'avoir donné la vie. Une vie que tu as su remplir d'amour, de joie, de fous rires. Le simple fait d'entendre ta voix fait que tout va bien. Quand tu me dis que tout va bien se passer, je te crois. Voilà à quel point ta présence est magique pour moi.*

*A ma source d'énergie,*

*Mon étoile du bonheur ma Zora, ma sœur Nadjat et mes frères Amar et Abdelrahim, vous comptez beaucoup pour moi et chaque fois que je réalise quelque chose de monumental ou que j'accomplis quelque chose d'énorme je pense à vous. Les gens vont et viennent, mais vous serez une constante dans ma vie et dans mon cœur.*

Zoubida



*A M. Bensoucha,*

*Après toute l'aide que vous m'avez apportée une seule chose me vient à l'esprit ... Qu'ai-je fait pour le mériter ? Votre aide à ce moment si particulier de ma vie est un véritable cadeau. Un grand merci Pour tout l'encouragement et le respect que vous m'avez offert*

*A mon binôme Baloul Nour el houda,*

*Ma meilleure amie, j'aimerais t'écrire le plus beau de tous les textes qui puisse exister. Mais il y a tellement de choses à dire sur toi que je ne sais même pas par où je vais commencer. Je veux que tu saches que tu es ma sœur et quand le monde entier était contre moi tu as été la seule à m'ouvrir les bras. Merci d'être une telle amie.*

*A toutes les familles Dellag, Fetah, Makfilouf et Baloul,*

*Zoubida*



# *Table des matières*



## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

### ◆————◆    **Chapitre I**    ◆————◆

#### **I    DESCRIPTON DE LA LIGNE GK1**

Introduction .....	2
I.1 La société national de transport et distribution des hydrocarbures .....	2
I.2 Description technique du réseau de transport par canalisation .....	3
I.2.1 Description du réseau de transport de gaz .....	3
I.3 Description de l'installation TRC de Skikda .....	4
I.3.1 Objectif .....	4
I.3.2 Missions .....	4
I.4 Description des STC existantes .....	5
I.4.1 Le système de transport par canalisation (STC) 'GK1' .....	5
I.4.2 Schéma descriptif du STC 'GK1' .....	5
I.4.3 Caractéristiques de ligne GK1 .....	6
Conclusion .....	6

### ◆————◆    **Chapitre II**    ◆————◆

#### **II    APPROCHE SYSTEMIQUE DE LA MODELISATION DE FIABILITE, MAINTENABILITE ET DISPONIBILITE DES SYSTEMES MECANIQUE.**

Introduction .....	7
II.1 Approche systémique de la modélisation de fiabilité et disponibilité des systèmes complexes .....	7
II.2 Objectifs et l'intérêt de la fiabilité en mécanique.....	7
II.3 Fiabilité .....	8
II.3.1 Définition.....	8
II.3.2 Définition probabiliste .....	9
II.3.3 Types de la fiabilité .....	9

II.3.4	Expérience graphique de la fiabilité .....	11
II.3.4.1	Courbe de survie .....	11
II.3.4.2	Taux de défaillance $\lambda(t)$ .....	12
II.4	La maintenabilité .....	14
II.4.1	Définition .....	14
II.4.2	Définition probabiliste .....	15
II.4.3	La différence entre la maintenabilité et la maintenance .....	15
II.4.4	Type de maintenabilité .....	15
II.4.5	Taux de réparation $\mu(t)$ .....	16
II.4.6	Analogie des analyses de fiabilité et de maintenabilité .....	17
II.5	La disponibilité .....	18
II.5.1	Définition .....	18
II.5.2	Définition probabiliste .....	18
II.5.3	Types de disponibilité .....	18
II.5.4	Etude de disponibilité .....	19
II.5.5	Précisions sur MTBF ; MUT ; MDT ; MTTR.....	19
II.5.5.1	Chronogramme pour les matérielles réparables .....	20
II.5.5.2	Chronogramme pour les matérielles non réparables .....	21
II.5.6	Diagramme de fiabilité ou diagramme de succès (Reliability block diagram ....)	21
II.5.6.1	Définition .....	21
II.5.7	Etude de la disponibilité de quelques systèmes simples réparables .....	22
II.5.7.1	Cas des systèmes à configuration en série .....	22
II.5.7.2	Cas des systèmes à configuration en parallèle .....	23
II.5.7.2.1	Redondance active .....	23
II.5.7.2.1	Redondance passive .....	25
	Conclusion .....	26

### ◆ ————— ◆ Chapitre III ◆ ————— ◆

## III MODELISATION DE LA FIABILITE, DISPONIBILITE ET DE MAINTENABILITE DU GK1

	Introduction .....	27
III.1	Représentation des sous-systèmes par diagrammes de fiabilité .....	27
III.2	Modèle de base de fiabilité et de disponibilité des systèmes .....	28
III.3	Modélisation de fiabilité, disponibilité et maintenabilité du gazoduc .....	31
III.3.1	Reconstitution du système globale (gazoduc) .....	32
	Conclusion .....	42

◆ ————— ◆ **Chapitre IV** ◆ ————— ◆

## **IV MODELISATION DE FIABILITE ET DISPONIBILITE DU SYSTEME SC PAR GRAPHE DE MARCOV**

Introduction .....	43
IV.1 Graphe des états ' graphe de Markov .....	43
IV.2 Redondance passive .....	44
IV.3 Redondance active .....	45
IV.4 Calcul de la disponibilité et de la fiabilité d'un système TC de configuration (1+1) .....	46
IV.4.1 Calcul de la disponibilité par le modèle de YACIN .....	46
IV.4.2 Par graphe des états, graphe de Markov .....	47
IV.4.2.1 1 <sup>er</sup> cas (identiques) .....	47
IV.4.2.2 2 <sup>ème</sup> cas (non identiques).....	50
IV.5 Calcul de la disponibilité et de la fiabilité d'un système TC de configuration (3+1) .....	53
IV.5.1 Calcul de la disponibilité par le modèle de YACIN .....	53
IV.5.2 Par graphe des états, graphe de Markov .....	55
IV.5.2.1 1 <sup>er</sup> cas (identiques).....	55
IV.5.2.2 2 <sup>ème</sup> cas (non identiques).....	58
Conclusion .....	65

◆ ————— ◆ **Chapitre V** ◆ ————— ◆

## **V ESTIMATION DES INDICES DE FIABILITE DES TC PAR INFERENCE BAYESIENNE**

Introduction .....	66
V.1 Estimation des indices de fiabilité .....	66
V.1.1 Approche objective de l'estimation des indices de fiabilité .....	66
V.1.2 Approche subjective de l'estimation des indices de fiabilité .....	67
V.2 Simulation de Monte-Carlo .....	68
V.2.1 Génération de nombre pseudo-aléatoires .....	68
V.2.2 Méthode de la transformation inverse .....	69
V.2.3 Loi exponentielle .....	69
V.3 L'inférence bayésienne .....	70
V. 3.1 Théorème de bayes .....	70
V.3.2 La démarche bayésienne .....	70

V.4 Estimation du taux de défaillance $\lambda(t)$ .....	70
V.4.1 Simulation de Monte-Carlo .....	70
V.4.2 Distribution a priori .....	71
V.4.3 Distribution a posteriori .....	72
V.5 Estimation du taux de défaillance $\mu(t)$ .....	73
V.5.1 Simulation de Monte-Carlo .....	73
V.5.2 Distribution a priori .....	74
V.5.3 Distribution a posteriori .....	74
V.6 Application numérique .....	74
Conclusion .....	86

## ◆ ————— ◆ Chapitre VI ◆ ————— ◆

### VI ESTIMATION DES INDICES DE FIABILITE D'UN PIPE-LINE

Introduction .....	87
VI.1 Fiabilité du gazoduc GK1 .....	87
VI.1.1 Le taux de défaillance $\lambda_g(t)$ .....	87
VI.1.1.1 Correction du taux de défaillance .....	88
VI.1.1.1.1 Fréquences génériques de défaillance suivant les causes .....	88
VI.1.1.1.2 Adaptation de données génériques aux particularités de l'ouvrage GK1 .....	89
VI.2 Maintenabilité du gazoduc GK1 .....	92
VI.2.1 Le taux de réparation $\mu_g(t)$ .....	93
VI.2.1.1 Durée de vidange .....	94
VI.2.1.2 Durée de réparation .....	98
VI.2.1.3 Durée de purge .....	98
VI.2.1.4 Durée de remplissage .....	99

## ◆ ————— ◆ Chapitre VII ◆ ————— ◆

### VII ETUDE DE CAS : APPLICATION DE LA METHODOLOGIE DEVELOPPEE AU GAZODUC GK1

VII.1 Comparaison entre la fiabilité du GK1 sur la base de valeurs de paramètre de fiabilité fournie par les base des données internationales et estimées .....	101
--	-----

VII.2 Evaluation de fiabilité du gazoduc GK1 par rapport aux standards internationaux en tenant compte de la variation au niveau des indices de fiabilité de la canalisation.....	103
VII.3 Evaluation de fiabilité du gazoduc GK1 par rapport aux standards internationaux en tenant compte de la variation au niveau des indices de fiabilité des turbocompresseurs.....	105
VII.4 Comparaison entre la disponibilité et la maintenabilité du GK1 sur la base de valeurs de paramètre de fiabilité fournie par les base des données internationales et estimées ...	107
Conclusion .....	109
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>110</b>

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre I

N° FIGURE	TITRE DE LA FIGURE	PAGE
Figure I.1	Réseau de transport du gaz naturel en Algérie	4
Figure I.2	Schéma descriptif du STC 'GK1'	5

### Chapitre II

N° FIGURE	TITRE DE LA FIGURE	PAGE
Figure II.1	Sureté de fonctionnement FMD	8
Figure II.2	Les facteurs de la fiabilité d'un équipement	10
Figure II.3	Courbe S(t) en fonction du temps	11
Figure II.4	Courbe R(t) en fonction du temps	11
Figure II.5	Courbe en baignoire	13
Figure II.6	Type de maintenance	14
Figure II.7	Courbes de taux de réparation	16
Figure II.8	Chronogramme pour les matériels réparables	20
Figure II.9	Chronogramme pour les matériels non réparables	21
Figure II.10	Diagramme en parallèle	21
Figure II.11	Diagramme en série	22
Figure II.12	Schéma bloc d'un système série	22
Figure II.13	Schéma bloc d'un système parallèle à deux éléments	23
Figure II.14	Schéma bloc d'un système parallèle à « n » éléments	24
Figure II.15	Diagramme de fiabilité d'un système r/n	24
Figure II.16	Diagramme de fiabilité d'un système à redondance passive	25

### Chapitre III

N° FIGURE	TITRE DE LA FIGURE	PAGE
Figure III.1	Décomposition systémique de gazoduc GK1	27
Figure III.2	Diagramme de fiabilité du sous-système canalisation	28
Figure III.3	Schéma d'un gazoduc	31
Figure III.4	Schéma simplifié d'une SC	31
Figure III.5	Diagramme de fiabilité du sous-système 1	32
Figure III.6	Diagramme de fiabilité du sous-système 2	33
Figure III.7	Diagramme de fiabilité du sous-système 3	34
Figure III.8	Diagramme de fiabilité du sous-système 4	35
Figure III.9	Diagramme de fiabilité du sous-système 5	36
Figure III.10	Diagramme de fiabilité du sous-système 6	37
Figure III.11	Diagramme de fiabilité du système 7	38
Figure III.12	Diagramme de fiabilité du système globale	39

### Chapitre IV

N° FIGURE	TITRE DE LA FIGURE	PAGE
Figure IV.1	Graphe des états	43
Figure IV.2	Graphe des états pour la disponibilité	44
Figure IV.3	Graphe des états pour la disponibilité (redondance passive)	44
Figure IV.4	Graphe de Markov pour la fiabilité (redondance passive)	45
Figure IV.5	Graphe des états pour la disponibilité (redondance active)	45
Figure IV.6	Graphe des états pour la fiabilité (redondance active)	45
Figure IV.7	Graphe des états de la disponibilité de configuration (1+1) cas identique	47
Figure IV.8	Graphe des états de la fiabilité de configuration (1+1) cas identique	49
Figure IV.9	Graphe des états de la disponibilité de configuration (1+1) cas non identique	50
Figure IV.10	Graphe des états de la fiabilité de configuration (1+1) cas non identique	52
Figure IV.11	Graphe des états de la disponibilité de configuration (3+1) cas identique	55
Figure IV.12	Graphe des états de la fiabilité de configuration (3+1) cas identique	57
Figure IV.13	Graphe des états de la disponibilité de configuration (3+1) cas non identique	59
Figure IV.14	Graphe des états de la fiabilité de configuration (3+1) cas non identique	62

### Chapitre V

N° FIGURE	TITRE DE LA FIGURE	PAGE
Figure V.1	Simulation Monte-Carlo	71
Figure V.2	Principe de l'estimation bayésienne des indices de fiabilité	73
Figure V.3	Distribution a priori gamma de $\lambda$	77
Figure V.4	Distribution a posteriori gamma de $\lambda_1$	79
Figure V.5	Distribution a posteriori gamma de $\lambda_2$	79
Figure V.6	Distribution a posteriori gamma de $\lambda_3$	80
Figure V.7	Distribution a posteriori gamma de $\lambda_4$	81
Figure V.8	Distribution a priori gamma de $\mu$	83
Figure V.9	Distribution a posteriori gamma de $\mu_1$	84
Figure V.10	Distribution a posteriori gamma de $\mu_2$	85
Figure V.11	Distribution a posteriori gamma de $\mu_3$	85
Figure V.12	Distribution a posteriori gamma de $\mu_4$	86

## Chapitre VI

N° FIGURE	TITRE DE LA FIGURE	PAGE
Figure VI.1	Causes de défaillance de gazoduc en % (source EGIG)	89
Figure VI.2	Facteur de réduction en fonction du coefficient de sécurité design	90
Figure VI.3	Facteur de réduction en fonction de l'épaisseur	90
Figure VI.4	Facteur de réduction en fonction de la profondeur d'enfouissement de la canalisation	91
Figure VI.5	Facteur de réduction en fonction de la fréquence de patrouillage	91
Figure VI.6	Taux de défaillance par tronçon du gazoduc GK1	92
Figure VI.7	La succession des opérations suite à une défaillance de la canalisation	93
Figure VI.8	Durée de dépressurisation (vidange) par tronçon	98
Figure VI.9	Durée de purge par tronçon	99

## Chapitre VI

N° FIGURE	TITRE DE LA FIGURE	PAGE
Figure VII.1	La fiabilité selon la base des données internationale	102
Figure VII.2	La fiabilité du gazoduc établie sur la base de valeurs de taux de défaillance estimés	102
Figure VII.3	Comparaison entre la fiabilité du gazoduc GK1 et celle selon la base les données de la base de données internationale	103
Figure VII.4	Comparaison entre la fiabilité du gazoduc avec les données de la BDI et avec un $\lambda_C$ plus grand	104
Figure VII.5	Comparaison entre la fiabilité du gazoduc avec les données de la BDI et avec un $\lambda_C$ plus petit	104
Figure VII.6	Comparaison entre la fiabilité du gazoduc avec les données de la BDI et avec un $\lambda_{TC}$ plus grand	105
Figure VII.7	Comparaison entre la fiabilité du gazoduc avec les données de la BDI et avec un $\lambda_{TC}$ plus petit	106
Figure VII.8	La maintenabilité du GK1 établie sur la base de taux de réparation des éléments issus des bases des données internationales	108
Figure VII.10	La maintenabilité du GK1 établie sur la base de taux de réparation estimé des éléments	108
Figure VII.11	Comparaison entre la maintenabilité du gazoduc GK1 pour des taux de réparation des éléments issus des BDI et estimés	109

## LISTE DES TABLEAUX

### Chapitre I

N° TABLEAU	TITRE DU TABLEAU	PAGE
Tableau I.1	Caractéristiques de la ligne GK1	6

### Chapitre II

N° TABLEAU	TITRE DU TABLEAU	PAGE
Tableau II.1	Analogie des analyses de fiabilité et de maintenabilité	17
Tableau II.2	Les modèles de probabilité de panne	25

### Chapitre III

N° TABLEAU	TITRE DU TABLEAU	PAGE
Tableau III.1	Récapitulatif des modèles de base de la fiabilité	29
Tableau III.2	Récapitulatif des modèles de base de la disponibilité	30

### Chapitre IV

N° TABLEAU	TITRE DU TABLEAU	PAGE
Tableau IV.1	Matrice de transition de la disponibilité	59
Tableau IV.2	Matrice de transition de la fiabilité	63

### Chapitre V

N° TABLEAU	TITRE DU TABLEAU	PAGE
Tableau V.1	Données du turbocompresseur 1	75
Tableau V.2	Données du turbocompresseur 2	75
Tableau V.3	Données du turbocompresseur 3	75
Tableau V.4	Données du turbocompresseur 4	75
Tableau V.5	Exemple de la génération de nombre pseudo-aléatoire	76
Tableau V.6	Exemple de TBF générer	76
Tableau V.7	Exemple de la génération de nombre pseudo-aléatoire	81
Tableau V.8	Exemple de TTR générer	82

**Chapitre VI**

<b>N° TABLEAU</b>	<b>TITRE DU TABLEAU</b>	<b>PAGE</b>
Tableau VI.1	Causes de défaillances de gazoduc en % (source EGIG)	88
Tableau VI.2	Le taux de défaillance globale du gazoduc GK1	92
Tableau VI.3	Exemple de calcul de la durée de dépressurisation	97
Tableau VI.4	Durée de purge par tronçon du gazoduc GK1	99
Tableau VI.5	Durée de pressurisation par tronçon	100
Tableau VI.6	Taux de réparation global et par tronçon	100

**Chapitre VI**

<b>N° TABLEAU</b>	<b>TITRE DU TABLEAU</b>	<b>PAGE</b>
Tableau VII.1	La fiabilité du GK1 selon la BDI et selon les valeurs estimées	101
Tableau VII.2	La disponibilité et la maintenabilité du GK1 selon la BDI et selon les valeurs estimées	107

## GLOSSAIRE

### B

**BEF** : Bon état de fonctionnement

**BDI** : Base des données internationales

### C

**CNDG** : Centre national de dispatching gaz

**CDHL** : Centre de dispatching de Haoud El Hamra

### E

**ENIP** : Entreprise Nationale des Industries Pétrochimie

**ENGTP** : Entreprise nationale des grands travaux pétroliers

**ENAC** : Entreprise Nationale de Canalisations

**EGIG** : Data group européen des incidents du gazoduc

### F

**FMD** : Fiabilité, maintenabilité, disponibilité

### G

**GPL** : Gaz de pétrole liquéfié

**GK1** : Gazoduc de Skikda N°1

### M

**MTBF** : La moyenne du temps de bon fonctionnement

**MTTR** : La moyenne du temps technique de réparation

### P

**PK** : Point kilométrique

### R

**RTE** : La région de transport Est

### S

**SC** : Station de compression

**SA** : Système auxiliaire

### T

**TC** : Turbocompresseur

**TBF** : Temps de bon fonctionnement

### U

**UKOPA** : l'Association des exploitants de pipelines terrestres du Royaume-Uni

# Résumé

---

« Ce qui se dit en trois mots n'est jamais si bien dit en quatre ; et un bon livre n'est pas celui qui dit tout , mais qui fait beaucoup penser »

- André Chénier -

## RESUME

Les gazoducs sont des structures complexes et sensibles au sein des systèmes gaziers. Les réseaux de gazoducs comprennent principalement des stations de compression et des conduites. Les stations de compression, quant à elles, comprennent plusieurs turbocompresseurs installées, dans la plupart des cas, en redondance passive. La modélisation de la disponibilité des pipelines est un processus important pendant les phases d'exploitation et de conception. Pour la modélisation de la disponibilité des systèmes complexes tels que les gazoducs de transport, les principaux inconvénients sont les difficultés liées aux énormes dimensions de l'espace des phases. Dans cette étude, pour réduire l'espace à des dimensions gérables, une approche systémique de décomposition et de reconstruction est utilisée. Une représentation des sous-systèmes par diagrammes de fiabilité permet alors une estimation plus aisée des probabilités associées à chaque état. Enfin, une démarche bottom up autorise la reconstitution des modèles global de fiabilité et de disponibilité du gazoduc qui permettent par la suite de comparer l'état de fonctionnement de ce dernier en utilisant des valeurs estimés et d'autres valeur tirés de la base des données internationale.

**Mots-clés :** Gazoduc, disponibilité, fiabilité, décomposition systémique, diagramme de fiabilité.

## ABSTRACT

Gas pipelines are complex and sensitive structures within gas systems. Gas pipeline networks encompass mainly compression stations and pipelines. Compressor stations, on the other hand, include several compression units installed, in most cases, in passive redundancy. Pipeline availability modeling is an important process during operation and design phases. For complex systems availability modeling such as transmission gas pipelines, the main drawbacks are difficulties related to the huge dimensions of space of phases. In this study, to reduce the space to manageable dimensions, a systemic decomposition and reconstruction approach is used. A representation of the subsystems reliability block diagrams then allows an easier estimation of the probabilities associated with each state. Finally, a bottom-up approach authorizes the reconstitution of global models of reliability and availability of the gas pipeline which then make it possible to compare operation state of the latter by using estimated values and other values taken from the international database.

**Keywords:** Gas pipeline, availability, reliability, systemic decomposition, reliability block diagram.

## ملخص

خطوط أنابيب الغاز هي هياكل معقدة وحساسة داخل أنظمة الغاز. تشمل شبكات خطوط أنابيب الغاز بشكل أساسي محطات الضغط والأنابيب. من ناحية أخرى، تشتمل محطات الضاغط على عدة وحدات ضغط مثبتة، في معظم الحالات تكون في تكرار سلبي. تعد نمذجة توفر خطوط الأنابيب عملية مهمة أثناء مرحلتي التشغيل والتصميم بالنسبة لنمذجة توفر الأنظمة المعقدة مثل خطوط أنابيب نقل الغاز، تتمثل العوائق الرئيسية في الصعوبات المتعلقة بالأبعاد الضخمة للمساحة. في هذه الدراسة، لتقليل المساحة إلى أبعاد يمكن التحكم فيها، تم استخدام نهج منهجي للتفكيك وإعادة البناء. يسمح تمثيل الأنظمة الفرعية بواسطة مخططات الموثوقية إذا بتقدير أسهل للاحتمالات المرتبطة بكل حالة.

أخيرًا، يسمح لنا النهج التصاعدي بإعادة تشكيل النماذج الإجمالية لموثوقية و توافر خط انابيب الغاز مما يجعل من الممكن بعد ذلك مقارنة حالة تشغيل هذا الاخير باستخدام القيم المقدرة و قيم اخرى ماخوذة من قاعدة البيانات الدولية .

**الكلمات المفتاحية:** خط أنابيب الغاز، التوافر، الموثوقية، التفكيك المنهجي، مخطط الموثوقية.

# *Introduction générale*

---

« D'une image d'un objet, le cerveau humain retire une multitude d'information, est-il possible de doter une machine d'une telle capacité d'analyse ? »

**- Jean Serra-**

“

## Introduction générale

L'Algérie est l'un des plus grands pays producteur de gaz naturel. D'un point de vue sécurité, bien que le gaz naturel soit non-toxique, il peut être très dangereux s'il n'est pas manipulé correctement. Une rupture partielle ou complète d'un gazoduc, entraîne un rejet accidentel, causera une formation d'une nappe et d'un nuage de gaz naturel inflammable en fonction de l'importance de la fuite.

Les gazoducs sont des systèmes complexes étendus en longueur (plusieurs centaines de kilomètres) destinés au transport du gaz naturel par canalisation.

Un gazoduc est composé d'un certain nombre de stations de compression (SC) espacées de centaines de kilomètres les unes des autres et destinées à fournir l'énergie de pression nécessaire à l'écoulement du gaz dans la conduite. L'équipement principal des SC est constitué de turbocompresseurs (TC) disposés généralement en parallèle.

Les turbocompresseurs des stations de compression, ainsi que les canalisations des gazoducs sont des éléments essentiels dans le transport du gaz naturel, leur niveau de performance conditionne au plus haut point la performance d'un gazoduc, l'évaluation de la performance de ces systèmes nécessite la mise au point de modèle mathématique permettant de repérer les anomalies et les écarts qui nous séparent des standards internationaux. En pratique, l'estimation des indices de fiabilité se fait sur la base du retour d'expérience. Cependant l'estimation de ces paramètres dépend essentiellement de la qualité et de la disponibilité en nombre suffisant des données recueillies sur ces équipements.

Nous présenterons en premier lieu dans notre travail la modélisation de la disponibilité et de la fiabilité du gazoduc GK1 en se basant sur une décomposition hiérarchique à trois niveaux et un diagramme de fiabilité représentant le schéma fonctionnel du système.

À ce stade de notre étude, nous aborderont la modélisation du système turbocompresseurs au niveau des SC en usant des graphes de Markov en considérant différentes configurations et hypothèses permettant d'approcher le plus fidèlement possible les réalités d'exploitation.

Le deuxième volet portera sur approche d'estimation des paramètres de fiabilité des TC par inférence bayésienne.

Le troisième volet portera sur l'évaluation des indices de fiabilité de la canalisation.

Enfin, le calcul de la FMD en considérant l'information estimée, d'une part et l'information issue des bases de données internationales d'autre part permet d'évaluer l'écart par rapport aux standards internationaux, de situer et décélérer les maillons faibles du système et d'analyser l'impact de toute action permettant d'améliorer sa fiabilité.

# *Chapitre I*

Description de la ligne GK1

« La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi »

**-Albert Einstein-**

## Introduction

Dans ce chapitre, sera présenté la description technique du réseau de transport par canalisation ainsi que une aperçu de l'installation TRC de Skikda suivi d'une description des STC existantes plus particulièrement le GK1 et ses caractéristiques.

### I.1 La société nationale de transport et distribution des hydrocarbures :

SONATRACH acronyme : « Société Nationale de Transport et Commercialisation des Hydrocarbures » a été créée le 31/12/1963 par le décret N° 63/491. La SONATRACH devait s'occuper uniquement du transport et de la commercialisation des hydrocarbures. Cependant son importance ira en croissance à partir de 1966 où des statuts modificatifs ont été élaborés par le décret N°66/292 du 22/09/1966.

La SONATRACH ne se chargera pas uniquement du transport, de la production et de la commercialisation, elle sera également responsable de la recherche et de la transformation des hydrocarbures.

Le 24/02/1971, la nationalisation s'étendit à tous les secteurs des hydrocarbures. Cela a conduit à une restructuration de l'entreprise dans le cadre d'un schéma directeur approuvé au début 1981 pour une meilleure efficacité organisationnelle et économique.

De ce principe la SONATRACH a donné naissance à 18 entreprises (NAFTAL, ENIP, ENGTP, ENAC, etc.....). Après sa restructuration et sa réorganisation en 1985 la SONATRACH s'est basée sur ses métiers de base constitués par les activités suivantes :

- Exploitation et recherche.
- Exploitation des gisements des hydrocarbures.
- La liquéfaction et la transformation du gaz.
- La commercialisation.
- Le transport par canalisation.

En effet, la macrostructure de la SONATRACH s'articule autour de trois directions essentielles :

- La Direction Générale.
- La Direction Fonctionnelle.
- L'Activité Opérationnelle.

Cette dernière (activité opérationnelle) est composée de quatre activités nationales :

- Activité amont (AMI).
- Activité aval (AVL).
- Activité commerciale.

## **I.2 Description technique du réseau de transport par canalisation :**

Le réseau de transport par canalisation assure le transport, au profit des utilisateurs, de toute production d'hydrocarbures des points d'entrée aux points de sortie. Il permet également d'alimenter le marché national.

### **I.2.1 Description du réseau de transport de gaz :**

Le réseau de transport des hydrocarbures gazeux est constitué d'un ensemble de canalisations, de stations de compression assurant le transport du gaz à partir d'un centre de dispatching.

Ce réseau de transport est composé de deux parties complémentaires :

- Un réseau sud, qui assure le transport :
  - Des effluents issus des gisements vers Hassi-R'mel (CNDG) pour le Gaz naturel.
- Un réseau nord, qui assure le transport :
  - du Gaz naturel du CNDG vers le marché national, les Gazoducs destinés à l'exportation et les complexes de liquéfaction
  - du GPL de Hassi-R'mel vers les complexes de séparation

Le choix des tracés des canalisations répond, en plus des aspects liés à la sécurité des personnes et des biens, à des critères d'optimisation économique et des distances de raccordement, pour l'ensemble des Utilisateurs. Ce réseau est délimité par le centre de dispatching gazeux de Hassi R'mel (CNDJ).

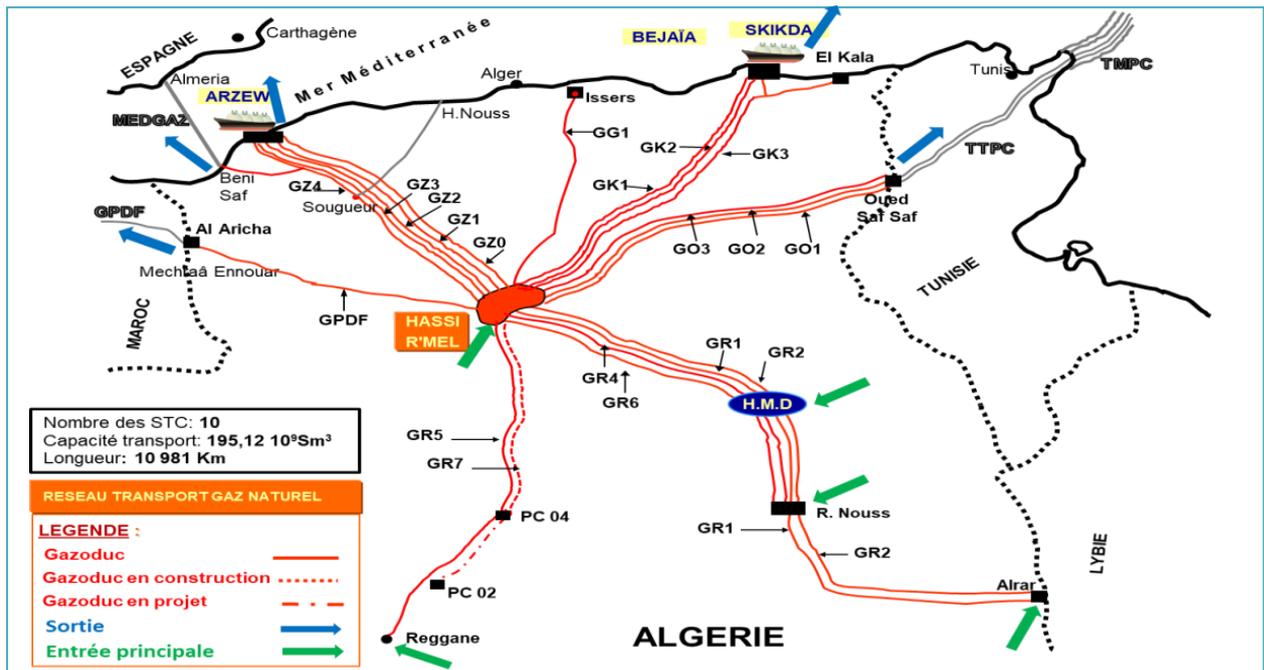


Figure I.1. Réseau de transport du gaz naturel en Algérie

### I.3 Description de l'installation TRC de Skikda :

SONATRACH branche «Transport par canalisation» (TRC) a pour objectif l'acheminement des hydrocarbures liquides et gazeux des champs de production vers les centres de consommation ou de transformation, les frontières et les ports pétroliers pour l'exploitation. La Région de Transport Est (RTE) est l'une des sept régions de la division exploitation (EXL) de la branche transport par canalisation de SONATRACH. Son siège, implanté au sein de la zone industrielle des hydrocarbures, est situé à l'Est de la ville de Skikda.

#### I.3.1 Objectif :

La région de transport Est Skikda a pour objectif le transport des hydrocarbures liquides et gazeux par canalisation à partir des centres de dispatching de Haoud El Hamra (CDHL) et Hassi R'mel (CNDG) vers les centres de consommation ou de transformation et les ports pétroliers de Skikda

#### I.3.2 Missions :

- Exploitation des canalisations, stations de pompages et de compression, terminaux et ports pétroliers.
- Livraison des hydrocarbures aux marchés national et international.
- Maintenance, protection et sécurité.

#### I.4 Description des STC existantes :

Le réseau existant de transport du gaz naturel sur l'axe Est, est constitué d'un système de transport par canalisation GK1/GK2 d'une capacité annuelle de transport de 20,70 Milliards de  $\text{Cm}^3$  par an.

##### I.4.1 Le Système de transport par canalisation (STC) GK1 :

Le STC GK1 est composé :

- D'un gazoduc d'une longueur de 574,87 km et d'un diamètre de 40".  
Sa capacité design de 6,5 Milliards de  $\text{Cm}^3/\text{an}$ .
- On a cinq (05) stations de compression, avec une puissance unitaire de 58 400 CV.
  - SC.A au niveau du PK 83,2 (Hassi Dellaa - Laghouat )
  - SC.B au niveau du PK 179,37 (Oued Djelloul - Biskra)
  - SC.C au niveau du PK 270,78 (Chaïba - Biskra)
  - SC.D au niveau du PK 354,89 (Séfiane - Batna)
  - SC.E au niveau du PK 430,79 (M'Chtatine - Mila).

Cet ouvrage mit en service en 1971, conçu pour une capacité design de 13,5 Milliards de  $\text{Cm}^3/\text{an}$ . Actuellement, l'ouvrage est exploité en écoulement libre à 3,9 Milliards de  $\text{Cm}^3/\text{an}$ .

##### I.4.2 Schéma descriptif du STC 'GK1' :

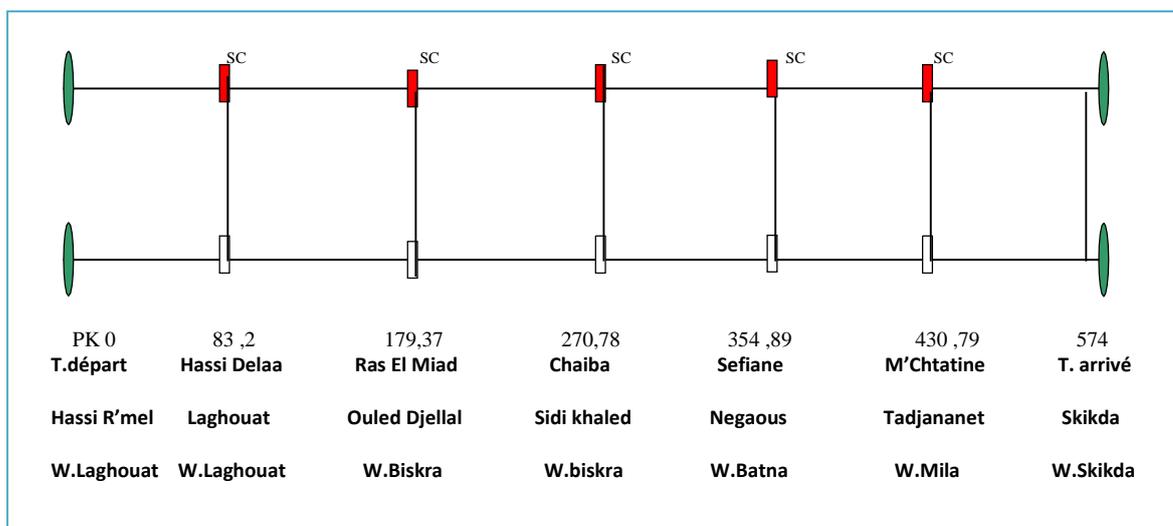


Figure I.2.Schéma descriptif du STC 'GK1'

**I.4.3 Caractéristiques de ligne GK1 :**

Longueur ( Km )	574,87
Diamètre en pouce	40"
Épaisseur du Tube ( mm )	12,7/15,88/19,43
Nombre de Station de compression	5
Facteur de Marche	330 Jours
Capacité Design	$13.35 \cdot 10^9 \text{ Sm}^3/\text{an}$
Capacité Actuelle	$3,86 \cdot 10^9 \text{ Sm}^3/\text{an}$
Date de mise en service	1971

Tableau I.1. Caractéristiques de la ligne GK1

**Conclusion :**

Le GK1 est composé d'un gazoduc (6 tronçons) et de cinq (05) stations de compression, chaque station de compression dispose de 3 turbocompresseurs en fonctionnement et 1 en réserve (stand-by).

# *Chapitre II*

Approche systémique de la modélisation de fiabilité, Maintenabilité  
et disponibilité des systèmes mécaniques

»  
« Innover, ce n'est pas avoir une nouvelle  
idée mais arrêter d'avoir une vieille idée »

**-Edwin Herbert Land-**

“

## **Introduction :**

L'analyse de la fiabilité dans le domaine de la mécanique est un outil très important pour caractériser le comportement du produit dans les différentes phases de vie. Mesurer l'impact des modifications de conception sur l'intégrité du produit, qualifier un nouveau produit et améliorer ses performances tout au long de sa mission. La maintenabilité par analogie à la fiabilité exprime un intérêt considérable au maintien des équipements en état de service et par conséquent assuré leur disponibilité.

### **II.1. Approche systémique de la modélisation de fiabilité et disponibilité des systèmes complexes :**

Un système est constitué d'un ensemble d'éléments en interaction dont chacun concourt à l'objectif commun ou finalité du système. Adopter une approche systémique, c'est adopter une démarche pour étudier ce système qui s'efforce, au lieu de saisir séparément les différentes parties, d'appréhender de façon globale l'ensemble des composants du système en s'intéressant tout particulièrement à leurs liaisons et à leurs interactions. C'est aussi chercher à comprendre comment chaque élément contribue à la finalité du système tout en préservant sa propre identité.

Dans une étude FMD (Fiabilité, Maintenabilité et disponibilité), l'avantage de l'approche systématique est la décomposition d'un système global complexe dont la modélisation serait aussi complexe, en sous-systèmes plus simples. Chaque sous-système étant lui-même susceptible d'être décomposé à son tour en sous-systèmes de niveau inférieur et cette décomposition dépendra du degré de précision à atteindre. L'élément ne peut être décomposé car il est considéré comme la base du sous-système. À partir des modèles obtenus au niveau de ces derniers il est possible de reconstituer le modèle global du système étudié.

### **II.2. Objectifs et intérêts de la fiabilité en mécanique :**

L'analyse de la fiabilité constitue une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement (FMD), à l'origine la fiabilité concernait les systèmes à haute technologie (centrales nucléaires, aérospatial). Aujourd'hui, la fiabilité est devenue un paramètre clé de la qualité et d'aide à la décision, dans l'étude de la plupart des composants, produits et processus "grand public": Transport, énergie, bâtiments, composants électroniques, composants mécaniques...etc. De nombreux industriels travaillent à l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité de leurs produits au cours de leur cycle de développement, de la conception à la mise en service (conception, fabrication et exploitation) afin de développer leurs connaissances sur le rapport Coût/Fiabilité et maîtriser les sources de défaillance (usure, fatigue, vieillissement, altérations physico-chimique diverses)

Le but de la fiabilité et de la maintenabilité est de garantir au client un usage prévu au cout total minimal pendant la période spécifiée, dans des conditions d'entretien et de réparation précises

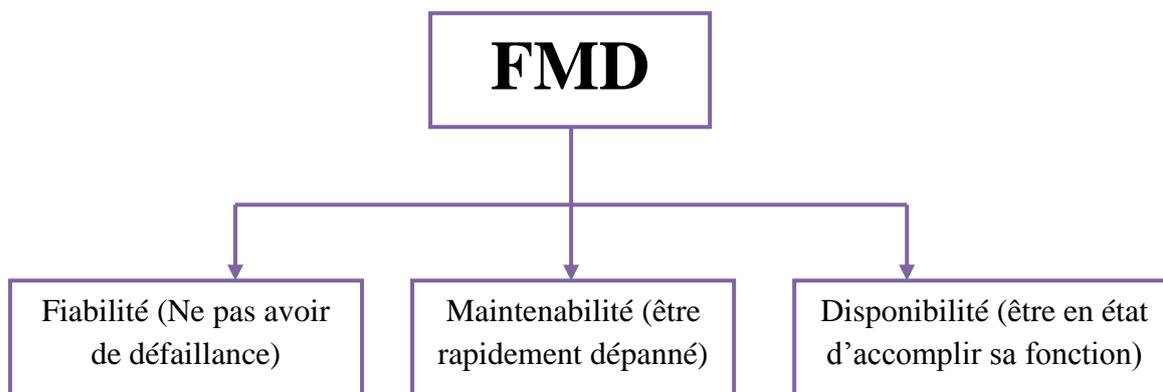


Figure II.1.Sureté de fonctionnement FMD

On peut définir trois grandeurs:

1. La fiabilité « reliability » qui mesure la continuité de service
2. La maintenabilité « maintainability » qui est l'aptitude aux réparations et aux évolutions
3. La disponibilité « availability » qui est le fait d'être prêt à l'utilisation

### II.3. Fiabilité:

Le terme « fiabilité » est un néologisme introduit dans les années 60 pour traduire le terme anglo-saxon « reliability » et si l'on accepte de la considérer comme une science, elle peut être définie comme ‘‘ la science des défaillances ’’.

#### II.3.1. Définition:

La fiabilité (Reliability en anglais) est une fonction de temps qui estime par des méthodes statistique l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions données et pour un intervalle de temps donné.

La notion de fiabilité s'applique :

- **A des systèmes réparables** (Pratiquement, on utilise la disponibilité comme grandeur caractéristique de fiabilité) tels que les équipements industriels ou domestiques.
- **A des systèmes non réparables** (Pratiquement, dans ces systèmes la fiabilité s'exprime comme la probabilité que l'unité considérée remplisse sa fonction

pendant une durée fixée ou ne tombe pas en panne pendant ce temps) tels que lampes, composants donc jetables.

### II.3.2. Définition probabiliste :

La fiabilité est la caractéristique d'un dispositif exprimée par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation données et pour une période de temps déterminée.

- **Fonction requise** : ou accomplir une mission ou rendre le service attendu. La définition de la fonction requise implique un seuil d'admissibilité en deçà duquel la fonction n'est plus remplie.
- **Conditions d'utilisation** : définition des conditions d'usage, c'est à dire l'environnement et ses variations, les contraintes mécaniques, chimiques, physiques, etc. Il est évident que le même matériel placé dans deux contextes de fonctionnement différents n'aura pas la même fiabilité.
- **Période du temps** : définition de la durée de mission T en unités d'usage.

Par extension, on appelle également fiabilité, la probabilité associée  $R(t)$  à cette notion. Elle est définie par :

$$R(t) = P(E \text{ non défailante sur la durée } [0, t]).$$

On notera :  $F(t)$  la fonction défiabilité, et elle est définie par :  $F(t)=1-R(t)$ .

### II.3.3. Types de la fiabilité :

La fiabilité d'un système est liée à ses caractéristiques intrinsèques, au mode d'utilisation et à son environnement. De cet aspect global, il est possible de définir trois types de fiabilité :

- **La fiabilité opérationnelle** : (observée ou estimée) déduite de l'analyse d'entités identiques dans les mêmes conditions opérationnelles réelles. En d'autres termes, il s'agit d'un traitement statistique d'un retour d'expérience, cette fiabilité est définie par :

$$R(t) = \text{nombre moyen d'entités non défailantes à l'instant 't' / nombre totale d'entités } [0, t]$$

- **La fiabilité prévisionnelle** : (prédite) correspondant à la fiabilité future d'un système et à partir de considérations sur la conception du système et la fiabilité opérationnelle (supposée connue) de ses composants.
- **La fiabilité extrapolée** : déduite de la fiabilité opérationnelle par extrapolation ou interpolation pour des conditions ou des durées différentes.

La fiabilité d'un équipement dépend de nombreux facteurs :

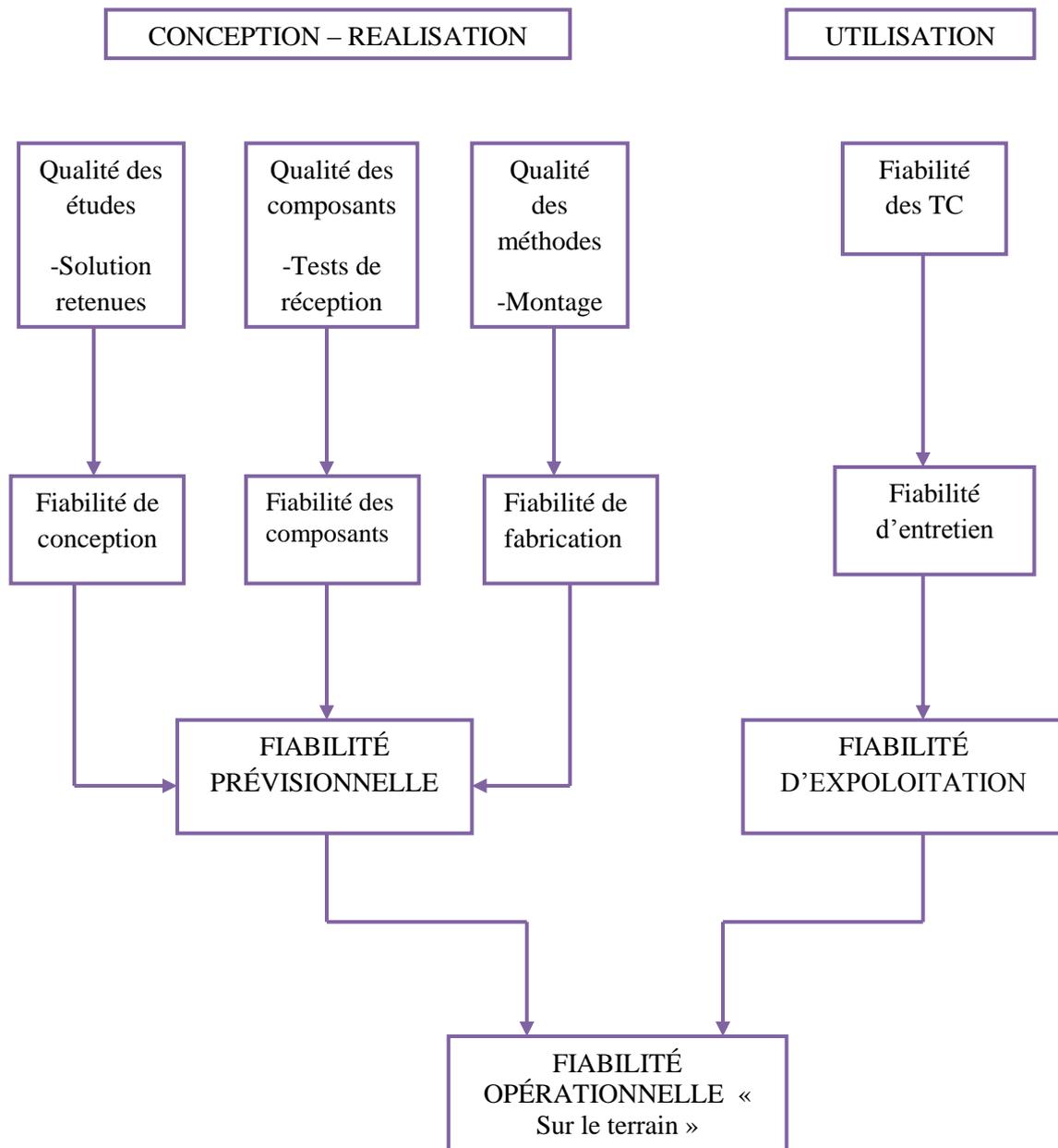


Figure II.2. Les facteurs de la fiabilité d'un équipement

### II.3.4. Expériences graphique de la fiabilité :

#### II.3.4.1. Courbe de survie :

Soit un échantillon de  $N_0$  éléments en bon état de marche à l'instant « 0 » au début de l'étude.

A l'instant « t », en fonction du nombre total des défaillances « N » survenues, le nombre d'éléments survivants sera :

$$N_0 - N(t) = S(t) \quad (\text{II.1})$$

La courbe  $S(t)$  "en fonction du temps" est la « **courbe de survie** »

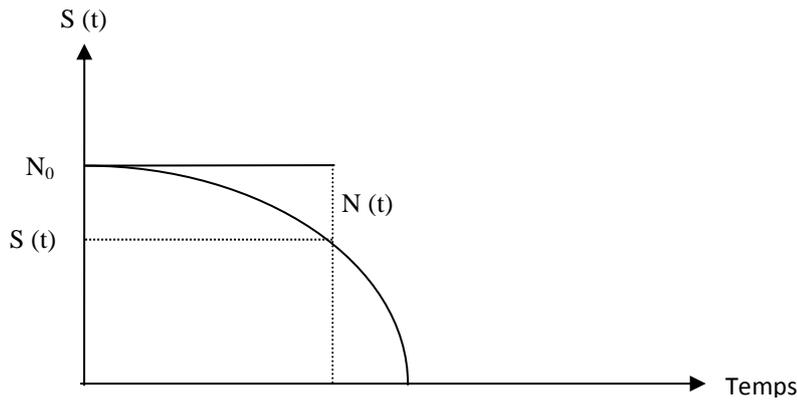


Figure II.3. Courbe  $S(t)$  en fonction du temps

On peut porter en ordonnées au lieu du nombre de survivants le rapport :

$$R(t) = \text{Nombre de survivant} / N_0 \quad (\text{II.2})$$

On obtient alors la même courbe partant du point d'ordonnée 1 mais avec une échelle différente en ordonnées.

$0 < R(t) < 1$  est égale au nombre de cas favorables (éléments en vie) rapporté au nombre de cas possibles  $N_0$ .

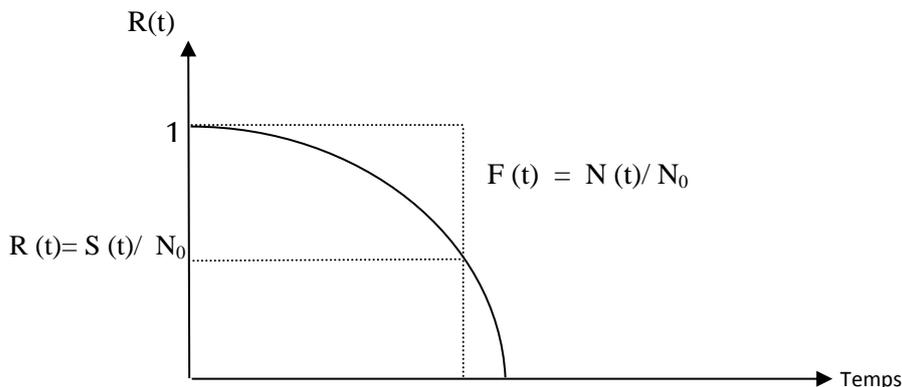


Figure II.4. Courbe  $R(t)$  en fonction du

C'est donc la probabilité pour qu'à un instant « t » il y ait un pourcentage  $R(t)$  d'éléments en bon état.

Fréquence cumulée des défaillances :

$$F(t) = \frac{N(t)}{N_0} \quad (\text{II. 3})$$

### II.3.4.2. Taux de défaillance $\lambda(t)$ :

Le taux de défaillance d'un composant est une fonction du temps. Il donne une fréquence d'occurrence instantanée de défaillance pour un intervalle de temps très court. Cette fréquence d'occurrence instantanée augmente généralement avec le temps. [1]

$$\lambda(t)dt = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (\text{II. 4})$$

On peut mettre en évidence plusieurs types de défaillances suivant la manière, l'instant, les causes et les conséquences (effets) qui caractérisent leurs manifestations :

#### a. la manière :

- **Rapidité:** défaillance progressive ou soudaine (prévisible ou non par contrôles et surveillances) ;
- **Amplitude:** défaillance partielle ou complète (disparition partielle ou complète de la fonction requise) ;
- **Rapidité et amplitude:** défaillance catalectique ou par graduation (soudaine et complète, ou progressive et partielle).

#### b. l'instant :

Ceci fait référence à l'évolution du taux de défaillance des composants pendant leur vie. Cette évolution se divise en trois périodes ( figure 5: courbe en " baignoire " ):

- **La période de jeunesse 1 :** décroissance plus ou moins rapide du taux de défaillance jusqu'à un minimum
- **La période du taux de défaillance constant 2 :** taux de défaillance pratiquement constant (palier)
- **la période de fin de vie 3 :** croissance plus ou moins rapide du taux de défaillance depuis le palier.

Cette courbe conduit à la distinction de trois types de défaillances :

- Défaillance précoce (période de jeunesse) ;
- Défaillance à taux constant ou aléatoire (vie utile) ;
- Défaillance par vieillissement ou d'usure (période de fin de vie).

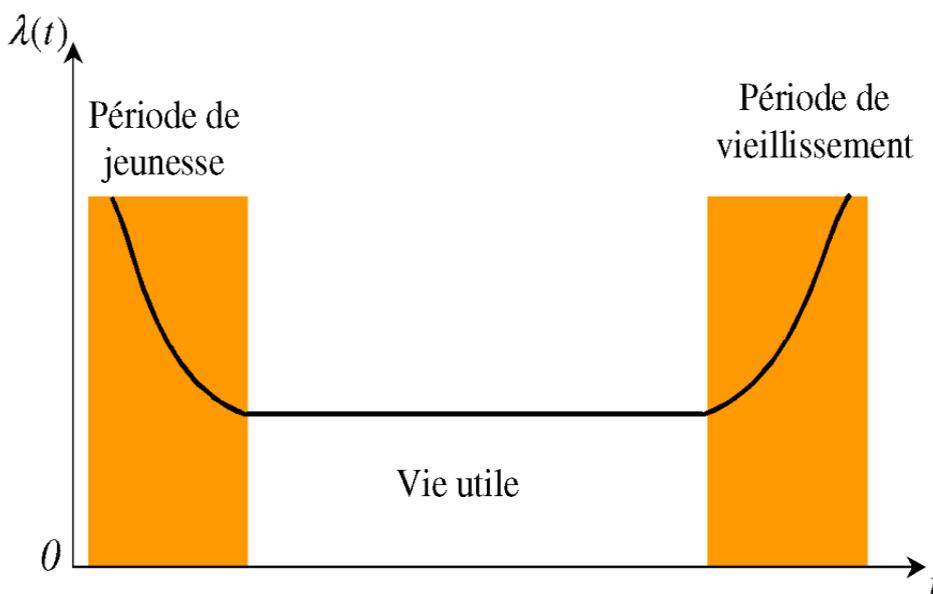


Figure II.5. Courbe en baignoire

L'allure de cette courbe peut varier suivant le type du matériel. Le palier peut être plus ou moins marqué.

**c. les causes :**

Les origines d'une défaillance peuvent être de natures différentes :

- Défaillance première (la défaillance est due uniquement à l'entité elle-même qui est utilisée conformément aux spécificités prévues)
- Défaillance secondaire (la défaillance est semblable à la précédente, mais hors spécificités)
- Défaillance de commande (même processus mais l'autre entité est émettrice de commandes et peut être corrigée pour rétablir le fonctionnement).

**d. les conséquences (effets) :**

On peut différencier quatre classes d'effets des défaillances :

- Défaillance mineure (nuisance au bon fonctionnement du système, dommages négligeables à tous les niveaux) ;
- Défaillance significative (nuisance au bon fonctionnement du système, dommages non notables et sans risque important pour l'homme) ;

- Défaillance critique (perte de fonctions essentielles du système, dommages importants au système et environnement, risque négligeable de blessure ou de mort) ;
- Défaillance catastrophique (perte de fonctions essentielles du système, dommages importants au système et environnement, risque de mort ou dommages corporels).

## II.4. La Maintenabilité :

### II.4.1. Définition :

La maintenabilité est une caractéristique précisant la facilité et la rapidité avec lesquelles un système peut être remis en un état de fonctionnement total avec une fiabilité correspondant à son âge.

Maintenabilité = être rapidement dépanné

La maintenabilité d'un dispositif représente son aptitude à être :

- Maintenu (maintenance préventive)
- Rétabli (maintenance corrective).

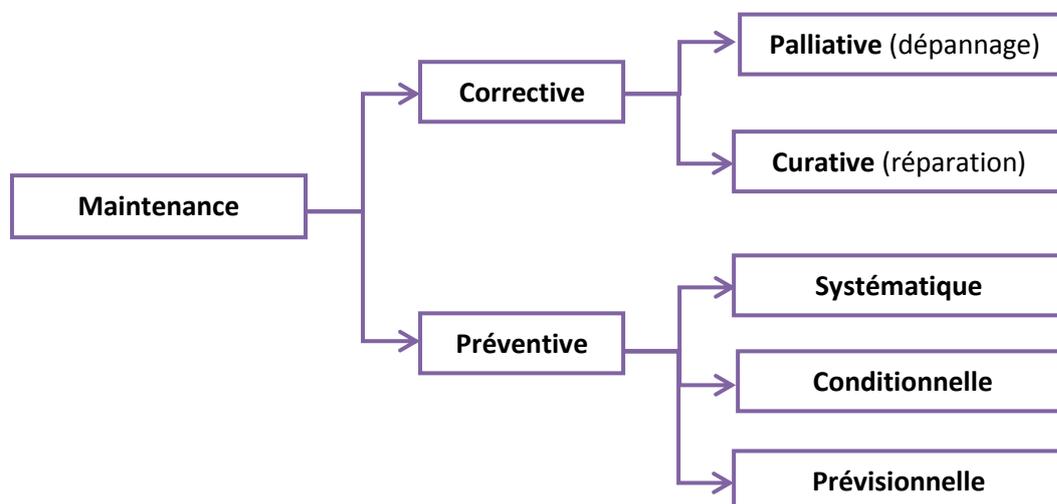


Figure II.6.Type de maintenance

#### II.4.2. Définition probabiliste :

La maintenabilité est la probabilité pour qu'une opération donnée de maintenance active puisse être effectuée pendant un intervalle de temps donnée.

$$M(t) = P(\text{Système est réparé sur l'intervalle } [0, t])$$

Cette fonction est caractérisée par un taux de réparation  $\mu(t)$ , qui est l'inverse du temps moyen de réparation MTTR (Mean Time To Repair; moyenne des temps de réparation) et L'immaintenabilité correspond à la probabilité contraire, soit :

$$\bar{M}(t) = 1 - M(t) \quad (\text{II.5})$$

#### II.4.3. La différence entre la maintenabilité et la maintenance :

Pour un technicien de maintenance, la maintenabilité est la capacité d'un équipement à être rétabli lorsqu'un besoin de maintenance apparaît. L'idée de « facilité de maintenir » se matérialise par des mesures réalisées à partir des durées d'intervention.

Il est évident que la maintenabilité intrinsèque est le facteur primordial pour que la maintenance soit performante sur le terrain. En effet, une amélioration ultérieure de la maintenabilité initiale n'est jamais une chose facile.

Il est donc indispensable que la maintenance sache définir ses besoins et les intégrer au cahier des charges d'un équipement nouveau afin que celui-ci puisse être facilement maintenable.

#### Remarque :

La maintenance comprend des activités telles que surveillance, *essai*, mesure, remplacement, réglage et réparation, et dans certains cas des actions administratives.

#### II.4.4. Types de maintenabilité :

On distingue plusieurs types de maintenabilité :

- **La maintenabilité intrinsèque :** elle est « construite » dès la phase de conception à partir d'un cahier des charges prenant en compte les critères de maintenabilité (modularité, accessibilité, etc.).
- **La maintenabilité prévisionnelle :** elle est également « construite », mais à partir de l'objectif de disponibilité.

- **La maintenabilité opérationnelle** : elle sera mesurée à partir des historiques d'interventions.

**Remarque :**

1. La maintenabilité caractérise la facilité à remettre ou de maintenir un bien en bon état de fonctionnement. Cette notion ne peut s'appliquer qu'à du matériel maintenable, donc réparable.
2. L'analyse de maintenabilité permettra d'estimer le MTTR (Mean Time To Repair) ainsi que les lois probabilistes de maintenabilité (sur les mêmes modèles que la fiabilité).

**II.4.5. Taux de réparation :**

Le taux de réparation indique l'aptitude d'un bien à être dépanné et / ou réparé .

Il est noté  $\mu(t)$  et vaut : 
$$\mu(t) = \frac{g(t)}{1-M(t)} \quad (\text{II. 6})$$

Par hypothèse, il est souvent considéré comme constant.

Dans ce cas, la répartition des temps de réparation est exponentielle, la maintenabilité devient alors :  $M(t) = 1 - \exp(-\mu t)$

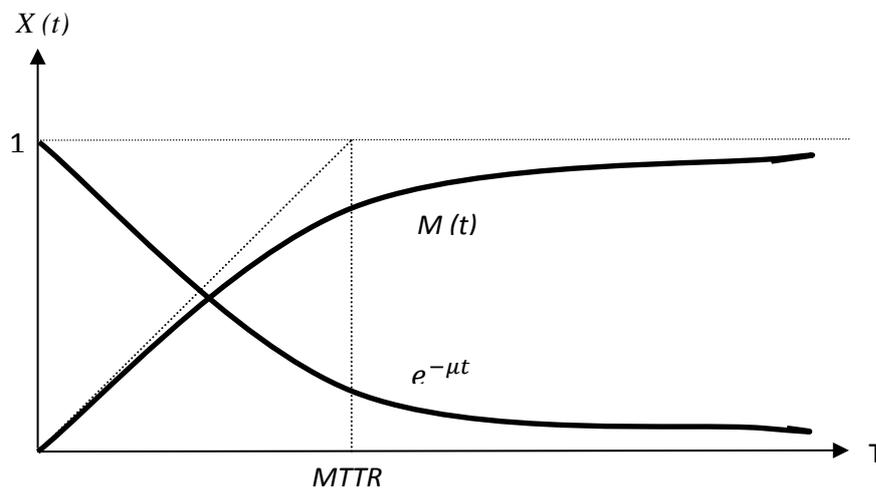


Figure II.7. Courbes de taux de réparation

**II.4.6. Analogie des analyses de fiabilité et de maintenabilité :**

Fiabilité	Maintenabilité
Probabilité de durée de bon fonctionnement	Probabilité de durée de réparation
$R(t) = P(T_p > t)$	$M(t) = P(T_R < t)$
Variable aléatoire : temps de fonctionnement	Variable aléatoire : temps de réparation
Densité de probabilité du temps avant défaillance : $f(t)$	Densité de probabilité du temps de réparation : $g(t)$
$R(t) = \int_t^{+\infty} f(t) dt = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$	$M(t) = \int_0^t g(t) dt = 1 - e^{-\int_0^t \mu(t) dt}$
Taux de défaillance $\lambda(t)$ : $\lambda(t) dt = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$	Taux de réparation $\mu(t)$ : $\mu(t) dt = \frac{g(t)}{1 - M(t)}$
MTBF = mean time between failures : $MTBF = \int_t^{+\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{+\infty} R(t) dt$	MTTR = mean time to repair : $MTTR = \int_0^{+\infty} t \cdot g(t) dt$
Relation fondamentale : $f(t) = \lambda(t) \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$	Relation fondamentale : $g(t) = \mu(t) \cdot e^{-\int_0^t \mu(t) dt}$
Loi usuelle : si $\lambda =$ constante, loi exponentielle : $R(t) = e^{-\lambda t}$ si $\lambda(t)$ est variable, loi de weibull	Loi usuelle : si $\mu =$ constante, loi exponentielle : $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$ si $\mu(t)$ est variable, loi log-normale
Application : systèmes réparables ou non	Application : systèmes réparables

Tableau II.1. Analogie des analyses de fiabilité et de maintenabilité

## II.5. La disponibilité :

### II.5.1. Définition (NF X 60-500) :

Aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée. Les moyens autres que la logistique de maintenance (personnel, documentation, rechanges, etc...) n'affectent pas la disponibilité d'un bien.

La disponibilité se traduit par « Availability » et se note souvent  $A(t)$ .

### II.5.2. Définition probabiliste :

La disponibilité  $A(t)$  représente la probabilité pour que le système  $S$  soit non défaillant à l'instant  $t$ . On remarquera que dans le cas de systèmes non réparables, la définition de la disponibilité est équivalente à celle de la fiabilité :

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

L'aptitude contraire est appelée indisponibilité, et est définie par :

$$\bar{A}(t) = 1 - A(t) \quad (\text{II. 7})$$

La disponibilité dépend de la fiabilité et de la maintenance, suivant la relation :

$$A(t) = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \quad (\text{II. 8})$$

Augmenter la disponibilité d'un matériel consiste à réduire le nombre de ses arrêts (Fiabilité) et à réduire le temps mis pour les résoudre (Maintenabilité).

### II.5.3. Types de la disponibilité :

Comme la fiabilité, plusieurs types de disponibilités peuvent être utilisés :

- **la disponibilité instantanée prévisionnelle** : est une grandeur instantanée. Le système peut donc avoir subi une panne puis une réparation avant l'instant  $t$ .
- **la disponibilité moyenne** : moyenne sur un intervalle de temps donné  $[t_1, t_2]$  de la disponibilité instantanée prévisionnelle, ou mesurée en phase opérationnelle par la durée de fonctionnement effectif divisée par la durée donnée.

#### II.5.4. Etude de disponibilité :

Un matériel disponible est un matériel dont on peut se servir à partir de cette évidence, il apparaît de façon claire que la disponibilité dépend à la fois :

- Du nombre de défaillances ou taux de pannes : fiabilité
- De la rapidité avec laquelle ces défaillances seront réparées : maintenabilité
- Des règles définies pour l'entretien et la réparation : politique de maintenance
- De la qualité des moyens mis en œuvre pour cette maintenance (personnel, outillage, stock) : logistique de maintenance.

#### II.5.5. Précisions sur MTBF ; MUT ; MDT ; MTTR :

Il est nécessaire, au préalable de donnée, quelques indications sur les temps employés en particulier, pour les MTBF, MUT, MDT, MTTR qui souvent sont confondus.

- **MTBF** (Mean Time Between Failures) :

Représente le temps moyen entre deux défaillances d'un système réparable, il est calculé en inversant le taux de défaillance  $\lambda$  :

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{II. 9})$$

Il est aussi appelé « indicateur de fiabilité », puisque il donne l'image de la qualité du comportement des systèmes. [2]

- **MTTF** (Mean Time To Failure):

C'est le temps moyen de fonctionnement jusqu'à l'occurrence de la première défaillance

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (\text{II. 10})$$

- **MUT** (Mean Up Time):

Il mesure la moyenne des temps de bon fonctionnement après réparation. On note que :

$$MTBF = MTTR + MUT$$

- **MTTR** (Mean Time To Repair):

Il mesure le temps moyen de réparation. Il est donné par :

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (\text{II.11})$$

- **MDT** (Mean Down Time) :

C'est la durée moyenne entre une défaillance et la remise en état suivante.

Elle se décompose en plusieurs phases :

- la durée de détection de la panne
- la durée de diagnostic de la panne
- la durée d'intervention jusqu'au début de la réparation
- la durée de la réparation, **MTTR** (Mean Time To Repair) représente le temps moyen pour remettre un composant ou un système défectueux en fonctionnement
- la durée de remise en service du système

### II.5.5.1. Chronogramme Pour les matérielles réparable :

On a le chronogramme suivant :

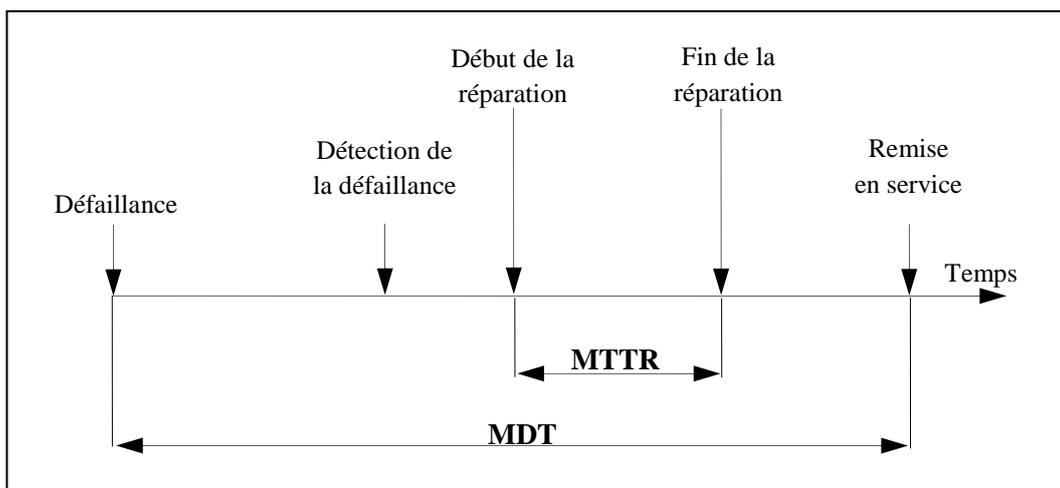
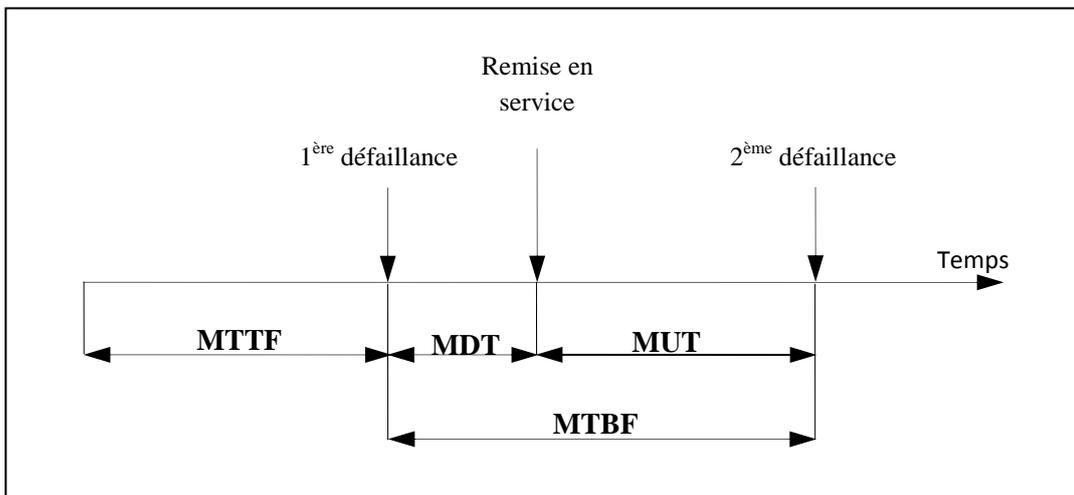


Figure II.8. Chronogramme Pour les matérielles réparable

Si  $MTTR \ll MTBF$  alors  $MUT = MTBF$ .

### II.5.5.2. Chronogramme Pour les matériels non réparables :

On a le chronogramme suivant :

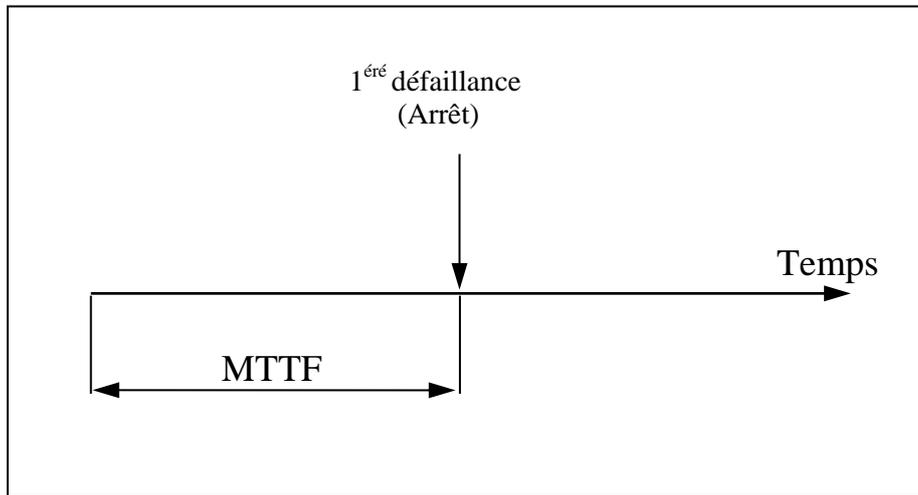


Figure II.9. Chronogramme pour les matériels non réparables

### II.5.6. Diagramme de fiabilité ou diagramme de succès (Reliability block diagram) :

C'est la méthode la plus anciennement connue pour le calcul de la fiabilité des systèmes non réparables. Bien qu'elle puisse aussi s'appliquer aux systèmes réparables, son usage y reste limité. [3]

#### II.5.6.1. Définition :

Le diagramme de fiabilité est la représentation de la logique de fonctionnement d'un système car elle est souvent proche des schémas fonctionnels du système. Dans cette représentation, les blocs représentant des éléments ou des fonctions dont la défaillance entraîne la défaillance du système sont placés en série, ceux dont la défaillance ne provoque pas la défaillance du système qu'en combinaison avec d'autres blocs sont disposés en parallèle sur ces derniers.

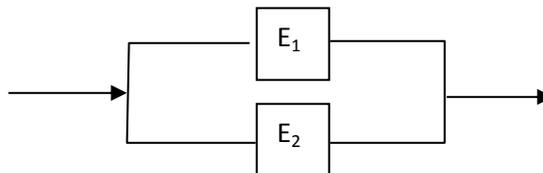


Figure II.10. Diagramme en parallèle

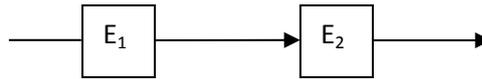


Figure II.11. Diagramme en série

Le diagramme de fiabilité est donc un graphe admettant une entrée et une sortie dont les sommets (appelés blocs) représentent les éléments du système et donc les arcs traduisent les relations entre les différents éléments. Le système fonctionne s'il existe un chemin de succès (successful path) permettant d'aller de l'extrémité gauche à l'extrémité droite du diagramme.

## II.5.7. Etude de la disponibilité de quelques systèmes simples réparables :

### II.5.7.1. Cas des systèmes à configuration série :

Un système composé d'au moins 2 sous-systèmes, d'un point de vue fiabilité la défaillance d'un d'entre eux, entraîne la défaillance du système.

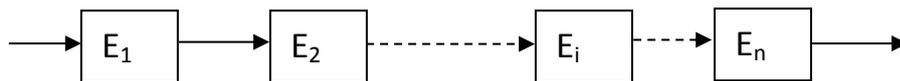


Figure II.12. Schéma bloc d'un système série

Si les éléments sont identiques :

$$A_S = P(S) = P(S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_i \cap \dots \cap S_n)$$

$$A_S = P(S) = P(S_1)P(S_2) \dots P(S_i) \dots P(S_n)$$

Alors La disponibilité du système «  $A_S$  » est le produit des disponibilités  $A_i$  des différents éléments :

$$A_S = \prod_{i=1}^n A_i \quad (\text{II. 12})$$

Dans le cas où  $\lambda_i$  et  $\mu_i$  sont constants, on obtient :

$$A_S = \prod_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} \quad (\text{II. 13})$$

Où :

$\lambda_i$ : Taux de défaillance.

$\mu_i$  : Taux de répartition.

### II.5.7.2. Cas des systèmes a configuration en parallèle :

Dans ce cas le système fonctionne dès que l'un au moins des sous-systèmes fonctionne, Autrement dit un système est en parallèle d'un point de vue fiabilité si lorsqu'un de ces éléments ou plusieurs tombent en panne, le système ne tombe pas en panne.

Une défaillance est un problème grave dont la solution nécessite souvent à faire appel à des techniques de redondance. La redondance peut être utilisée pour améliorer la fiabilité d'un système sans aucun changement dans la fiabilité des composants individuels qui forment le système.

On distingue trois grandes catégories de redondances dont l'utilisation rende plus fiable le système :

- Les redondances actives
- Les redondances passives ou (stand-by)
- Les redondances majoritaires (équipements électroniques)

Selon les circonstances elle est utile :

- pour augmenter la capacité totale ou les performances d'un système,
- pour réduire le risque de panne,
- pour combiner ces deux effets.

#### II.5.7.2.1.Redondance active :

On parle de redondance active, quand tous les éléments fonctionnent en permanence, c'est-à-dire une redondance active est réalisée par la mise en parallèle des éléments assurant les mêmes fonctions et travaillant en même temps.

On distingue la redondance active totale et partielle :

- **La redondance active totale :** le système ne devient défaillant qu'avec la défaillance du dernier élément survivant

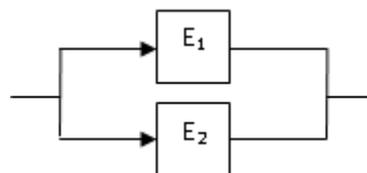


Figure 13.Schéma bloc d'un système parallèle à deux éléments

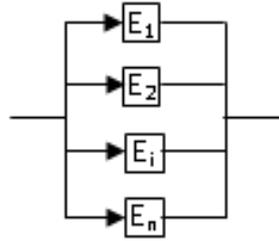


Figure 14.Schéma bloc d'un système Parallèle à « n » éléments

$$A_S = P(S) = P(E_1 \cup E_2) = P(E_1) + P(E_2) + P(E_1).P(E_2)$$

$$A_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_i) \quad (\text{II. 14})$$

$$A_S = 1 - \prod_{i=1}^n \bar{A}_i \quad (\text{II. 15})$$

$$A_S = 1 - \prod_{i=1}^n \left( \frac{\lambda_i}{\mu_i + \lambda_i} \right) \quad (\text{II. 16})$$

- **La redondance active partielle :** Le système peut accepter (r/n) défaillances si il comporte n éléments et r (r < n) strictement nécessaires pour qu'il fonctionne. Il existe deux cas dégénérés :
  - r = 1 : configuration parallèle.
  - r = n : configuration série.

Si l'on suppose que les n éléments sont identiques on obtient :

$$A(t) = P(\text{Au moins } r \text{ éléments parmi } n)$$

Le diagramme de fiabilité d'un tel système est le suivant :

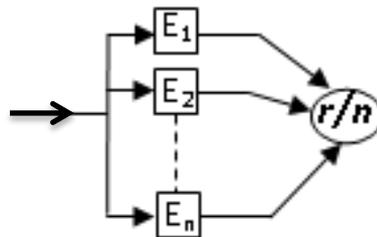


Figure 15.Diagramme de fiabilité d'un système r/n

**II.5.7.2.2. Redondance passive :**

La redondance est dite passive ou (stand-by) quand les éléments surabondants ne sont mis en service qu'au moment du besoin, ils seront en attente ou en stock. Ceci a l'avantage de diminuer ou de supprimer le vieillissement des éléments ne travaillant pas. Mais en contrepartie, on a l'inconvénient d'avoir un organe de détection de panne et de commutation (DC) qui détecte la mise en service de l'élément en attente quand le composant principal tombe en panne.

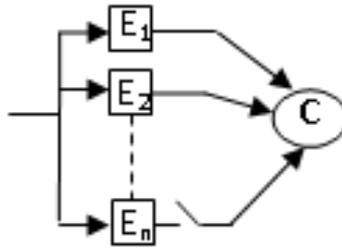


Figure II.16. Diagramme de fiabilité d'un système à redondance passive

Les différentes situations de panne, ou plus exactement leurs probabilités sont calculées à l'aide des modèles suivants (Modèle de YACIN) :

La probabilité	Le modèle
Probabilité que les m éléments principaux et les l éléments de réserve soient tous disponibles	$\pi_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^l m^k \frac{\gamma^k}{k!} + m^l \sum_{k=l+1}^{m+1} \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s)}$
Probabilité que parmi les m+1 éléments il y ait k éléments défaillants	$\pi_k = \begin{cases} m^k \frac{\gamma^k}{k!} \pi_0 & , \quad k \leq l \\ m^l \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s) \pi_0 & , \quad k > l \end{cases}$
Probabilité d'avoir m éléments disponibles	$P_0 = \sum_{k=0}^l m^k \frac{\gamma^k}{k!} \pi_0$
Probabilité d'avoir m - j éléments disponibles	$P_j = m^l \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s) \pi_0$

Tableau II.2. Les modèles de probabilité de panne

Avec :  $\gamma = \frac{\lambda}{\mu}$

**Conclusion :**

En général, si la maintenabilité permet de réduire la durée des pannes et leur coût, la fiabilité permet de réduire la fréquence de ces pannes. Toutes deux, grâce au choix d'une politique de maintenance appropriée, ont pour but d'augmenter la disponibilité des systèmes ou des équipements et de diminuer les coûts d'entretien.

# *Chapitre III*

Modélisation de la disponibilité et de la fiabilité du GK1

« A la source de toute connaissance, il y a  
une idée, une pensée, puis l'expérience  
vient confirmer l'idée »

**-Claude Bernard-**

## Introduction :

La modélisation des systèmes complexes, d'un point de vue fiabilité ou autre est toujours délicate, l'approche systémique consiste à fractionner le système global en sous-systèmes. Chaque sous-système étant lui-même susceptible d'être décomposé à son tour en sous-systèmes de niveau inférieur, d'une façon générale un sous-système sera défini comme un ensemble d'éléments en interaction. L'élément est considéré comme la base du sous-système en ce sens qu'il ne peut pas être décomposé à son tour en sous-éléments.

Pour la modélisation de la fiabilité d'un gazoduc, de type du gazoduc Hassi R'mel- Skikda (GK1) nous avons adopté une décomposition hiérarchique à deux niveaux (figure.1) les modèles de base nous permettent de définir la disponibilité et la fiabilité des sous-systèmes puis remonter à l'ensemble du système suivant une démarche de type **bottom up** (du bas vers le haut).

À la base, on retrouve les éléments du système. Un élément peut être soit en état de marche, soit en panne, un élément en bon état de marche peut être soit en fonctionnement, soit en réserve. L'état d'un sous-système peut alors être caractérisé par la combinaison des états de ses éléments constitutants. De la même manière, l'état d'un sous-système de niveau supérieur peut être défini par la combinaison des états des sous-systèmes de niveau immédiatement inférieur qui le composent.

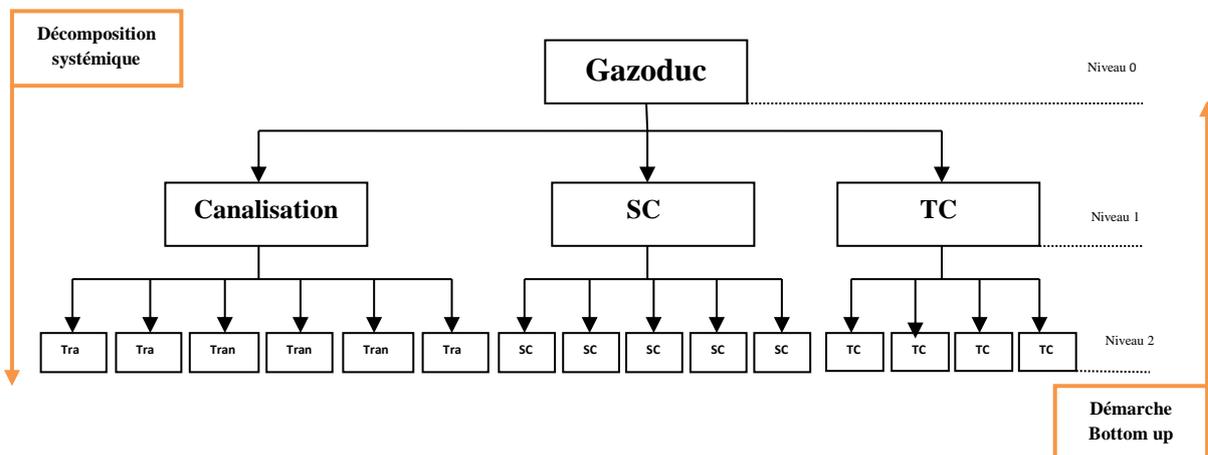


Figure III.1. Décomposition systémique de gazoduc GK1

### III.1. Représentation des sous-systèmes par diagrammes de fiabilité :

La méthode du « Diagramme de succès » ou de « Fiabilité » est la représentation la plus naturelle de la logique de fonctionnement d'un système ou d'un sous-système ( Figure 2 ) , dans cette représentation en considérant que les fonctions globales de ce systèmes résultent

d'une mise en série et / ou en parallèle de fonctions élémentaires sachant que les blocs représentant des éléments (matériels ou événements) dont la défaillance entraîne la panne du système sont placés en série, ceux dont la défaillance ne provoque la panne du système qu'en combinaison avec d'autres blocs sont disposés en parallèle .



Figure 2. Digramme de fiabilité du sous-système canalisation

### III.2. Modèles de base de fiabilité et de disponibilité des systèmes :

Les modèles de base sont la représentation mathématique des configurations les plus courantes des éléments (tableau III.1 et III.2). La connaissance du diagramme de fiabilité du système étudié, sa décomposition en sous-systèmes associés aux modèles de base des dispositions les plus courantes permet dans la majorité des cas de reconstituer le modèle de fiabilité du système global. Un système est considéré comme étant en série d'un point de vue fiabilité s'il tombe en panne lorsqu'un seul ou plusieurs de ses éléments sont défaillants, le système le plus simple correspondant à ce cas de figure est composé d'un seul élément.

Dans le cas d'un système en série à plusieurs éléments, la disponibilité est le produit des disponibilités des éléments constituant le système. Un système est considéré en parallèle d'un point de vue fiabilité si, lorsqu'un ou plusieurs de ses éléments sont défaillants, le système ne tombe pas en panne.

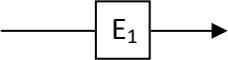
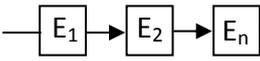
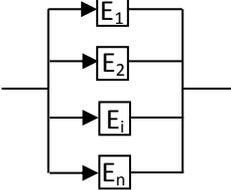
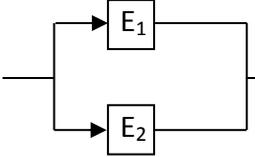
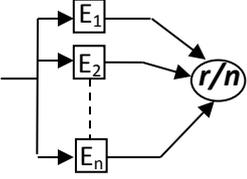
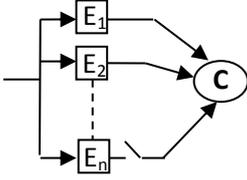
	Élément simple	$R(t) = \exp - (\lambda t)$
	Système en série à $n$ éléments	$R = \exp \left[ - \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i \right) t \right]$
	Système en parallèle à $n$ éléments	$R = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - e^{-\lambda_i t}]$
	Redondance active	$R = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$
	Redondance $r/n$	$R = \sum_{i=r}^n C_n^i e^{-i\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^{n-i}$
	Redondance passive (Stand-by) avec organe de commutation commun	GRAPHE DE MARKOV

Tableau III.1 : Récapitulatif des modèles de base de la fiabilité

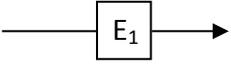
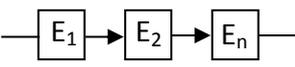
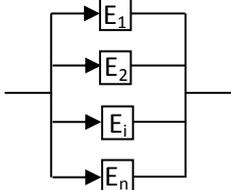
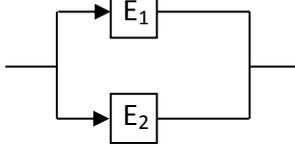
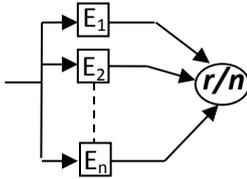
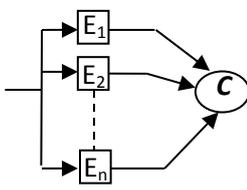
	<p>Élément simple</p>	$A = \frac{\mu}{\mu + \lambda}$
	<p>Système en série à n éléments</p>	$A = \prod_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i}$
	<p>Système en parallèle à n éléments</p>	$A = 1 - \prod_{i=1}^n \left( \frac{\lambda_i}{\mu_i + \lambda_i} \right)$
	<p>Redondance active</p>	$A = \frac{\mu^2 + 2\lambda\mu}{\mu^2 + 2\lambda\mu + \lambda^2}$
	<p>Redondance r/n</p>	$A = \sum_{k=r}^n \frac{c_n^k \mu^k \cdot \lambda^{n-k}}{(\lambda + \mu)^n}$
	<p>Redondance passive (Stand-by) avec organe de commutation commun</p>	<p>MODELEDEYACIN</p>

Tableau III.2. Récapitulatif des modèles de base de la disponibilité

### III.3. Modélisation de fiabilité et de disponibilité du gazoduc :

Le gazoduc (GK1) est composé de trois sous-systèmes :

- les tronçons de canalisation : La défaillance du sous-système canalisation entraîne l'arrêt complet de la ligne (en cas de fuite par exemple)
- les stations de compression
- les sous-systèmes turbocompresseurs.

Toute panne sur ces derniers sous-systèmes ne provoque qu'une diminution du débit du gaz c'est-à-dire un écoulement libre avec un débit plus faible que le débit nominal. La chute de performance est directement liée à la nature de la défaillance et à son emplacement.

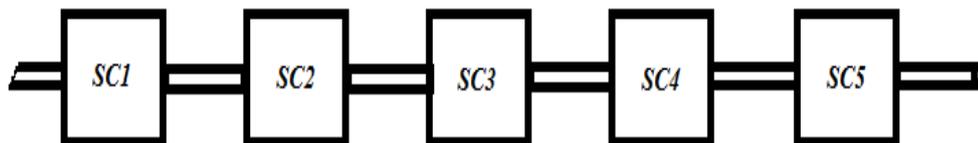


Figure III.3.Schéma d'un gazoduc

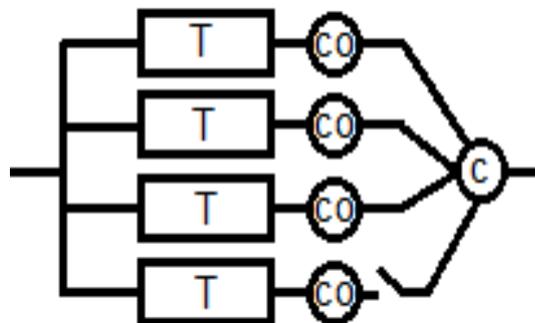


Figure III.4.Schéma simplifié d'une SC

**T** : Turbine

**CO** : Compresseur

**C** : organe de commutation commun

### III.3.1. Reconstitution du système global (gazoduc) :

Afin de calculer la fiabilité du gazoduc, une reconstitution du système global est nécessaire, cette opération peut se faire par la technique dite **bottom up** c'est-à-dire nous commençons à partir de niveau inférieur vers un niveau supérieur .

Les indices de fiabilité des éléments constitutifs d'un gazoduc sont :

- le taux de défaillance des TC " $\lambda_{TC}$ ", des SA " $\lambda_{SA}$ " et de la conduite " $\lambda_C$ "
- le taux de réparation de chaque élément " $\mu_{TC}$ ", " $\mu_{SA}$ " et " $\mu_C$ ".

#### Sous-système 1 :

**Les tronçons de canalisation :** la défaillance d'un tronçon de la canalisation provoque la défaillance totale du gazoduc, donc les blocs qui représentent les 6 tronçons de la canalisation sont placés en série.



Figure III.5. diagramme de fiabilité du sous-système 1

#### La fiabilité :

Pour un système en série à n éléments, la fiabilité est exprimée par :

$$R = \exp \left[ - \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i \right) t \right]$$

Sachant que on un système en série à 6 éléments :

$$R = \exp \left[ - \left( \sum_{i=1}^6 \lambda_i \right) t \right]$$

$$R = \exp (- \lambda_1 t). \exp (- \lambda_2 t). \exp (- \lambda_3 t). \exp (- \lambda_4 t). \exp (- \lambda_5 t). \exp (- \lambda_6 t)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 = \lambda_C$$

D'où :

$$R_{SS1}(t) = e^{-\lambda_C t} \quad (\text{III.1})$$

**La disponibilité :**

Pour un système en série à n éléments, la disponibilité est donnée par :

$$A = \prod_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i}$$

$$A_{Ss1} = \prod_{i=1}^6 \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i}$$

D'autre part on a :

$$A_{Ss1} = A_c = \frac{\mu_c}{\mu_c + \lambda_c} \quad (III. 2)$$

On obtient :

$$\mu_c = \lambda_c \frac{\prod_1^N \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i}}{1 - \prod_1^N \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i}}$$

**Sous-système 2 :**

**Les systèmes auxiliaires :** la défaillance d'un système auxiliaire dans une station de compression (par exemple un problème électrique avec une disjonction de la station ou un problème au niveau du système d'air instruments ou bien au niveau : des vannes, des soupapes ...) ne provoque pas la défaillance totale du gazoduc, mais celle de la station concerné donc les blocs qui représentent le système auxiliaire est en série avec le système turbocompresseur de la station de compression .

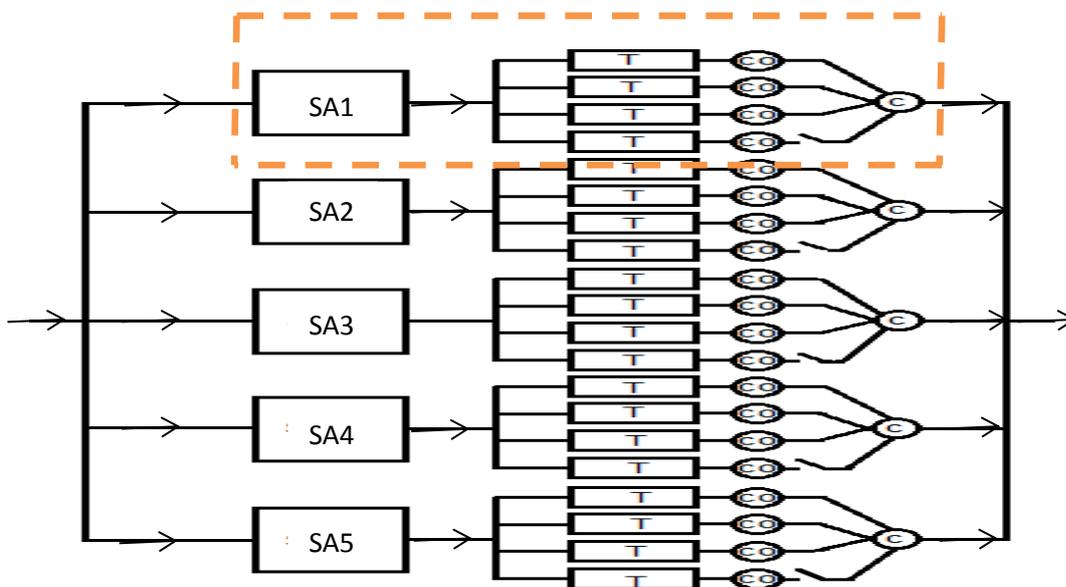


Figure III .6.Diagramme de fiabilité du sous-système2

### II.4.7. Pour chaque système auxiliaire (élément simple) :

#### La fiabilité :

Pour un élément simple :

$$R_{Ss2}(t) = e^{-\lambda_{SA}t} \quad (\text{III. 3})$$

#### La disponibilité :

$$A_{Ss2} = \frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} \quad (\text{III. 4})$$

#### Sous-système 3 :

**Les turbocompresseurs :** La défaillance d'un turbocompresseur qu'occupe une station de compression n'entraîne pas la défaillance de la station de compression, donc les blocs qui représentent les 4TC d'une SC sont placés en parallèle.

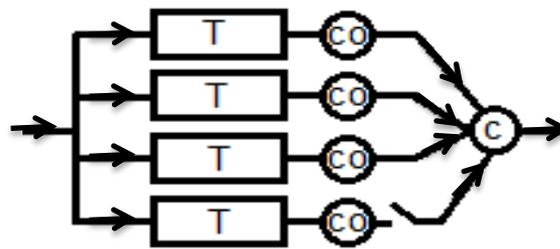


Figure III.7. Diagramme de fiabilité du sous-système 3

#### La fiabilité :

On peut déduire la valeur de  $\lambda_{TC}$  en utilisant le graphe de Markov pour une configuration (3+1) :

$$R_{Ss3}(t) = \exp(-\lambda_{TC} * t) \quad (\text{III. 5})$$

#### La disponibilité :

Sachant que la somme des probabilités des différents états possibles de fonctionnement de ce système turbocompresseurs est égale à 1, donc la disponibilité du sous-système 3 est obtenue comme suit :

$$A_{Ss3} = 1 - \bar{A}_{Ss3}$$

La valeur de l'indisponibilité des turbocompresseurs est la probabilité de défaillance totale des turbocompresseurs (P16 déduite par graphe de Markov en chapitre suivant) :

$$\bar{A}_{Ss3} = P_{16}$$

D'où :

$$A_{Ss3} = 1 - P_{16} \quad (\text{III.6})$$

#### Sous-système 4 :

**Les turbocompresseurs et les systèmes auxiliaires** : la défaillance du sous-système TC ou du sous-système SA entraîne la défaillance du sous-système 4 autrement dit de la station de compression. Donc les blocs qui représentent le système des TC et la SA sont placés en série.

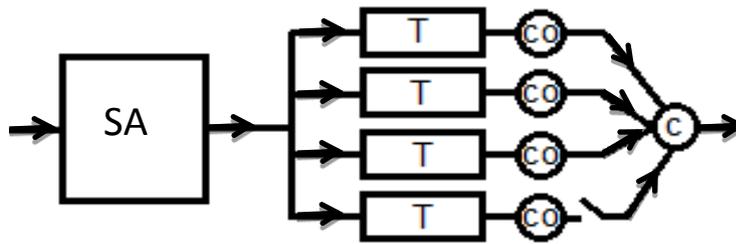


Figure III.8. Diagramme de fiabilité du sous-système 4

#### La fiabilité :

$$R_{Ss4} = R_{Ss2} * R_{Ss3}$$

$$R_{Ss4} = R_{SA} * R_{TC} = e^{-\lambda_{SA} * t} * e^{-\lambda_{TC} * t}$$

$$R_{Ss4} = e^{-(\lambda_{SA} + \lambda_{TC}) * t} \quad (\text{III.7})$$

#### La disponibilité :

$$A_{Ss4} = A_{Ss2} * A_{Ss3}$$

$$A_{Ss4} = A_{SA} * A_{TC}$$

$$A_{Ss4} = \frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} * (1 - P_{16}) \quad (\text{III.8})$$

**Sous-système 5 :**

Les cinq systèmes de compression composé chacune de système auxiliaire et turbocompresseurs : la défaillance de l'un des sous-systèmes 4 ne provoque pas la défaillance du gazoduc, donc les cinq sous-systèmes 4 sont placés en parallèle.

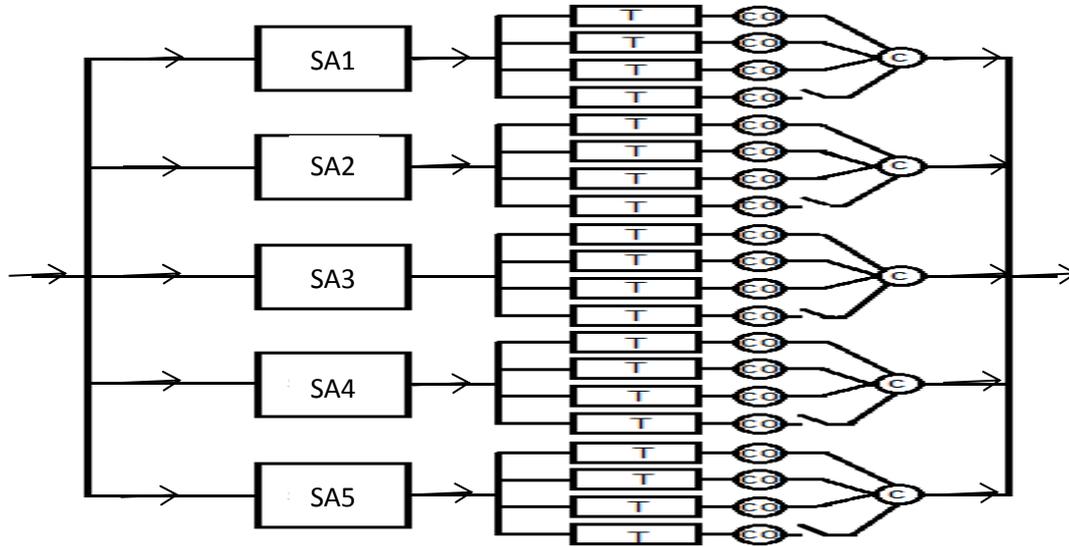


Figure III.9. Diagramme de fiabilité du sous-système 5

**La fiabilité :**

$$R_{Ss5}(t) = e^{-\lambda_{Ss5} \cdot t} \quad (\text{III. 9})$$

Sachant que le taux de défaillance pour un système de j éléments en parallèle peut être déterminé comme suite :

$$\lambda_{Ss5} = \frac{\lambda_{Ss4}}{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j}} = \frac{\lambda_{TC} + \lambda_{SA}}{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j}}$$

**La disponibilité :**

On a l'indisponibilité du sous-système 4 :

$$\bar{A}_{Ss4} = 1 - A_{Ss4}$$

Pour que le sous-système 5 soit indisponible il faut que tous les cinq stations de compression soient indisponibles :

$$\bar{A}_{Ss5} = \prod_{i=1}^5 (1 - A_{Ss4})$$

$$A_{Ss5} = 1 - \prod_{i=1}^5 (1 - A_{Ss4}) \quad (\text{III.10})$$

**Sous-système 6 :**

**Le sous-système 5 et le sous-système 1 :** il se fait que l'un des deux sous-systèmes soit en bon état de fonctionnement pour que le sous-système 6 fonctionne.

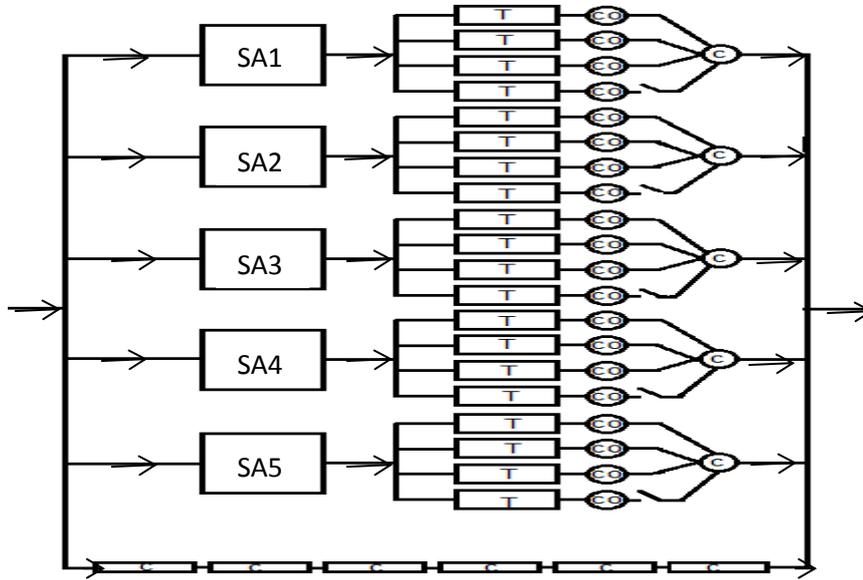


Figure III.10. Diagramme de fiabilité du sous-système 6

**La fiabilité :**

D'après la formule de Poincaré, qui est facilement applicable lorsqu'on a deux éléments :

$$P(A1 \cup A2) = P(A1) + P(A2) - P(A1 \cap A2). \quad (III.11)$$

La fiabilité sera alors:

$$\begin{aligned}
 R_{SS6} &= R_{SS1} + R_{SS5} - (R_{SS1} * R_{SS5}) \\
 R_{SS6}(t) &= e^{-\lambda_{SS1} * t} + e^{-\lambda_{SS5} * t} - (e^{-\lambda_{SS1} * t} * e^{-\lambda_{SS5} * t}) \\
 R_{SS6}(t) &= e^{-\lambda_{SS1} * t} + e^{-\lambda_{SS5} * t} - e^{-(\lambda_{SS1} + \lambda_{SS5}) * t} \quad (III. 12)
 \end{aligned}$$

**La disponibilité :**

L'indisponibilité du dédoublement est égale à l'indisponibilité sous-système 1 (la canalisation) car les éléments sont identiques :

$$\bar{A}_d = \bar{A}_{SS1} = 1 - A_{SS1}$$

Le dédoublement est en parallèle avec les cinq stations de compression et pour que ce sous-système soit indisponible il faut que ses deux éléments soient indisponibles :

$$\bar{A}_{Ss6} = \bar{A}_{Ss1} * \bar{A}_{Ss5}$$

$$\bar{A}_{Ss6} = (1 - A_{Ss1}) * (1 - A_{Ss5})$$

$$A_{Ss6} = 1 - \bar{A}_{Ss6}$$

$$A_{Ss6} = 1 - [(1 - A_{Ss1}) * (1 - A_{Ss5})]$$

$$A_{Ss6} = 1 - [(1 - \frac{\mu_c}{\mu_c + \lambda_c}) * (\prod_{i=1}^5 (1 - A_{ss4}))]$$

$$A_{Ss6} = 1 - [(1 - \frac{\mu_c}{\mu_c + \lambda_c}) * (\prod_{i=1}^5 (1 - (A_{SA} * A_{TC})))]$$

$$A_{Ss6} = 1 - [(1 - \frac{\mu_c}{\mu_c + \lambda_c}) * (\prod_{i=1}^5 (1 - (\frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} * (1 - P16)))))] \quad (III.13)$$

**Le système global :**

**Le sous-système 6 et le sous-système 1 :** il se fait que l'un des deux sous-systèmes soit défaillant pour que le système global (gazoduc) soit défaillant.

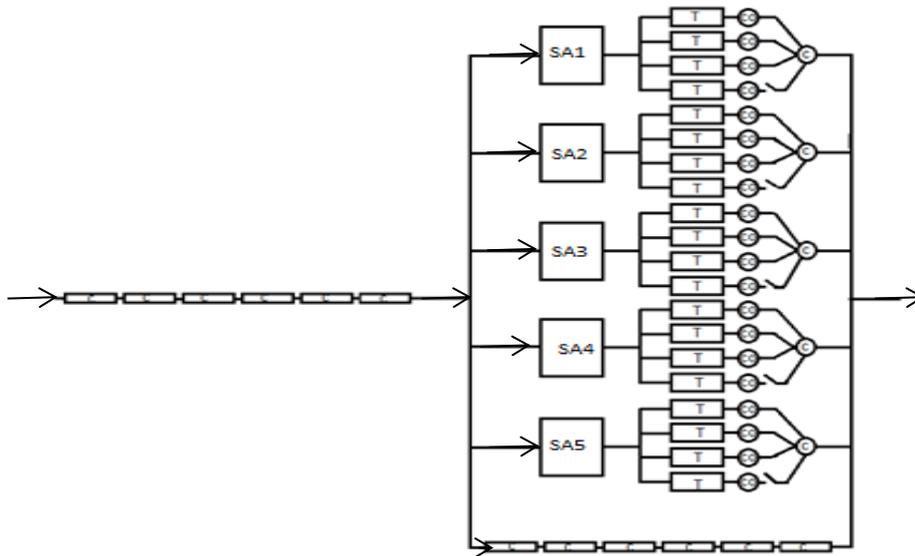


Figure III.11. Diagramme de fiabilité du système 7

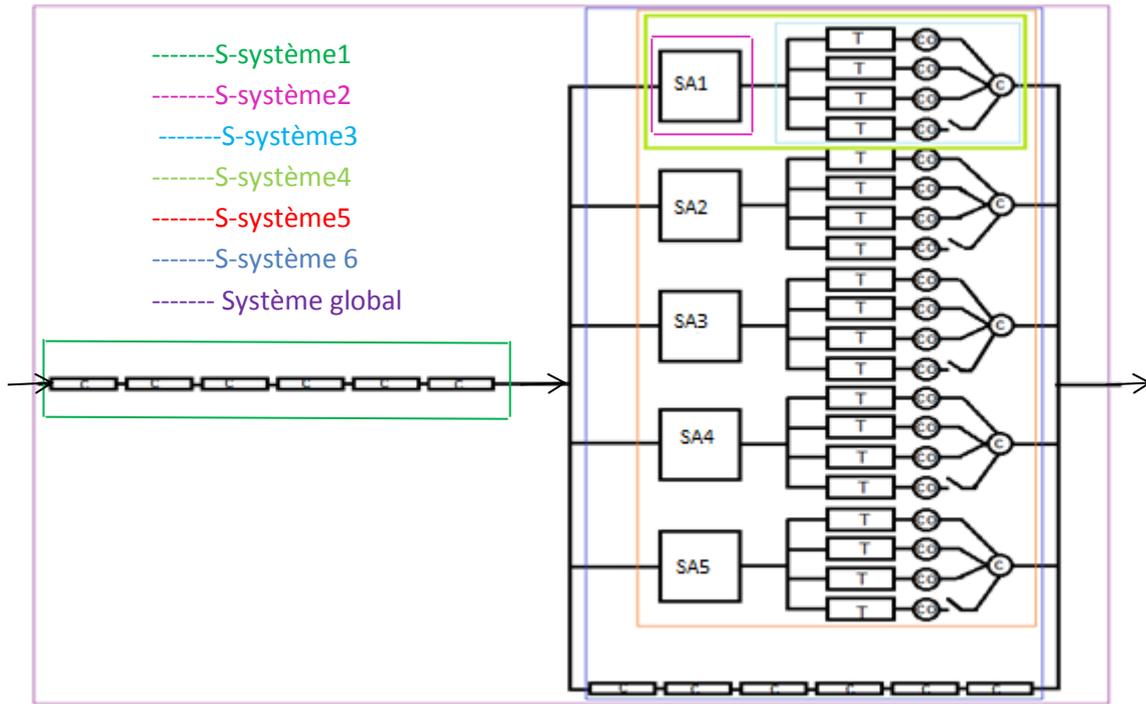


Figure III.12. Diagramme de fiabilité du système global

**La fiabilité du système global :**

La canalisation principale est en série avec le sous-système 6 :

$$R_{S7} = R_{Ss6} * R_{Ss1}$$

$$R_{S7}(t) = e^{-\lambda_{Ss1} * t} * [e^{-\lambda_{Ss1} * t} + e^{-\lambda_{Ss5} * t} - e^{-(\lambda_{Ss1} + \lambda_{Ss5}) * t}]$$

En général le modèle finale de fiabilité du gazoduc s'écrit sous la forme suivante :

$$R_{S7}(t) = e^{-\lambda_c * t} * \left[ e^{-\lambda_c * t} + e^{-\frac{\lambda_{TC} + \lambda_{SA}}{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j}} * t} - e^{-\left(\frac{\lambda_{TC} + \lambda_{SA}}{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j}} + \lambda_c\right) * t} \right] \tag{III.14}$$

Avec :

$\lambda_c$  : taux de défaillance de la canalisation.

$\lambda_{SA}$  : taux de défaillance du système auxiliaire

$\lambda_{TC}$  : taux de défaillance du turbocompresseurs

**La disponibilité du système global :**

La disponibilité de deux sous-systèmes en série (la canalisation principale et le sous-système 6) est le produit de leurs disponibilités :

$$A_{S7} = A_{Ss1} * A_{Ss6}$$

La disponibilité du gazoduc sera alors :

$$A_{S7} = \frac{\mu_c}{\mu_c + \lambda_c} * [1 - [(1 - \frac{\mu_c}{\mu_c + \lambda_c}) * (\prod_{i=1}^5 (1 - (\frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} * (1 - P16))))]]] \quad (III.15)$$

Avec :

$\lambda_c$  : taux de défaillance de la canalisation.

$\mu_c$  : taux de réparation de la canalisation.

$\lambda_{SA}$  : taux de défaillance de système auxiliaire.

$\mu_{SA}$  : taux de réparation de système auxiliaire.

**La maintenabilité du système global :**

On a la maintenabilité du gazoduc :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu_g * t}$$

On peut déduire le taux de réparation  $\mu_g$  d'après la formule de disponibilité du gazoduc :

$$A_{S7} = A_g = \frac{\mu_g}{\mu_g + \lambda_g} \longrightarrow \mu_g = \frac{A_g * \lambda_g}{1 - A_g}$$

La valeur de la disponibilité du gazoduc est connue grâce à l'expression globale définie plus haut, à partir de laquelle on peut déduire le taux de réparation du gazoduc  $\lambda_g$  :

$$R_{S7} = R_g = R_C * R_{Ss6}$$

$$e^{-\lambda_g * t} = e^{-\lambda_C * t} * e^{-\lambda_{Ss6} * t}$$

$$e^{-\lambda_g * t} = e^{-(\lambda_C + \lambda_{Ss6}) * t} \longrightarrow \lambda_g = \lambda_C + \lambda_{Ss6}$$

Sachant que :

$$\lambda_{Ss6} = \frac{1}{MTTF_{Ss6}}$$

D'autre part :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (III. 16)$$

$$MTTF = \int_0^{\infty} R_{SS6}(t) dt$$

$$MTTF = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_{SS1} * t} + e^{-\lambda_{SS5} * t} - e^{-(\lambda_{SS1} + \lambda_{SS5}) * t} dt$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_{SS5}} + \frac{1}{\lambda_{SS1}} - \frac{1}{\lambda_{SS5} + \lambda_{SS1}}$$

$$\lambda_{SS6} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{SS5}} + \frac{1}{\lambda_{SS1}} - \frac{1}{\lambda_{SS5} + \lambda_{SS1}}}$$

Sachant que :  $\lambda_{SS1} = \lambda_C$  et  $\lambda_{SS5} = \frac{\lambda_{SS4}}{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j}} = \frac{\lambda_{TC} + \lambda_{SA}}{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j}}$  alors :

Le taux de défaillance global du gazoduc s'exprime comme suit :

$$\lambda_g = \lambda_C + \frac{1}{\frac{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j}}{\lambda_{TC} + \lambda_{SA}} + \frac{1}{\lambda_C} - \frac{1}{\lambda_C + \frac{\lambda_{TC} + \lambda_{SA}}{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j}}}}$$

Et le taux de réparation global a pour expression la relation suivante :

$$\mu_g = \frac{\left[ \frac{\mu_C}{\mu_C + \lambda_C} * \left[ 1 - \left[ \left( 1 - \frac{\mu_C}{\mu_C + \lambda_C} \right) * \left( \prod_{i=1}^5 \left( 1 - \left( \frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} * (1 - P16) \right) \right) \right) \right] * \left[ \lambda_C + \frac{1}{\frac{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j}}{\lambda_{TC} + \lambda_{SA}} + \frac{1}{\lambda_C} - \frac{1}{\lambda_C + \frac{\lambda_{TC} + \lambda_{SA}}{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j}}}} \right] \right]}{1 - \left[ \frac{\mu_C}{\mu_C + \lambda_C} * \left[ 1 - \left[ \left( 1 - \frac{\mu_C}{\mu_C + \lambda_C} \right) * \left( \prod_{i=1}^5 \left( 1 - \left( \frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} * (1 - P16) \right) \right) \right) \right] \right]}}$$

et la maintenabilité s'exprimera comme suit :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu_g * t}$$

$$M(t) = 1 - \exp - \left[ \frac{\left[ \frac{\mu_C}{\mu_C + \lambda_C} * \left[ 1 - \left[ \left( 1 - \frac{\mu_C}{\mu_C + \lambda_C} \right) * \left( \prod_{i=1}^5 \left( 1 - \left( \frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} * (1 - P16) \right) \right) \right) \right] * \left[ \lambda_C + \frac{1}{\frac{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j}}{\lambda_{TC} + \lambda_{SA}} + \frac{1}{\lambda_C} - \frac{1}{\lambda_C + \frac{\lambda_{TC} + \lambda_{SA}}{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j}}}} \right] \right]}{1 - \left[ \frac{\mu_C}{\mu_C + \lambda_C} * \left[ 1 - \left[ \left( 1 - \frac{\mu_C}{\mu_C + \lambda_C} \right) * \left( \prod_{i=1}^5 \left( 1 - \left( \frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} * (1 - P16) \right) \right) \right) \right] \right]} \right] * t \quad (III.17)$$

**Conclusion :**

La modélisation de la fiabilité et de la disponibilité du gazoduc n'a été possible que par l'association des modèles de base de la fiabilité des systèmes et des diagrammes de fiabilité à une décomposition systémique permettant une modélisation plus appréhendable par une démarche bottom-up. Sur la base des modèles développés on peut en déduire en dernière étape la maintenabilité du gazoduc..

# *Chapitre IV*

---

Modélisation de fiabilité et disponibilité du système SC  
par les graphes de Markov

« Il ne s'agit pas d'atteindre un résultat vrai  
ou faux, probable ou improbable, mais  
seulement profitable ou non profitable »

**-Williams & Lance-**

## Introduction :

Les chaînes de Markov permettent de modéliser le comportement dynamique d'un système par un graphe d'états, qui représente tous les états du système et les transitions possibles entre ces états. Les transitions sont pondérées par des probabilités suivant des lois exponentielles. Le calcul de la fiabilité d'un système peut être effectué grâce à des méthodes de résolution numérique ou par simulation.

### IV.1. Graphe des états "graphe de Markov" :

On considère un système pouvant prendre  $N$  états que nous noterons  $E_1, E_2 \dots E_n$ , la modélisation du système consiste alors à décrire les transitions entre ces  $N$  états. Ces transitions sont en général d'origine aléatoire et sont la probabilité de passage de l'état  $E_i$  à l'état  $E_j$  entre les instants  $t$  et  $t + \Delta t$  sachant que l'on était à l'état  $E_i$  à l'instant  $t$ .

Diagrammes de Markov :

- Permet de tenir compte des dépendances entre les différents éléments d'un système
- Le graphe est constitué de sommets correspondant aux différents états du système
- Les sommets sont reliés par des arcs values à l'aide de taux de transition non nuls associés aux événements qui font évoluer le système

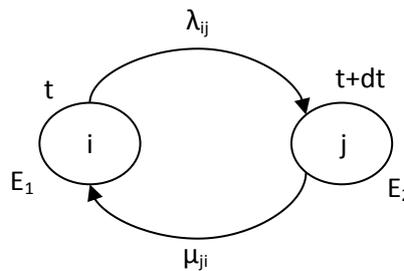


Figure IV.1. Graphe des états

Sur ce graphe, chaque arc  $(i, j)$  est évalué par le taux de transition de l'état  $i$  à l'état  $j$ . Si la probabilité de passer de l'état  $i$  à l'état  $j$  entre les instants  $t$  et  $(t+dt)$  est  $\lambda_{ij}$  et de l'état  $j$  à l'état  $i$  entre les instants  $(t+dt)$  et  $t$  est  $\mu_{ji}$  alors  $\lambda_{ij}$  et  $\mu_{ji}$  sont les taux de transition entre les états  $i$  et  $j$ .

**Remarque :**

- Lorsque les taux de transition entre les états sont constants, le système est markovien et le graphe des états sera souvent appelé le graphe de Markov.
- En plus des taux de transitions entre les états, on rajoute une boucle à chaque sommet qui correspond à la probabilité de rester dans cet état entre  $t$  et  $(t + dt)$  (c'est-à-dire la probabilité complémentaire)

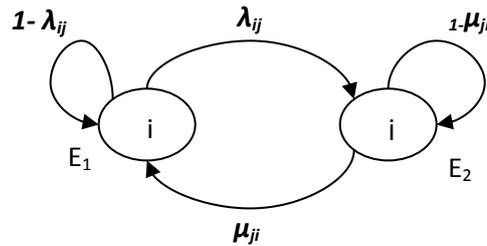


Figure IV.2. Graphe des états pour la disponibilité

**IV.2. Redondance passive :**

Considérons deux éléments identiques de taux de défaillance  $\lambda$  et de taux de réparation  $\mu$ , en redondance passive. Quand la première tombe en panne le second démarre et la réparation du premier commence tout de suite. Les deux sont en panne, il y a deux réparateurs.

Le système admet trois états.

Les états possibles de fonctionnement des systèmes sont :

- L'état  $E_1$  : Le premier élément fonctionne et le second est à l'arrêt en état de marche.
- L'état  $E_2$  : Un des éléments est en marche et le second en panne.
- L'état  $E_3$  : Les deux éléments sont en panne.

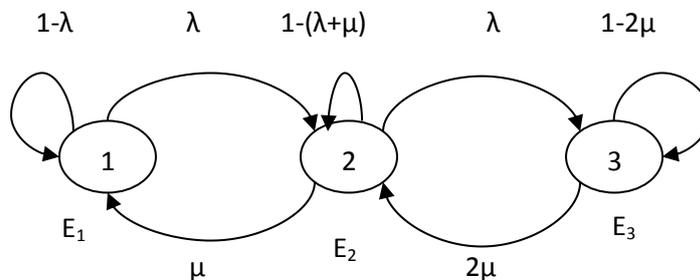


Figure IV.3. Graphe des états pour la disponibilité (redondance passive)

Pour l'évaluation de la fiabilité :

Il faut rendre l'état de panne absorbant, on va observer le système jusqu'à la défaillance totale où il y a pas de réparation à l'état 3 (c'est-à-dire y a plus de retour)

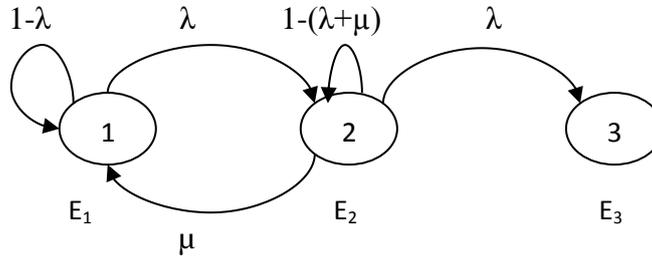


Figure VI.4. Graphe de Markov pour la fiabilité (redondance passive)

**IV.3. Redondance active :**

Si deux éléments marchent normalement en parallèle, de plus lorsque l'un des éléments est en panne, l'autre admet un taux de défaillance  $\lambda' \geq \lambda$  (car il supporte une charge plus grande). Il n'y a qu'un seul réparateur.

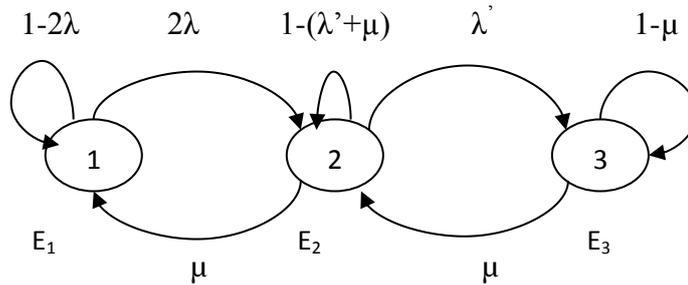


Figure VI.5. Graphe des états pour la disponibilité (redondance active)

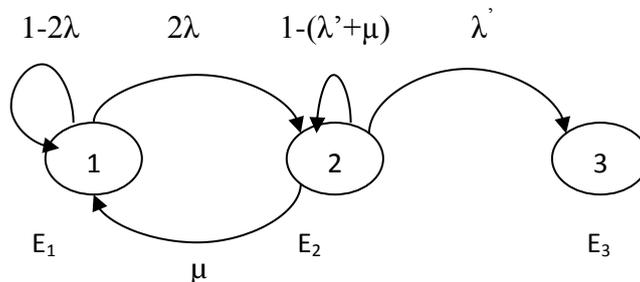


Figure VI.6. Graphe des états pour la fiabilité (redondance active)

#### IV.4. Calcul de la disponibilité et de la fiabilité d'un système TC de configuration (1+1) :

Nous considérons que nous avons un élément principal et un élément en réserve (stand-by)

##### IV.4.1. Calcul de la disponibilité par le modèle de YACIN :

On considérant les hypothèses suivantes :

- Le taux de défaillance et le taux de réparation sont constants.
- Les taux de défaillance sont identiques.
- Les taux de réparation sont identiques.
- Admettant que le nombre d'équipes de réparation est égale au nombre d'éléments qui constituent le système.
- Le temps moyen de bon fonctionnement et le temps technique de réparation soient régis par une loi exponentielle.

$$\gamma = \frac{\lambda}{\mu}$$

$\lambda$  : Taux de défaillance =  $0,0012177945h^{-1}$

$\mu$  : Taux de réparation =  $0,0663413137h^{-1}$

$\gamma$  : Modèle de Yacin =  $0,018356502$

La probabilité que les  $m$  éléments principaux et les  $l$  éléments de réserves soient tous disponibles :

$$\pi_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^l m^k \frac{\gamma^k}{k!} + m^l \sum_{k=l+1}^{m+l} \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s)} \quad (\text{IV. 1})$$

Probabilité que parmi les  $m+l$  éléments il y'ait  $k$  éléments en défaillance :

$$\pi_k = f(x) = \begin{cases} m^k \frac{\gamma^k}{k!} \pi_0 & , \quad k \leq l \\ m^l \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s) \pi_0 & , \quad k > l \end{cases} \quad (\text{IV. 2})$$

$m$  : Nombre d'éléments principaux = 1

$l$  : Nombre d'éléments en réserves = 1

**A.N :**

$$1 / \sum_{k=0}^l m^k \frac{\gamma^k}{k!} :$$

$$s_0 = m^k \frac{\gamma^k}{k!} = 1^0 \frac{(0,018356502)^0}{0!} = 1$$

$$s_1 = m^k \frac{\gamma^k}{k!} = 1^1 \frac{(0,018356502)^1}{1!} = 0,018356502$$

2/  $m^l \sum_{k=l+1}^{m+1} \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s)$ :

$$S_2 = m^l \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s) = 1^1 \frac{(0,018356502)^2}{2!} (1-0) = 0,0001685$$

Donc :

$$\pi_0 = \frac{1}{s_0 + s_1 + s_2} = \frac{1}{1 + 0,018356502 + 0,0003369612} = 0,981812$$

a/ Les probabilités des différents états :

$$P_1 = S_0 \pi_0 = 0,981812$$

$$P_2 = S_1 \pi_0 = 0,0180226$$

$$P_3 = S_2 \pi_0 = 0,0001654$$

c/ La disponibilité du système :

$$D_s = P_1 + P_2 = 0,9998346$$

#### IV.4.2. Par graphe des états, graphe de Markov :

##### IV.4.2.1. 1<sup>er</sup> cas (identiques) :

##### Disponibilité :

Considérons les mêmes hypothèses que le modèle de YACIN :

A: Élément en BEF

A: Élément en panne

A<sub>a</sub>: Élément à l'arrêt en BEF

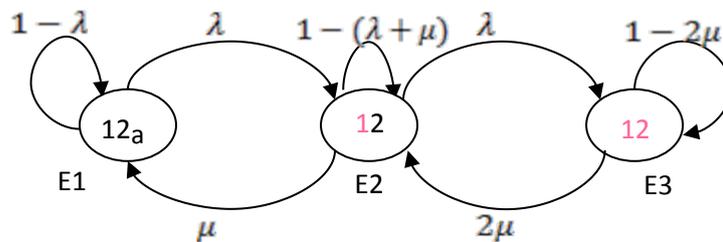


Figure VI.7. Graphe des états de la disponibilité de configuration (1+1) cas identique

On a deux machines donc deux réparateurs

- E1 : Le premier état, représente une absence de panne (bon fonctionnement)

- E2 : Etat intermédiaire, représente une défaillance partielle du système
- E3 : Le dernier état, représente une défaillance totale du système.
- Les arcs (aller, retour) : taux de transition

Si le système passant d'un état de fonctionnement à un état de panne (partiel ou total) ce taux de transition sera taux de panne, quand le système passant d'un état de panne (partiel ou total) à un état de fonctionnement le taux de transition sera taux de réparation.

La probabilité que le système reste à son état est représentée par des boucles

#### a/ Interprétation du graphe :

La matrice de transition est donnée par la matrice (3×3) suivant :

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda & 0 \\ \mu & -(\lambda + \mu) & \lambda \\ 0 & 2\mu & -2\mu \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -0,00121779 & 0,00121779 & 0 \\ 0,06634131 & -0,067559108 & 0,001217794 \\ 0 & 0,13268263 & -0,13268263 \end{bmatrix}$$

Chaque état est défini par une probabilité à partir d'une équation différentielle (verticalement), alors le système d'équations différentielles correspondant est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1(t)}{dt} = -\lambda P_1(t) + \mu P_2(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda P_1(t) - (\lambda + \mu) P_2(t) + 2\mu P_3(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda P_2(t) - 2\mu P_3(t) \end{array} \right.$$

#### b/ La résolution de ce système d'équations :

Comme on a système d'équation linéaire donc pour les conditions initial on va considérer :

$$P_1(0) = 1, \quad P_2(0) = P_3(0) = 0$$

La résolution de ce système d'équations par le logiciel MARCOV PROCESSUS donne les probabilités suivantes :

$$P_1 = 9,82E-01$$

$$P_2 = 1,80E-02$$

$$P_3 = 1,65E-04$$

**c/ La disponibilité du système :**

$$D_S = P_1 + P_2 = 1 - P_3 = 0,999835$$

Les résultats obtenues par le graphe de Markov sont les mêmes que ceux du modèle de YACIN sous les mêmes conditions, ce qui prouve la validité des graphes de Markov.

**Fiabilité :**

Le calcul de fiabilité est déduit du calcul de la disponibilité :

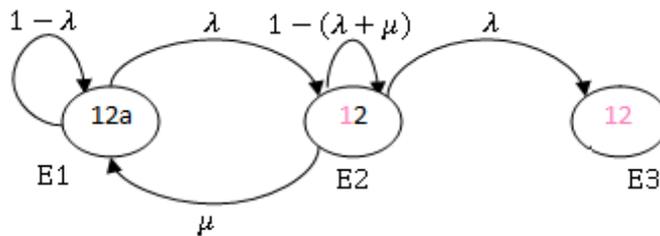


Figure VI.8. Graphe des états de la fiabilité de configuration (1+1) cas identique

**a/ Interprétation du graphe :**

La matrice de transition est donnée par la matrice (3×3) suivant :

$$A' = \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda & 0 \\ \mu & -(\lambda + \mu) & \lambda \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A' = \begin{bmatrix} -0,00121779 & 0,00121779 & 0 \\ 0,06634131 & -0,067559108 & 0,001217794 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Le système d'équations différentielles correspondant est le suivant :

$$\begin{cases} \frac{dP'_1(t)}{dt} = \lambda P'_1(t) + \mu P'_2(t) \\ \frac{dP'_2(t)}{dt} = \lambda P'_1(t) - (\lambda + \mu) P'_2(t) \\ \frac{dP'_3(t)}{dt} = \lambda P'_2(t) \end{cases}$$

**b/ La résolution de ce système d'équations :**

Suivant les démarches précédentes et pour les conditions initiales suivantes :

$$P'_1(0) = 1, \quad P'_2(0) = P'_3(0) = 0$$

On trouve :

$$P'_1 = 9,82E-01$$

$$P'_2 = 1,77E-02$$

$$P'_3 = 2,16E-05$$

**c/ La fiabilité du système :**

$$R_S = P'_1 + P'_2 = 1 - P'_3 = 0,9999784$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \Rightarrow R(t) = e^{-(1/MTBF)t} \quad (IV.3)$$

$$MTBF = -\frac{t}{LN(R)} = 46295,796 \text{ h} \quad \text{donné pour une unité de temps } t=1\text{h}$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = 2,16E-05 \quad [h^{-1}]$$

**IV.4.2.2. 2<sup>ème</sup> cas (Non identiques) :**

On considérant les hypothèses suivantes :

- Le taux de défaillance et le taux de réparation sont constants.
- Les taux de défaillance ne sont pas identiques.
- Les taux de réparation ne sont pas identiques.

$\lambda_1$  : Taux de défaillance 1 =  $0,0012177945h^{-1}$

$\lambda_2$  : Taux de défaillance 2 =  $0,00120983$

$\mu_1$  : Taux de réparation 1 =  $0,0663413137h^{-1}$

$\mu_2$  : Taux de réparation 2 =  $0,045607005 h^{-1}$

**Disponibilité :**

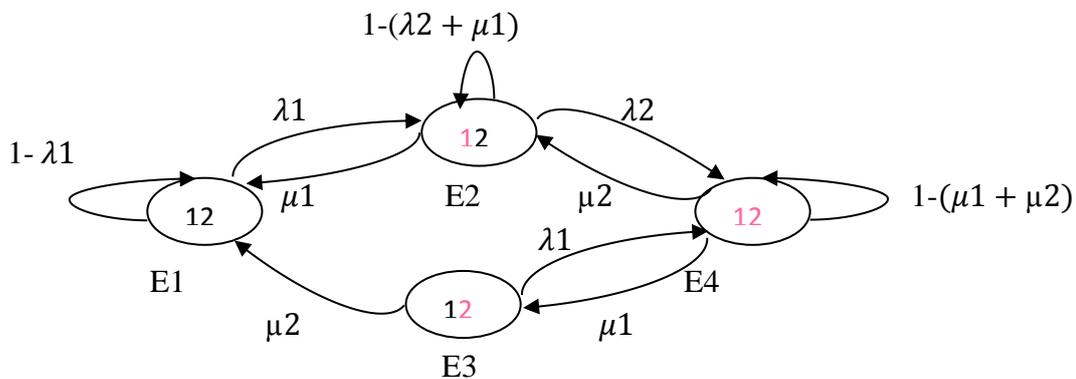


Figure VI.9. Graphe des états de la disponibilité de configuration (1+1) cas non identique

**a/ Interprétation du graphe :**

La matrice de transition est donnée par la matrice (4×4) suivant :

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda_1 & \lambda_1 & 0 & 0 \\ \mu_1 & -(\lambda_2 + \mu_1) & 0 & \lambda_2 \\ \mu_2 & 0 & -(\mu_2 + \lambda_1) & -\lambda_1 \\ 0 & \mu_2 & \mu_1 & -(\mu_1 + \mu_2) \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -0,0012177945 & 0,0012177945 & 0 & 0 \\ 0,0663413137 & -0,067551143 & 0 & 0,00120983 \\ 0,045607005 & 0 & -0,046824799 & -0,0012177945 \\ 0 & 0,045607005 & 0,0663413137 & -0,111948318 \end{bmatrix}$$

Chaque état est défini par une probabilité à partir de l'équation différentielle (verticalement), Alors le système d'équations différentielles correspondant est le suivant :

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -\lambda_1 P_1(t) + \mu_1 P_2(t) + \mu_2 P_3(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_1 P_1(t) - (\lambda_2 + \mu_1) P_2(t) + \mu_2 P_4(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \mu_2) P_3(t) + \mu_1 P_4(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_2 P_2(t) + \lambda_1 P_3(t) - (\mu_1 + \mu_2) P_4(t) \end{cases}$$

**b/ La résolution de ce système d'équations :**

Comme on a système d'équation linéaire donc pour les conditions initial on va considérer :

$$P_1(0) = 1, \quad P_2(0) = 0, \quad P_3(0) = 0, \quad P_4(0) = 0$$

La résolution de ce système d'équations par logiciel MARCOV PROCESS donne les probabilités suivantes :

$$P_1=9,82E-01$$

$$P_2=1,78E-02$$

$$P_3=2,77E-04$$

$$P_4=1,96E-04$$

**c/ La disponibilité du système :**

Après la résolution de ce système d'équations différentielles, la probabilité de l'état 1 et 2 et 3 va donner la disponibilité de système

$$D_S = P_1 + P_2 + P_3 = 1 - P_4 = 0,999804$$

**Fiabilité :**

Le calcul de fiabilité est déduit du calcul de la disponibilité en rendant le système absorbant :

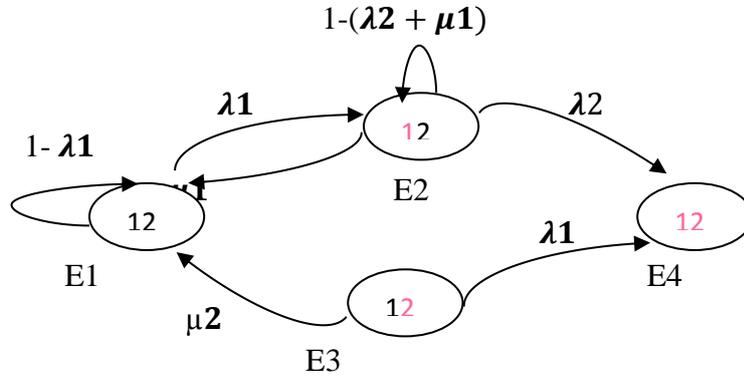


Figure VI.10. Graphe des états de la fiabilité de configuration (1+1) cas non identique

**a/ Interprétation du graphe :**

La matrice de transition est donnée par la matrice (4×4) suivant :

$$A' = \begin{bmatrix} -\lambda_1 & \lambda_1 & 0 & 0 \\ \mu_1 & -(\lambda_2 + \mu_1) & 0 & \lambda_2 \\ \mu_2 & 0 & -(\mu_2 + \lambda_1) & \lambda_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A' = \begin{bmatrix} -0,0012177945 & 0,0012177945 & 0 & 0 \\ 0,0663413137 & -0,067551143 & 0 & 0,00120983 \\ 0,045607005 & 0 & -0,046824799 & 0,0012177945 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Le système d'équations différentielles correspondant est le suivant :

$$\begin{cases} \frac{dP'_1(t)}{dt} = -\lambda_1 P'_1(t) + \mu_1 P'_2(t) + \mu_2 P'_3(t) \\ \frac{dP'_2(t)}{dt} = \lambda_1 P'_1(t) - (\lambda_2 + \mu_1) P'_2(t) \\ \frac{dP'_3(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \mu_2) P'_3(t) \\ \frac{dP'_4(t)}{dt} = \lambda_2 P'_2(t) + \lambda_1 P'_3(t) \end{cases}$$

**b/ La résolution de ce système d'équations :**

Suivant les démarches précédentes et pour les conditions initiales suivantes :

$$P'_1(0) = 1, \quad P'_2(0) = P'_3(0) = 0 \quad P'_4(0) = 0$$

On trouve :

$$P'_1 = 9,82E-01$$

$$P'_2 = 1,77E-02$$

$$P'_3 = 2,79E-04$$

$$P'_4 = 2,14E-05$$

**c/ La fiabilité du système :**

$$R_s = P'_1 + P'_2 + P'_3 = 1 - P'_4 = 0,9999786$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \Rightarrow R(t) = e^{-(1/MTBF)t} \quad (IV.4)$$

$$MTBF = -\frac{t}{\ln(R)} = 46728,472 \quad \text{donné pour une unité de temps } t=1h$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = 2,14E-05 \quad [h^{-1}]$$

**IV.5. Calcul de la disponibilité et de la fiabilité d'un Système TC de configuration (3+1) :**

Nous considérons que nous avons 3 éléments principaux et 1 élément en réserve.

**IV.5.1. Calcul de la disponibilité par le modèle de YACIN :**

On prend en considération les mêmes hypothèses précédentes de la configuration (1+1) de modèle de YACIN.

La probabilité que les m éléments principaux et les l éléments de réserves soient tous disponibles :

$$\pi_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^l m^k \frac{\gamma^k}{k!} + m^l \sum_{k=l+1}^{m+1} \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-1} (m-s)} \quad (IV.5)$$

Probabilité que parmi les n+1 éléments il y'ait k éléments en défaillance :

$$\pi_k = f(x) = \begin{cases} m^k \frac{\gamma^k}{k!} \pi_0 & , \quad k \leq l \\ m^l \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s) \pi_0 & , \quad k > l \end{cases} \quad (\text{IV. 6})$$

$m$  : Nombre d'éléments principaux = 3

$l$  : Nombre d'éléments en réserves = 1

**A.N :**

$$1 / \sum_{k=0}^l m^k \frac{\gamma^k}{k!} :$$

$$s_0 = m^k \frac{\gamma^k}{k!} = 3^0 \frac{(0,018356502)^0}{0!} = 1$$

$$s_1 = m^k \frac{\gamma^k}{k!} = 3^1 \frac{(0,018356502)^1}{1!} = 0,055069508$$

$$2/ \quad m^l \sum_{k=l+1}^{m+l} \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s) :$$

$$s_2 = m^l \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s) = 3^1 \frac{(0,018356502)^2}{2!} (3-0) = 0,001516325$$

$$s_3 = m^l \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s) = 3^1 \frac{(0,018356502)^3}{3!} (3-0)(3-1) = 1,85563E-05$$

$$s_4 = m^l \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s) = 3^1 \frac{(0,018356502)^4}{4!} (3-0)(3-1)(3-2) \\ = 8,51571E-08$$

Donc :

$$\pi_0 = \frac{1}{s_0 + s_1 + s_2 + s_3 + s_4} \\ \pi_0 = \frac{1}{1 + 0,055069506 + 0,001516325 + 1,85563E-05 + 8,51571E-08}$$

$$\pi_0 = 0,946427943$$

a. Les probabilités :

$$P_1 = S_0 \pi_0 = 0,946427943$$

$$P_2 = S_1\pi_0 = 0,052119321$$

$$P_3 = S_2\pi_0 = 0,001435093$$

$$P_4 = S_3\pi_0 = 1,75622E-05$$

$$P_5 = S_4\pi_0 = 8,05951E-08$$

b. La disponibilité de la station de compression :

$$D_{TC} = 1 - P_5 = 0,999999919$$

**IV.5.2. Par graphe des états, graphe de Markov :**

**IV.5.2.1. 1<sup>er</sup> cas (identiques) :**

On prend en considération les mêmes hypothèses que le modèle de YACIN

**Disponibilité :**

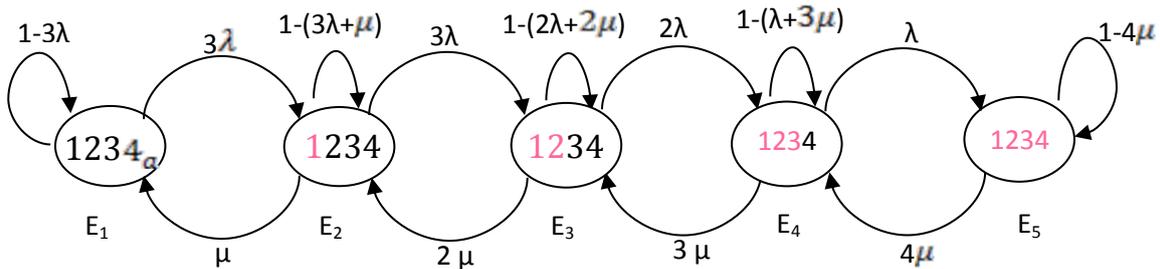


Figure VI.11. Graphe des états de la disponibilité de configuration (3+1) cas identique

**a/ Interprétation du graphe :**

La matrice de transition est donnée par la matrice (5×5) suivant :

$$A = \begin{bmatrix} -3\lambda & 3\lambda & 0 & 0 & 0 \\ \mu & -(3\lambda + \mu) & 3\lambda & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu & -(2\lambda + 2\mu) & 2\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 3\mu & -(\lambda + 3\mu) & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 4\mu & -4\mu \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -0,00365338 & 0,00365338 & 0 & 0 & 0 \\ 0,06634131 & -0,0699947 & 0,00365338 & 0 & 0 \\ 0 & 0,13268263 & -0,13511822 & 0,00243559 & 0 \\ 0 & 0 & 0,19902394 & -0,20024174 & 0,001217794 \\ 0 & 0 & 0 & 0,26536525 & -0,26536525 \end{bmatrix}$$

Le système d'équations différentielles correspondant est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1(t)}{dt} = -3\lambda P_1(t) + \mu P_2(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = 3\lambda P_1(t) - (3\lambda + \mu)P_2(t) + 2\mu P_3(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = 3\lambda P_2(t) - (2\lambda + 2\mu)P_3(t) + 3\mu P_4(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = 2\lambda P_3(t) - (\lambda + 3\mu)P_4(t) + 4\mu P_5(t) \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \lambda P_4(t) - 4\mu P_5(t) \end{array} \right.$$

**b/ La résolution de ce système d'équations donne les probabilités suivantes :**

Comme on a système d'équation linéaire donc pour les conditions initial on va considérer :

$$P_1(0) = 1, P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = P_5(0) = 0$$

La résolution de ce système d'équations par logiciel MARCOV PROCESS donne les probabilités suivantes :

$$P_1 = 9,46E-01$$

$$P_2 = 5,21E-02$$

$$P_3 = 1,44E-03$$

$$P_4 = 1,76E-05$$

$$P_5 = 8,06E-08$$

**c/ La disponibilité du système :**

$$D_S = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1 - P_5$$

$$D_S = 0,999999919$$

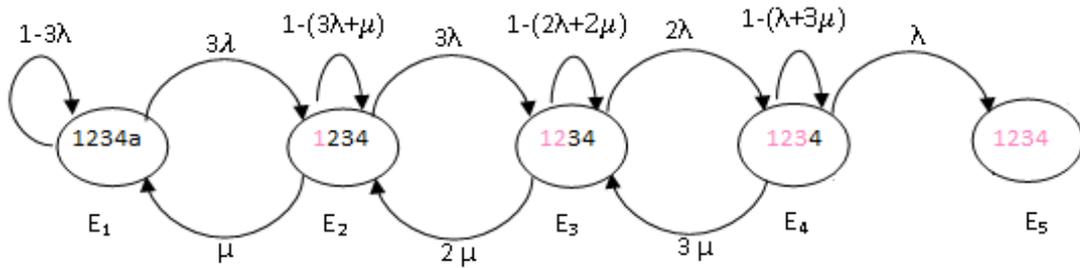
**Fiabilité :**


Figure IV.12. Graphe des états de la fiabilité de configuration (3+1) cas identique

**a/ Interprétation du graphe :**

La matrice de transition est donnée par la matrice (5×5) suivant :

$$A' = \begin{bmatrix} -3\lambda & 3\lambda & 0 & 0 & 0 \\ \mu & -(3\lambda + \mu) & 3\lambda & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu & -(2\lambda + 2\mu) & 2\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 3\mu & -(\lambda + 3\mu) & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A' = \begin{bmatrix} -0,00365338 & 0,00365338 & 0 & 0 & 0 \\ 0,06634131 & -0,0699947 & 0,00365338 & 0 & 0 \\ 0 & 0,13268263 & -0,13511822 & 0,00243559 & 0 \\ 0 & 0 & 0,19902394 & -0,20024174 & 0,001217794 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Le système d'équations différentielles correspondant est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP'_1(t)}{dt} = -3\lambda P'_1(t) + \mu P'_2(t) \\ \frac{dP'_2(t)}{dt} = 3\lambda P'_1(t) - (3\lambda + \mu)P'_2(t) + 2\mu P'_3(t) \\ \frac{dP'_3(t)}{dt} = 3\lambda P'_2(t) - (2\lambda + 2\mu)P'_3(t) + 3\mu P'_4(t) \\ \frac{dP'_4(t)}{dt} = 2\lambda P'_3(t) - (\lambda + 3\mu)P'_4(t) \\ \frac{dP'_5(t)}{dt} = \lambda P'_4(t) \end{array} \right.$$

**b/ La résolution de ce système d'équations :**

Suivant les démarches précédentes et pour les mêmes conditions initiales on trouve les probabilités suivantes :

$$P'_1 = 9,46E-01$$

$$P'_2 = 5,21E-02$$

$$P'_3 = 1,43E-03$$

$$P'_4 = 1,75E-05$$

$$P'_5 = 2,13E-08$$

**d/ La fiabilité du système :**

$$R_S = 1 - P'_5 = 0,999999978$$

$$MTBF = -\frac{t}{\text{LN}(R)} = 45454544,95 \quad \text{donné pour une unité de temps } t=1\text{h}$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = 2,2E-08 \quad [\text{h}^{-1}]$$

**IV.5.2.2. 2<sup>ème</sup> cas (non identiques) :**

D'après l'inférence bayésienne (chapitre suivant) on trouve :

- Les taux de défaillance différents :  
 $\lambda_1 = 0,001303451$  ;  $\lambda_2 = 0,00120983$  ;  $\lambda_3 = 0,0011347$  ;  $\lambda_4 = 0,001208428$
- Les taux de réparation différents :  
 $\mu_1 = 0,073859283$  ;  $\mu_2 = 0,045607005$  ;  $\mu_3 = 0,085597632$  ;  $\mu_4 = 0,060301335$

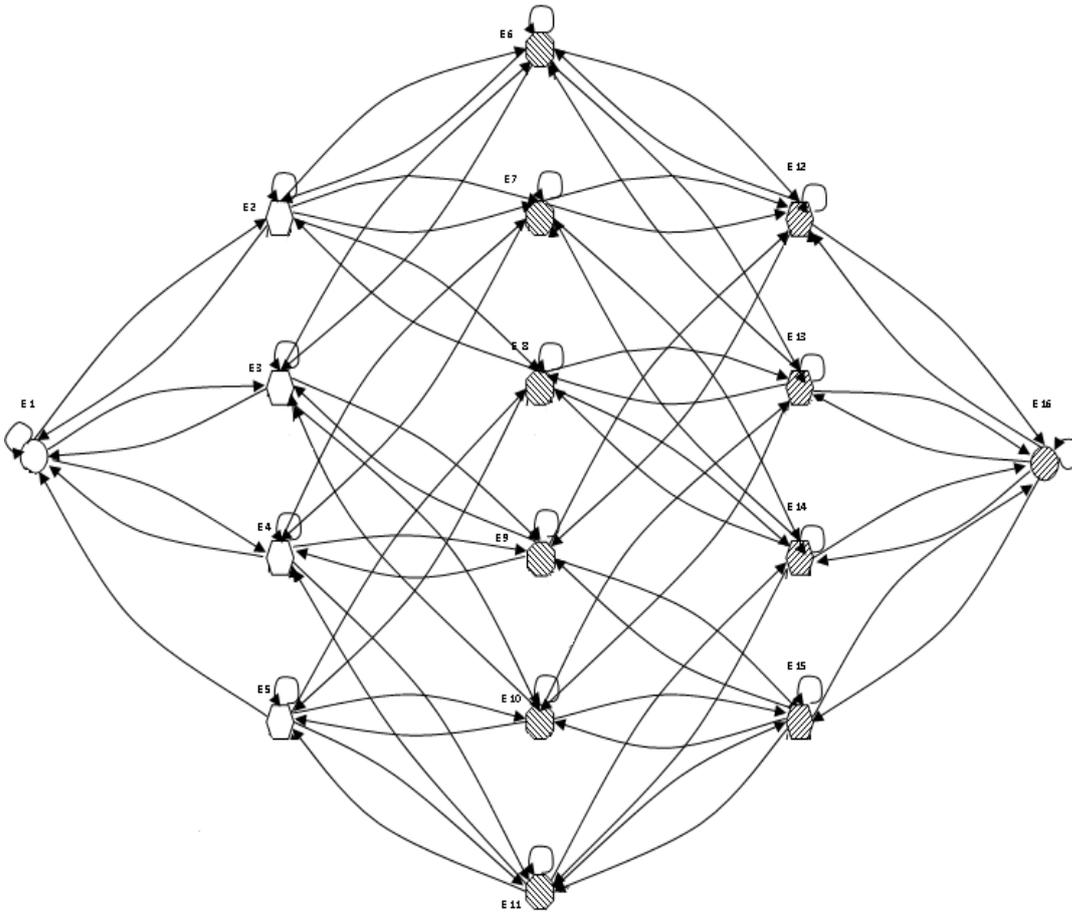


Figure IV.13. Graphe des états de la disponibilité de configuration (3+1) cas non identique

**a/ Interprétation du graphe :**

La matrice de transition est donnée par la matrice (16×16) suivant :

$$A = \begin{bmatrix} A1 & \lambda1 & \lambda2 & \lambda3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu1 & A2 & 0 & 0 & 0 & \lambda2 & \lambda3 & \lambda4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu2 & 0 & A3 & 0 & 0 & \lambda1 & 0 & 0 & \lambda3 & \lambda4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu3 & 0 & 0 & A4 & 0 & 0 & \lambda1 & 0 & \lambda2 & 0 & \lambda4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu4 & 0 & 0 & 0 & A5 & 0 & 0 & \lambda1 & 0 & \lambda2 & \lambda3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu2 & \mu1 & 0 & 0 & A6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda3 & \lambda4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu3 & 0 & \mu1 & 0 & 0 & A7 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda2 & 0 & \lambda4 & 0 & 0 \\ 0 & \mu4 & 0 & 0 & \mu1 & 0 & 0 & A8 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda2 & \lambda3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu3 & \mu2 & 0 & 0 & 0 & 0 & A9 & 0 & 0 & \lambda1 & 0 & 0 & \lambda4 & 0 \\ 0 & 0 & \mu4 & 0 & \mu2 & 0 & 0 & 0 & 0 & A10 & 0 & 0 & \lambda1 & 0 & \lambda3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu4 & \mu3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A11 & 0 & 0 & \lambda1 & \lambda2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu3 & \mu2 & 0 & \mu1 & 0 & 0 & A12 & 0 & 0 & 0 & \lambda4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu4 & 0 & \mu2 & 0 & \mu1 & 0 & 0 & A13 & 0 & 0 & \lambda3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu4 & \mu3 & 0 & 0 & \mu1 & 0 & 0 & A14 & 0 & \lambda2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu4 & \mu3 & \mu2 & 0 & 0 & 0 & A15 & \lambda1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu4 & \mu3 & \mu2 & \mu1 & A16 & 0 \end{bmatrix}$$

Avec :

$$\begin{aligned}
 A1 &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \\
 A2 &= -(\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \mu_1) \\
 A3 &= -(\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \mu_2) \\
 A4 &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \mu_3) \\
 A5 &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \mu_4) \\
 A6 &= -(\lambda_3 + \lambda_4 + \mu_1 + \mu_2) \\
 A7 &= -(\lambda_2 + \lambda_4 + \mu_1 + \mu_3) \\
 A8 &= -(\lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1 + \mu_4) \\
 A9 &= -(\lambda_1 + \lambda_4 + \mu_2 + \mu_3) \\
 A10 &= -(\lambda_1 + \lambda_3 + \mu_2 + \mu_4) \\
 A11 &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3 + \mu_4) \\
 A12 &= -(\lambda_4 + \mu_1 + \mu_2 + \mu_3) \\
 A13 &= -(\lambda_3 + \mu_1 + \mu_2 + \mu_4) \\
 A14 &= -(\lambda_2 + \mu_1 + \mu_3 + \mu_4) \\
 A15 &= -(\lambda_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4) \\
 A16 &= -(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4)
 \end{aligned}$$

De l'Excel on extrait la matrice de transition (16×16) de la disponibilité suivante :

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16
E1	-0,00366	0,001303	0,00121	0,001149	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E2	0,073859	-0,07743	0	0	0	0,00121	0,001149	0,001208	0	0	0	0	0	0	0	0
E3	0,045607	0	-0,04927	0	0	0,001303	0	0	0,001149	0,001208	0	0	0	0	0	0
E4	0,085598	0	0	-0,08932	0	0	0,001303	0	0,00121	0	0,001208	0	0	0	0	0
E5	0,060301	0	0	0	-0,06396	0	0	0,001303	0	0,00121	0,001149	0	0	0	0	0
E6	0	0,045607	0,073859	0	0	-0,12182	0	0	0	0	0	0,001149	0,001208	0	0	0
E7	0	0,085598	0	0,073859	0	0	-0,16188	0	0	0	0	0,00121	0	0,001208	0	0
E8	0	0,060301	0	0	0,073859	0	0	-0,13652	0	0	0	0	0,00121	0,001149	0	0
E9	0	0	0,085598	0,045607	0	0	0	0	-0,13372	0	0	0,001303	0	0	0,001208	0
E10	0	0	0,060301	0	0,045607	0	0	0	0	-0,10836	0	0	0,001303	0	0,001149	0
E11	0	0	0	0,060301	0,085598	0	0	0	0	0	-0,14841	0	0	0,001303	0,00121	0
E12	0	0	0	0	0	0,085598	0,045607	0	0,073859	0	0	-0,20627	0	0	0	0,001208
E13	0	0	0	0	0	0,060301	0	0,045607	0	0,073859	0	0	-0,18092	0	0	0,001149
E14	0	0	0	0	0	0	0,060301	0,085598	0	0	0,073859	0	0	-0,22097	0	0,00121
E15	0	0	0	0	0	0	0	0	0,060301	0,085598	0,045607	0	0	0	-0,19281	0,001303
E16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,060301	0,085598	0,045607	0,073859	-0,26537

Tableau IV.1. Matrice de transition de la disponibilité

Le système d'équations différentielles correspondant est le suivant :

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_1(t) + \mu_1P_2(t) + \mu_2P_3(t) + \mu_3P_4(t) + \mu_4P_5(t)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_1P_1(t) - (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \mu_1)P_2(t) + \mu_2P_6(t) + \mu_3P_7(t) + \mu_4P_8(t)$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_2P_1(t) - (\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \mu_2)P_2(t) + \mu_1P_6(t) + \mu_3P_9(t) + \mu_4P_{10}(t)$$

$$\frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_3P_1(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \mu_3)P_4(t) + \mu_1P_7(t) + \mu_2P_9(t) + \mu_4P_{11}(t)$$

$$\frac{dP_5(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \mu_4)P_5(t) + \mu_1P_8(t) + \mu_2P_{10}(t) + \mu_3P_{11}(t)$$

$$\frac{dP_6(t)}{dt} = \lambda_2P_2(t) + \lambda_1P_3(t) - (\lambda_3 + \lambda_4 + \mu_1 + \mu_2)P_6(t) + \mu_3P_{12}(t) + \mu_4P_{13}(t)$$

$$\frac{dP_7(t)}{dt} = \lambda_3P_2(t) + \lambda_1P_4(t) - (\lambda_2 + \lambda_4 + \mu_1 + \mu_3)P_7(t) + \mu_2P_{12}(t) + \mu_4P_{14}(t)$$

$$\frac{dP_8(t)}{dt} = \lambda_4P_2(t) + \lambda_1P_5(t) - (\lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1 + \mu_4)P_8(t) + \mu_2P_{13}(t) + \mu_3P_{14}(t)$$

$$\frac{dP_9(t)}{dt} = \lambda_3P_3(t) + \lambda_2P_4(t) - (\lambda_1 + \lambda_4 + \mu_2 + \mu_3)P_9(t) + \mu_1P_{12}(t) + \mu_4P_{15}(t)$$

$$\frac{dP_{10}(t)}{dt} = \lambda_4P_3(t) + \lambda_2P_5(t) - (\lambda_1 + \lambda_3 + \mu_2 + \mu_4)P_{10}(t) + \mu_1P_{13}(t) + \mu_3P_{15}(t)$$

$$\frac{dP_{11}(t)}{dt} = \lambda_4P_4(t) + \lambda_3P_5(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3 + \mu_4)P_{11}(t) + \mu_1P_{14}(t) + \mu_2P_{15}(t)$$

$$\frac{dP_{12}(t)}{dt} = \lambda_3P_6(t) + \lambda_2P_7(t) + \mu_1P_9(t) - (\lambda_4 + \mu_1 + \mu_2 + \mu_3)P_{12}(t) + \mu_4P_{16}(t)$$

$$\frac{dP_{13}(t)}{dt} = \lambda_4P_6(t) + \lambda_2P_8(t) + \mu_1P_9(t) - (\lambda_3 + \mu_1 + \mu_2 + \mu_4)P_{13}(t) + \mu_3P_{16}(t)$$

$$\frac{dP_{14}(t)}{dt} = \lambda_4P_7(t) + \lambda_3P_8(t) + \lambda_1P_{11}(t) - (\lambda_2 + \mu_1 + \mu_3 + \mu_4)P_{14}(t) + \mu_2P_{16}(t)$$

$$\frac{dP_{15}(t)}{dt} = \lambda_4P_9(t) + \lambda_3P_{10}(t) + \lambda_2P_{11}(t) - (\lambda_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4)P_{15}(t) + \mu_1P_{16}(t)$$

$$\frac{dP_{16}(t)}{dt} = \lambda_4P_{12}(t) + \lambda_3P_{13}(t) + \lambda_2P_{14}(t) + \lambda_1P_{15}(t) - (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4)P_{16}(t)$$

**b/ La résolution de ce système d'équations :**

La résolution de ce système d'équations donne les probabilités suivantes :

$P_1=9,44E-01$	$P_2=1,65E-02$	$P_3=2,48E-02$	$P_4=1,26E-02$
$P_5=5,32E-04$	$P_6=4,36E-04$	$P_7=2,21E-04$	$P_8=1,55E-04$
$P_9=3,32E-04$	$P_{10}=2,90E-04$	$P_{11}=1,09E-04$	$P_{12}= 5,85E-06$
$P_{13}= 6,08E-06$	$P_{14}=2,68E-06$	$P_{15}=4,53E-06$	$P_{16}= 8,74E-08$

**c/ La disponibilité de la station de compression :**

$$D_{TC} = \sum_{i=1}^{15} P_i = 1 - P_{16}$$

$$D_{TC} = 0,999999912$$

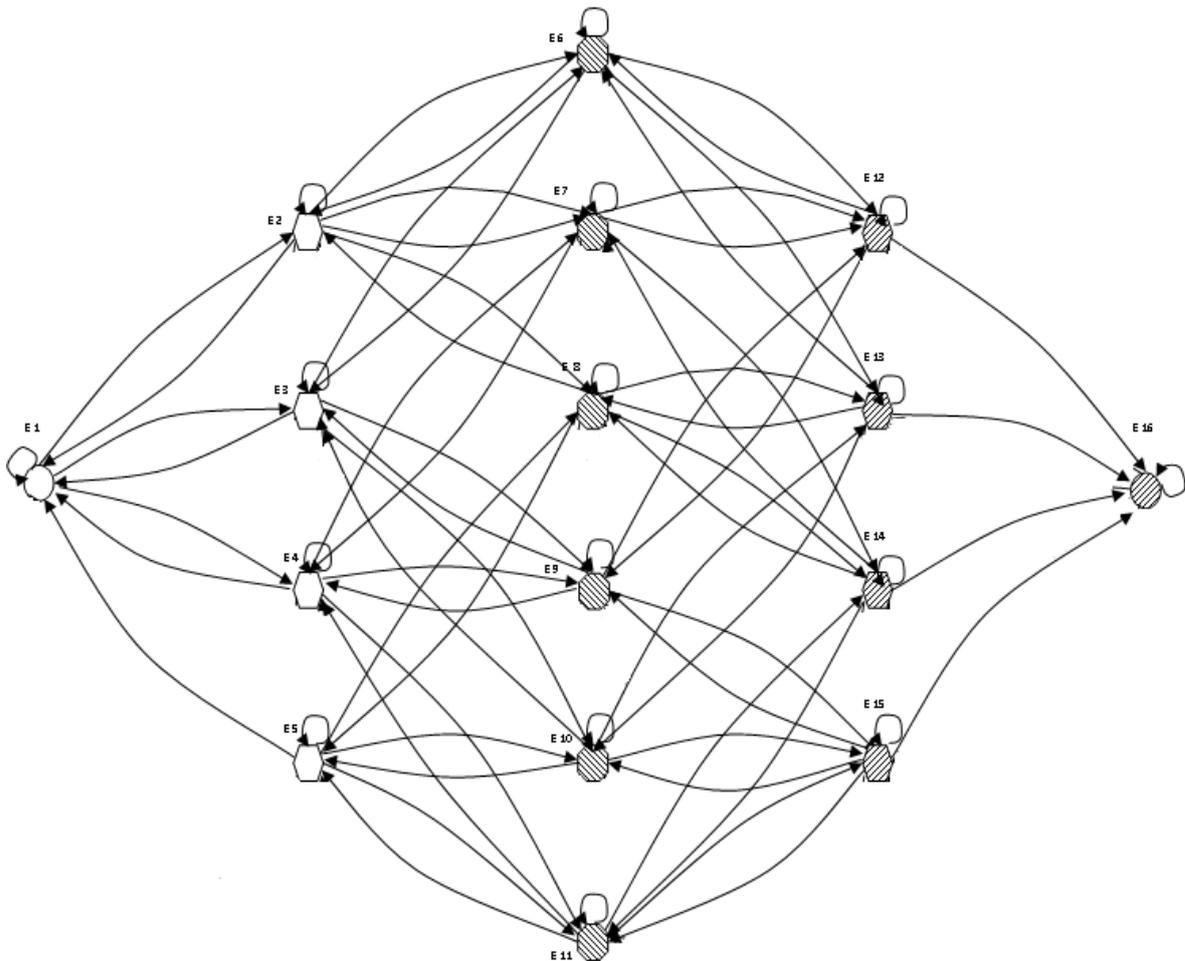
**Fiabilité :**

Figure IV.14. Graphe des états de la fiabilité de configuration (3+1) cas non

**a/ Interprétation du graphe :**

La matrice de transition est donnée par la matrice (16×16) suivant :

$$A' = \begin{bmatrix} A1 & \lambda1 & \lambda2 & \lambda3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu1 & A2 & 0 & 0 & 0 & \lambda2 & \lambda3 & \lambda4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu2 & 0 & A3 & 0 & 0 & \lambda1 & 0 & 0 & \lambda3 & \lambda4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu3 & 0 & 0 & A4 & 0 & 0 & \lambda1 & 0 & \lambda2 & 0 & \lambda4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu4 & 0 & 0 & 0 & A5 & 0 & 0 & \lambda1 & 0 & \lambda2 & \lambda3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu2 & \mu1 & 0 & 0 & A6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda3 & \lambda4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu3 & 0 & \mu1 & 0 & 0 & A7 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda2 & 0 & \lambda4 & 0 & 0 \\ 0 & \mu4 & 0 & 0 & \mu1 & 0 & 0 & A8 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda2 & \lambda3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu3 & \mu2 & 0 & 0 & 0 & 0 & A9 & 0 & 0 & \lambda1 & 0 & 0 & \lambda4 & 0 \\ 0 & 0 & \mu4 & 0 & \mu2 & 0 & 0 & 0 & 0 & A10 & 0 & 0 & \lambda1 & 0 & \lambda3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu4 & \mu3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A11 & 0 & 0 & \lambda1 & \lambda2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu3 & \mu2 & 0 & \mu1 & 0 & 0 & A12 & 0 & 0 & 0 & \lambda4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu4 & 0 & \mu2 & 0 & \mu1 & 0 & 0 & A13 & 0 & 0 & \lambda3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu4 & \mu3 & 0 & 0 & \mu1 & 0 & 0 & A14 & 0 & \lambda2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu4 & \mu3 & \mu2 & 0 & 0 & 0 & A15 & \lambda1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Avec :

$$\begin{aligned} A1 &= -(\lambda1 + \lambda2 + \lambda3) & A2 &= -(\lambda2 + \lambda3 + \lambda4 + \mu1) \\ A3 &= -(\lambda1 + \lambda3 + \lambda4 + \mu2) & A4 &= -(\lambda1 + \lambda2 + \lambda4 + \mu3) \\ A5 &= -(\lambda1 + \lambda2 + \lambda3 + \mu4) & A6 &= -(\lambda3 + \lambda4 + \mu1 + \mu2) \\ A7 &= -(\lambda2 + \lambda4 + \mu1 + \mu3) & A8 &= -(\lambda2 + \lambda3 + \mu1 + \mu4) \\ A9 &= -(\lambda1 + \lambda4 + \mu2 + \mu3) & A10 &= -(\lambda1 + \lambda3 + \mu2 + \mu4) \\ A11 &= -(\lambda1 + \lambda2 + \mu3 + \mu4) & A12 &= -(\lambda4 + \mu1 + \mu2 + \mu3) \\ A13 &= -(\lambda3 + \mu1 + \mu2 + \mu4) & A14 &= -(\lambda2 + \mu1 + \mu3 + \mu4) \\ A15 &= -(\lambda1 + \mu2 + \mu3 + \mu4) & A16 &= 0 \end{aligned}$$

De l'Excel on extrait la matrice de transition (16×16) de la disponibilité suivante :

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16
E1	-0,00366	0,001303	0,00121	0,001149	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E2	0,073859	-0,07743	0	0	0	0,00121	0,001149	0,001208	0	0	0	0	0	0	0	0
E3	0,045607	0	-0,04927	0	0	0,001303	0	0	0,001149	0,001208	0	0	0	0	0	0
E4	0,085598	0	0	-0,08932	0	0	0,001303	0	0,00121	0	0,001208	0	0	0	0	0
E5	0,060301	0	0	0	-0,06396	0	0	0,001303	0	0,00121	0,001149	0	0	0	0	0
E6	0	0,045607	0,073859	0	0	-0,12182	0	0	0	0	0	0,001149	0,001208	0	0	0
E7	0	0,085598	0	0,073859	0	0	-0,16188	0	0	0	0	0,00121	0	0,001208	0	0
E8	0	0,060301	0	0	0,073859	0	0	-0,13652	0	0	0	0	0,00121	0,001149	0	0
E9	0	0	0,085598	0,045607	0	0	0	0	-0,13372	0	0	0,001303	0	0	0,001208	0
E10	0	0	0,060301	0	0,045607	0	0	0	0	-0,10836	0	0	0,001303	0	0,001149	0
E11	0	0	0	0,060301	0,085598	0	0	0	0	0	-0,14841	0	0	0,001303	0,00121	0
E12	0	0	0	0	0	0,085598	0,045607	0	0,073859	0	0	-0,20627	0	0	0	0,001208
E13	0	0	0	0	0	0,060301	0	0,045607	0	0,073859	0	0	-0,18092	0	0	0,001149
E14	0	0	0	0	0	0	0,060301	0,085598	0	0	0,073859	0	0	-0,22097	0	0,00121
E15	0	0	0	0	0	0	0	0	0,060301	0,085598	0,045607	0	0	0	-0,19281	0,001303
E16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau IV.2. Matrice de transition de la

Le système d'équations différentielles correspondant est le suivant :

$$\frac{dP'_1(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P'_1(t) + \mu_1P'_2(t) + \mu_2P'_3(t) + \mu_3P'_4(t) + \mu_4P'_5(t)$$

$$\frac{dP'_2(t)}{dt} = \lambda_1P'_1(t) - (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \mu_1)P'_2(t) + \mu_2P'_6(t) + \mu_3P'_7(t) + \mu_4P'_8(t)$$

$$\frac{dP'_3(t)}{dt} = \lambda_2P'_1(t) - (\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \mu_2)P'_2(t) + \mu_1P'_6(t) + \mu_3P'_9(t) + \mu_4P'_{10}(t)$$

$$\frac{dP'_4(t)}{dt} = \lambda_3P'_1(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \mu_3)P'_4(t) + \mu_1P'_7(t) + \mu_2P'_9(t) + \mu_4P'_{11}(t)$$

$$\frac{dP'_5(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \mu_4)P'_5(t) + \mu_1P'_8(t) + \mu_2P'_{10}(t) + \mu_3P'_{11}(t)$$

$$\frac{dP'_6(t)}{dt} = \lambda_2P'_2(t) + \lambda_1P'_3(t) - (\lambda_3 + \lambda_4 + \mu_1 + \mu_2)P'_6(t) + \mu_3P'_{12}(t) + \mu_4P'_{13}(t)$$

$$\frac{dP'_7(t)}{dt} = \lambda_3P'_2(t) + \lambda_1P'_4(t) - (\lambda_2 + \lambda_4 + \mu_1 + \mu_3)P'_7(t) + \mu_2P'_{12}(t) + \mu_4P'_{14}(t)$$

$$\frac{dP'_8(t)}{dt} = \lambda_4P'_2(t) + \lambda_1P'_5(t) - (\lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1 + \mu_4)P'_8(t) + \mu_2P'_{13}(t) + \mu_3P'_{14}(t)$$

$$\frac{dP'_9(t)}{dt} = \lambda_3P'_3(t) + \lambda_2P'_4(t) - (\lambda_1 + \lambda_4 + \mu_2 + \mu_3)P'_9(t) + \mu_1P'_{12}(t) + \mu_4P'_{15}(t)$$

$$\frac{dP'_{10}(t)}{dt} = \lambda_4P'_3(t) + \lambda_2P'_5(t) - (\lambda_1 + \lambda_3 + \mu_2 + \mu_4)P'_{10}(t) + \mu_1P'_{13}(t) + \mu_3P'_{15}(t)$$

$$\frac{dP'_{11}(t)}{dt} = \lambda_4P'_4(t) + \lambda_3P'_5(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3 + \mu_4)P'_{11}(t) + \mu_1P'_{14}(t) + \mu_2P'_{15}(t)$$

$$\frac{dP'_{12}(t)}{dt} = \lambda_3P'_6(t) + \lambda_2P'_7(t) + \mu_1P'_9(t) - (\lambda_4 + \mu_1 + \mu_2 + \mu_3)P'_{12}(t)$$

$$\frac{dP'_{13}(t)}{dt} = \lambda_4P'_6(t) + \lambda_2P'_8(t) + \mu_1P'_9(t) - (\lambda_3 + \mu_1 + \mu_2 + \mu_4)P'_{13}(t)$$

$$\frac{dP'_{14}(t)}{dt} = \lambda_4P'_7(t) + \lambda_3P'_8(t) + \lambda_1P'_{11}(t) - (\lambda_2 + \mu_1 + \mu_3 + \mu_4)P'_{14}(t)$$

$$\frac{dP'_{15}(t)}{dt} = \lambda_4P'_9(t) + \lambda_3P'_{10}(t) + \lambda_2P'_{11}(t) - (\lambda_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4)P'_{15}(t)$$

**b/ La résolution de ce système d'équations :**

La résolution de ce système d'équations donne les probabilités suivantes :

$P'_1=9,44E-01$	$P'_2=1,65E-02$	$P'_3=2,48E-02$	$P'_4=1,26E-02$
$P'_5=5,32E-04$	$P'_6=4,36E-04$	$P'_7=2,21E-04$	$P'_8=1,55E-04$
$P'_9=3,32E-04$	$P'_{10}=2,90E-04$	$P'_{11}=1,09E-04$	$P'_{12}= 5,82E-06$
$P'_{13}= 6,04E-06$	$P'_{14}= 2,66E-06$	$P'_{15}= 4,49E-06$	$P'_{16}= 2,31E-08$

**c/ La fiabilité du système :**

$$R_S = \sum_{i=1}^{i=15} P_i = 1 - P'_{16}$$

$$R_S = 0,99999998$$

$$MTBF = -\frac{t}{LN(R)} = 43290042,7 \text{ donné pour une unité de temps } t=1h$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = 2,31E-08 \text{ [h}^{-1}\text{]}^1$$

**Conclusion :**

Les graphes de Markov sont très utiles pour évaluer la disponibilité, la fiabilité et la maintenabilité des systèmes réparables et ils ont la possibilité de prendre en compte la réalité du terrain mais il devient compliquer de modéliser des systèmes complexes avec des redondances ou le nombre d'élément est important ce qui se traduit par une explosion combinatoire.

# Chapitre V

Estimation des indices de fiabilité des TC par inférence bayésienne

« Tu peux tout accomplir dans la vie si tu as le courage de le rêver, l'intelligence d'en faire un projet réaliste, et la volonté de voir ce projet mené à bien »

-Sidney A.Friedman -

## Introduction :

Dans le cadre d'une modélisation de la disponibilité et de la fiabilité d'une station de compression ; les paramètres de fiabilité des TC peuvent être estimés sur la base d'un amalgame de données issues de plusieurs machines identiques afin d'enrichir l'échantillon à analyser.

La connaissance de ces indices permet par comparaison avec les valeurs disponibles dans la base de données internationale de :

- Juger l'état technique d'un équipement
- Quantifier la qualité de sa maintenance
- Mesurer l'effort qui reste à faire dans ce domaine pour atteindre les standards internationaux

Dans le cas d'un gazoduc, l'identification des indices de fiabilité des turbocompresseurs est primordiale. D'une manière générale, l'estimation de ces indices de fiabilité se base sur l'historique de panne et des durées de réparation recueilli sur site pour chaque équipement. L'expertise aguis sur le terrain montre en réalité que les paramètres de fiabilité des machines semblables fonctionnant dans un environnement identique sont différents d'une machine à l'autre car ses dernières vieillissent différemment.

## V.1. Estimation des indices de fiabilité :

L'estimation des indices de fiabilité et de maintenabilité des sous-systèmes, pour chaque cas concret et selon la qualité des données disponibles, peut se faire suivant une approche objective ou subjective. [4]

Le choix de l'une ou de l'autre de ces tendances passe par :

- l'analyse qualitative et quantitative des données disponibles sur site relatives aux pannes des équipements et de leur durée de réparation ;
- la richesse du retour d'expérience provenant de sites technologiques équivalents et de bases de données internationales ;
- la disponibilité d'informations issues de jugements d'experts

### V.1.1. Approche objective de l'estimation des indices de fiabilité :

L'approche objective de l'estimation des indices de fiabilité, représentée principalement par l'approche dite fréquentiste, qui, sur la base de la loi forte des grands nombres, définit la probabilité comme la limite de la fréquence relative des observations faites au cours d'épreuves identiques et indépendantes, par rapport au nombre total des cas supposés tous également possibles, lorsque le nombre d'épreuves tend symboliquement vers l'infini.

Considérant un jeu de variables aléatoires  $t_1, t_2, \dots, t_k$  représentant les temps de bon fonctionnement (TBF) observés d'un équipement donné. Le MTBF et le taux de panne peuvent être estimés par les relations suivantes :

$$\text{MTBF} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k t_i \quad (\text{V. 1})$$

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} \quad (\text{V. 2})$$

$k$  est le nombre total de pannes se produisant durant la période de fonctionnement. Le même raisonnement peut également être appliqué pour le MTTR :

$$\text{MTTR} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \tau_i \quad (\text{V. 3})$$

$$\mu = \frac{1}{\text{MTTR}} \quad (\text{V. 4})$$

$\tau_i$  : Durée de la réparation après apparition de la panne  $i$ .

$\mu_i$  : Taux moyen de réparation.

### V.1.2. Approche subjective de l'estimation des indices de fiabilité :

Les données pratiques tirées de l'historique des pannes des sous-systèmes durant leur exploitation sont le plus souvent peu nombreuses ou statistiquement insuffisantes. L'approche subjective consiste sommairement à introduire des jugements de type heuristique dans l'évaluation de la probabilité d'une proposition donnée. Cette approche consiste à modéliser l'incertitude que l'on a sur l'occurrence d'un événement, partant d'une valeur de probabilité subjective évaluée a priori, puis de déduire une probabilité a posteriori corrigée par les informations nouvellement acquises (inférence bayésienne). L'information disponible, susceptible d'être utilisée a priori pour l'estimation des indices de fiabilité et de maintenabilité, peut revêtir différentes formes. On la trouve en particulier sous deux aspects :

- des valeurs numériques moyennes fournies par les bases de données pour chaque type d'équipement
- de jugements d'experts exprimés sous forme d'intervalle encadrant une valeur moyenne.

Dans cette partie de notre étude on va procéder à l'estimation des taux de panne ; taux de réparation pour un système de TC en redondance passive par approche subjective. Pour ce faire, nous allons faire appel aux techniques d'inférence bayésienne.

## V.2. Simulation de Monte-Carlo :

Le terme « simulation » prête parfois à confusion car il est généralement employé dans deux types de situations : Les situations où l'on cherche à connaître l'évolution dans le temps d'un système et on parlera alors de la simulation dynamique, et les situations où l'on cherche à définir la probabilité d'occurrence de certains événements et on parlera alors de simulation Monte Carlo.

### V.2.1. Génération de nombres Pseudo-aléatoires:

Le tirage au hasard de temps de fonctionnement ou de réparation est nécessaire pour la réalisation d'une simulation Monte Carlo. La génération de nombres aléatoires est basée sur la génération de nombres aléatoires distribués uniformément.

La méthode la plus utilisée actuellement est la méthode congruentielle, mais ils existent d'autres méthodes telles que la méthode du Mid-square ou la méthode de Lehmer. La méthode congruentielle peut se résumer par la formule :

$$x_{i+1} = A x_i + M \pmod{B} \quad (V.5)$$

Où :  $x_i$  et  $x_{i+1}$  sont deux réalisations successives,  $A$ ,  $B$  et  $M$  des constantes.

Il existe un grand nombre de tests permettant de s'assurer de la qualité des nombres générés, appelés nombres pseudo – aléatoires. La génération de nombres aléatoires distribués suivant une loi donnée pourra alors s'effectuer à l'aide de nombres pseudo aléatoires distribués uniformément par inversion de la fonction de répartition.

Dans le but d'utiliser un ordinateur pour mener une étude de simulation, on doit pouvoir générer les valeurs d'une variable aléatoire uniforme sur  $(0,1)$  ; ces valeurs sont appelées des nombres aléatoires. Pour générer ces nombres, la plupart des ordinateurs possèdent une fonction prédéfinie appelée générateur de nombres aléatoires qui produit une suite de nombres pseudo aléatoires. C'est une suite de nombres qui est pratiquement semblable à un échantillon issu d'une distribution uniforme sur  $(0,1)$ . La plupart des générateurs de nombres aléatoires procèdent en se basant sur une valeur initiale  $x_0$ , appelée le germe, puis en calculant selon un processus récursif les valeurs suivantes à l'aide de nombres prédéterminés  $A$ ,  $M$ ,  $B$  comme c'est le cas pour la méthode congruentielle.

Enfin, la simulation Monte Carlo est une technique ou bien une méthode basée sur l'utilisation des nombres aléatoires, pour simuler des variables aléatoires continues.

### V.2.2. Méthode de la transformation inverse :

Sur le théorème qui suit est basée une méthode générale pour la simulation de variables aléatoires continues, appelée méthode de la transformation inverse ou bien simulation Monté Carlo.

#### Théorème :

Soit une variable uniforme  $U$  sur  $(0,1)$  et soit  $F$  une fonction de répartition continue quelconque. La variable aléatoire  $Y$  définie par :

$$Y = F^{-1}(U) \quad (\text{V.6})$$

$F$  est la fonction de répartition ( $F^{-1}(x)$  désigne la valeur  $y$  pour la quelle  $F(y) = x$ )

#### Démonstration :

$$F_Y(\alpha) = P\{Y \leq \alpha\} \quad (\text{V.7})$$

$$F_Y(\alpha) = P\{F^{-1}(U) \leq \alpha\} \quad (\text{V.8})$$

La fonction  $F$  étant monotone, on peut écrire  $F^{-1}(U) \leq \alpha$  équivaut à  $U \leq F(\alpha)$ . Placée dans (8), cette transformation donne :

$$F_Y(\alpha) = P\{U \leq F(\alpha)\} \quad (\text{V.9})$$

$$F_Y(\alpha) = F(\alpha) \quad (\text{V.10})$$

Selon le théorème 10,1, nous pouvant simuler une variable aléatoire  $x$  de fonction de répartition continue  $F$  en produisant un nombre aléatoire  $U$  et en posant :  $x = F^{-1}(U)$

### V.2.3. Loi exponentielle :

Exemple d'une simulation Monté Carlo pour une variable aléatoire exponentielle.

Prenons  $F(x) = 1 - e^{-x}$  alors  $F^{-1}(y)$  est la valeur de  $x$  telle que.

$$1 - e^{-x} = y \quad (\text{V.11})$$

D'où :

$$x = -\text{Ln}(1 - y) \quad (\text{V.12})$$

Si  $U$  est uniforme sur  $(0,1)$  alors la variable :

$$F^{-1}(U) = -\text{Ln}(1 - U) \quad (\text{V.13})$$

Sera de distribution exponentielle d'espérance 1. Comme  $(1-U)$  est également uniforme sur  $(0,1)$ , il reste que  $(-\ln U)$  est de distribution exponentielle d'espérance 1. Plus généralement, comme  $c.x$  est exponentielle d'espérance  $c$ , lorsque  $x$  est exponentielle d'espérance 1, en conclut que  $(-c \ln U)$  suit une loi exponentielle d'espérance  $c$ .

Étant donné que l'espérance pour une loi exponentielle est égale à  $\frac{1}{\lambda}$ , donc pour simuler des variables suivant une loi exponentielle, on utilisera la relation suivante :

$$x = -\frac{1}{\lambda} \text{Ln}(U_i) \quad (\text{V.14})$$

### **V.3. L'inférence bayésienne :**

#### **V.3.1. Théorème de Bayes :**

Le théorème de Bayes est une conséquence simple des axiomes et de la définition des probabilités conditionnelles ; on pourra donc l'utiliser pour évaluer les probabilités subjectives en tenant compte à la fois de l'estimation a priori de ces probabilités, et de sa validation par le retour d'expérience.

#### **V.3.2. La démarche bayésienne :**

Dans la démarche bayésienne, le manque ou même le défaut d'information statistique est compensé par la prise en compte des connaissances initiales qui seront validées ou infirmées par le retour d'expérience.

Enfin, des notions tout à fait subjectives peuvent être introduites dans l'estimation a priori afin de tenir compte de facteurs nouveaux qui peuvent influencer la probabilité d'occurrence future des événements : des modifications sont en effet apportées en permanence sur les matériels pour tenir compte implicitement du retour d'expérience : modification de fonctionnement, de la maintenance ou même de la conception du matériel.

L'avis d'experts sur les conséquences de ces modifications peut être pris en compte dans la démarche bayésienne, donnant ainsi plus de rationalité à la probabilité provisionnelle a posteriori.

### **V.4. Estimation du taux de défaillance « $\lambda$ » :**

#### **V.4.1. Simulation de Monte-Carlo :**

La simulation Monte Carlo est une technique ou bien une méthode basée sur l'utilisation des nombres aléatoires, pour simuler des variables aléatoires continues.

Les temps moyens de bon fonctionnement sont simulés sur la base d'une MTBF, fournie par la base de données internationale, de 840 h.

Par utilisation de simulation de Monte -Carlo on a :

- Génération d'un nombre de variables pseudo aléatoires suivant une loi uniforme entre (0,1) ;
- Simuler des TBF en utilisant la formule suivante :  $TBF = -\frac{1}{\lambda} \text{Ln}(U_i)$

Le schéma suivant montre les étapes de la simulation de Monte-Carlo :

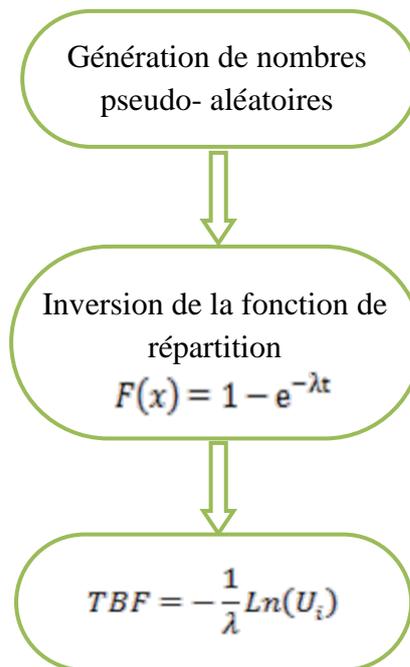


Figure V.1.Simulation Monte-Carlo

L'estimation des paramètres de fiabilité de chaque TC est basée sur un amalgame de l'échantillon simulé par la simulation de Monte-Carlo et l'échantillon de chaque TC.

#### V.4.2. Distribution a priori :

La distribution a priori dans l'inférence bayésienne est très informative lorsque la valeur de MTBF est fournie par la base de données internationale. Dans une démarche bayésienne pour évaluer la probabilité de défaillance au moment du fonctionnement des matériels, les données de la base sont modélisées par une loi gamma.

La densité de la probabilité de la loi gamma à deux paramètres ( $a, p$ ) est :

$$\begin{cases} \frac{a^p}{\Gamma(p)} x^{p-1} e^{-ax} & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x \leq 0 \end{cases} \quad (\text{V.15})$$

$\Gamma(P)$  : fonction gamma de paramètre  $P$  :

$$\Gamma(P) = \int_0^{+\infty} x^{p-1} e^{-x} dx \quad (\text{V.16})$$

Si l'on admet que la distribution des temps de défaillance suit une loi exponentielle. Le choix d'une distribution a priori gamma est justifié par la grande diversité de ses représentations. Ainsi, la loi exponentielle représente un cas particulier de la famille des lois gamma.

Cette méthode peut être appliquée aux jugements d'experts et aux banques de données en considérant plusieurs époques successives dans la collecte d'informations.

Elle permet ainsi d'utiliser l'évaluation bayésienne des paramètres de fiabilité de façon dynamique.

La distribution a priori est on pratique, une distribution gamma de paramètre  $\Gamma(\alpha)$  :

$$f(\lambda, \alpha, \beta) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \beta^\alpha \lambda^{\alpha-1} \exp(-\lambda\beta) \quad (\text{V.17})$$

Qui a pour espérance:  $s = E[f(\lambda, \alpha, \beta)] = \frac{\alpha}{\beta}$

Et pour variance :  $\sigma^2 = \frac{\alpha}{\beta^2}$

$\alpha$  : paramètre d'échelle ;  $\beta$  : paramètre de forme.

Il suffit de résoudre ce système de deux équations à deux inconnues pour déterminer les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  en fonction de  $s$  et  $\sigma^2$ .

On en déduit :

$$\alpha = \frac{s^2}{\sigma^2} ; \quad \beta = \frac{s}{\sigma^2}$$

#### V.4.3. Distribution a posteriori :

Dans ces conditions, la distribution a posteriori de  $\lambda$  s'exprime:

$$g(\lambda/k, \alpha, \beta) = \frac{1}{\Gamma(k+\alpha)} (t + \beta)^{(k+\alpha)} \lambda^{k+\alpha-1} \exp[-(t + \beta)\lambda] \quad (\text{V.18})$$

Qui n'est autre qu'une loi gamma de paramètres  $(k+\alpha)$  et  $(t+\beta)$ .

Qui a pour espérance :

$$\hat{s} = E[g(\lambda/k, \alpha, \beta)] = \frac{k + \alpha}{t + \beta}$$

t : est le temps cumulé de bon fonctionnement de k défaillances observées.

Le schéma suivant résume les étapes nécessaires pour la technique de l'estimation du taux de défaillance par inférence bayésienne :

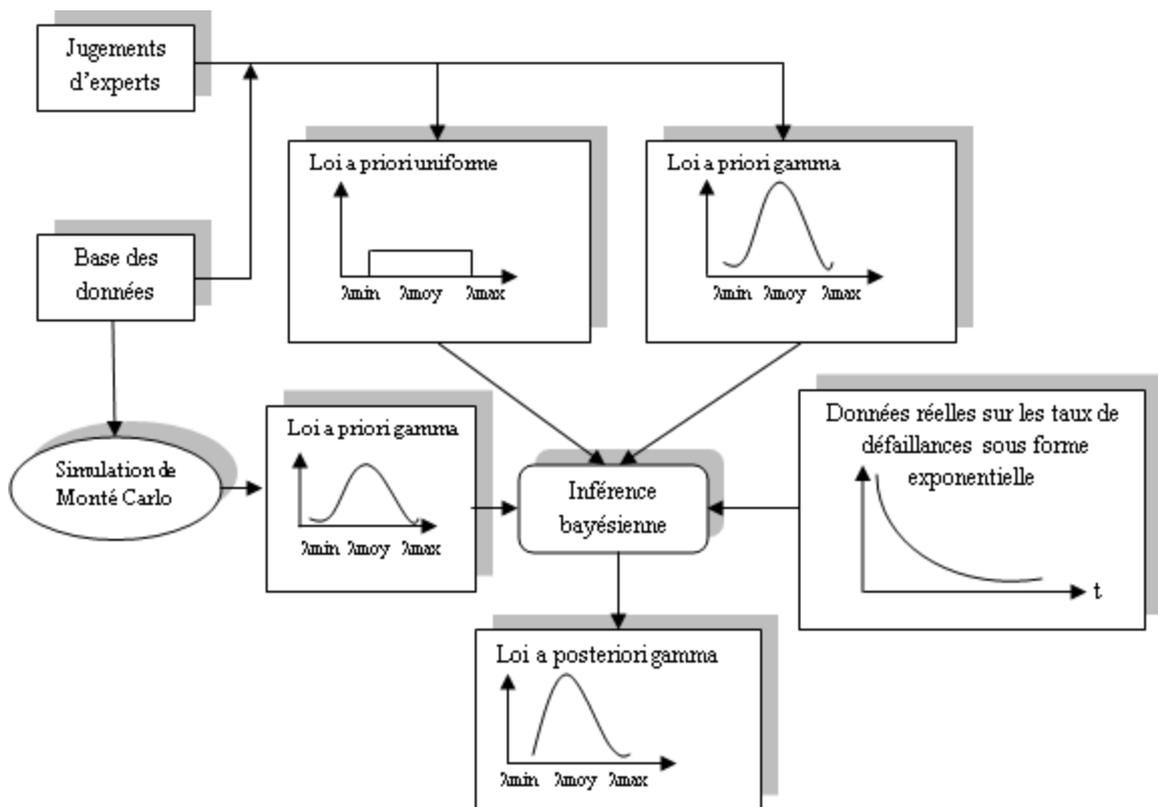


Figure V.2.Principe de l'estimation bayésienne des indices de fiabilité

## V.5. Estimation du taux de réparation « $\mu$ » :

Pour l'estimation du taux de réparation on adoptera la même approche que par l'estimation du taux de panne :

### V.5.1. Simulation de Monte-Carlo :

Les temps moyens de réparation sont simulés sur la base d'une MTTR fournie par la base de données internationale de 10 h.

Par utilisation de simulation de Monte -Carlo on a :

- Génération d'un nombre de variables pseudo aléatoires suivant une loi uniforme entre (0,1)
- Simuler des TTR en utilisant la formule suivante :  $TTR = -\frac{1}{\mu} \text{Ln}(U_i)$

### V.5.2. Distribution a priori :

Densité de probabilité :  $f(\mu, \alpha, \beta) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \beta^\alpha \mu^{\alpha-1} \exp(-\mu\beta)$

Paramètre d'échelle :  $\alpha = \frac{s^2}{\sigma^2}$

Paramètre de forme :  $\beta = \frac{s}{\sigma^2}$

### V.5.3. Distribution a posteriori :

Densité de probabilité :  $f(\mu, \alpha, \beta) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \beta^\alpha \mu^{\alpha-1} \exp(-\mu\beta)$

D'une espérance :  $\hat{s} = E[g(\mu/k, \alpha, \beta)] = \frac{k+\alpha}{t+\beta}$

### V.6. Application numérique :

Dans notre étude le retour d'expérience enregistré sur les turbocompresseurs est celui de 04 turbocompresseurs de la station de **Ain Nagaa** du gazoduc **Enrico Mattei** reliant **Hassi R'mel** à **l'Italie** via la frontière tunisienne. Les historiques de panne correspondant à ces machines sont mentionnées dans les tableaux suivants, il y a lieu de remarquer que dans ce cas, les machines sont identiques et fonctionnent dans un environnement commun.

N° de panne	Cumul de Marche	TBF en h	Durée de Panne	Durée de Réparation
1	47.2	47,2	3	3
2	114.42	67,2	28	28
3	228.9	114,5	400	36
4	265	36,1	6	4
5	292	27	480	23
6	292.2	0,2	620	3000
7	1095.3	803,1	35.5	35.5
8	2395.8	1300,5	105.69	95
9	3362.9	967,1	8650.8	43
10	4837.2	1474,3	63	48

Tableau V.1.Données du turbocompresseur 1

N° de panne	Cumul de marche	TBF en h	Durée de Panne	Durée de Réparation
1	62.4	62,4	2	0.5
2	468.4	406	36	12.2
3	560.9	92,5	328	0.5
4	1932	1371,1	13.5	11.5
5	3033.5	1101,5	6400	60
6	3598.2	564,7	207.30	207.3
7	3604.6	6,4	39	39
8	6373.6	2769	31	20
9	6849.7	476,1	480	480
10	6850	0,3	3700	3700

Tableau V.2.Données du turbocompresseur 2

N° de panne	Cumul de Marche	TBF en h	Durée de Panne	Durée de réparation
1	283	283	52	23
2	835	552	48	48
3	952,7	117,7	11,6	11,6
4	1000,5	47,8	72	72
5	1183	182,5	624	12
6	2766,5	1583,7	96	8
7	6005,2	3238,7	3	3
8	9406,1	3400,9	12,1	12,1

Tableau V.3.Données du turbocompresseur 3

N° de panne	Cumul de Marche	TBF en h	Durée de Panne	Durée de réparation
1	104,47	104,47	4	4
2	257,36	152,89	20	8
3	343,5	86,14	488	72
4	408,8	65,3	192	36
5	2132,3	1723,5	15	15
6	2133,3	1	28,6	28,6
7	5124,6	2991,3	16	8
8	5160,2	35,6	235	67
9	7373,8	2213,6	2098	2098
10	7424	50,2	264	264

Tableau V.4.Données du turbocompresseur 4

### V.5.4. Estimation du taux de défaillance « $\lambda$ » :

#### Simulation de Monte-Carlo :

Exemple 6 échantillons de 6 valeurs parmi les (50×50) simulées est représenté dans le tableau suivant :

Nombre de variable Nombre d'échantillon	A	B	C	D	E	F
1	0,26453444	0,73897519	0,61497848	0,67055269	0,20838038	0,71510971
2	0,11154515	0,41132847	0,72417371	0,66432691	0,16238899	0,34879604
3	0,44254891	0,99456771	0,08282723	0,75246437	0,93789483	0,30631428
4	0,0225837	0,2158269	0,50440992	0,32236702	0,45179601	0,91091647
5	0,62016663	0,71868038	0,7744377	0,18152409	0,85201575	0,82116153
6	0,79583117	0,32520524	0,97717215	0,23795282	0,49482711	0,03946043

Tableau V.5 .Exemple de la génération de nombre pseudo-aléatoire

	A	B	C	D	E	F
1	1117,01842	254,092384	408,381117	335,708517	1317,44769	281,668214
2	1842,39369	746,225075	271,088145	343,543964	1526,91895	884,745058
3	684,771611	4,57556673	2092,43861	238,897372	53,8586617	993,840663
4	3184,04268	1287,95401	574,867439	950,934249	667,400577	78,3754234
5	401,324345	277,484386	214,719175	1433,34818	134,526226	165,509766
6	191,829298	943,57099	19,3976452	1205,97361	590,97935	2715,26372

Tableau V.6. Exemple de TBF générer

Exemple d'application :

- La valeur pseudo-aléatoire  $U_{A1} = 0,26453444$
- Les TBF sont simulés suivant une loi exponentielle de moyenne  $MTBF = \frac{1}{\lambda} = 840h$  (selon la base des données internationale)
- $TBF_{A1} = -\frac{1}{\lambda} \text{LN}(U_{A1}) = -840 \text{LN}(0,26453444) = 1117,01842\text{heures.}$
- $MTBF_A = \sum_{i=1}^{50} TBF_i / 50 = \frac{TBF_{A1} + TBF_{A2} + \dots + TBF_{A50}}{50} = 791,363686 \text{ heures}$
- $\lambda_A = \frac{1}{MTBF_A} = 0,00126364 \text{ heures}^{-1}$

D'après les 50 valeurs du taux de défaillance  $\lambda$ , on peut déduire l'espérance et l'écart type.

Tel que, la moyenne de taux de défaillance représente l'espérance S.

En vertu de la loi des grands nombres, pour que l'approximation soit plus précise, il est nécessaire de tirer un plus grand nombre de variable et d'échantillons générés.

### Distribution a priori de $\lambda$ :

C'est une loi gamma d'espérance et d'écart type :

$$\text{Moyenne :} \quad S = 0,00123661$$

$$\text{Ecart type :} \quad \sigma = 0,00019575$$

Détermination des paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  :

$$\alpha = \frac{s^2}{\sigma^2} = \left( \frac{0,00123661}{0,00019575} \right)^2 \quad \alpha = 38,7611995$$

$$\beta = \frac{s}{\sigma^2} = \frac{0,00123661}{0,00019575^2} \quad \beta = 31805,105$$

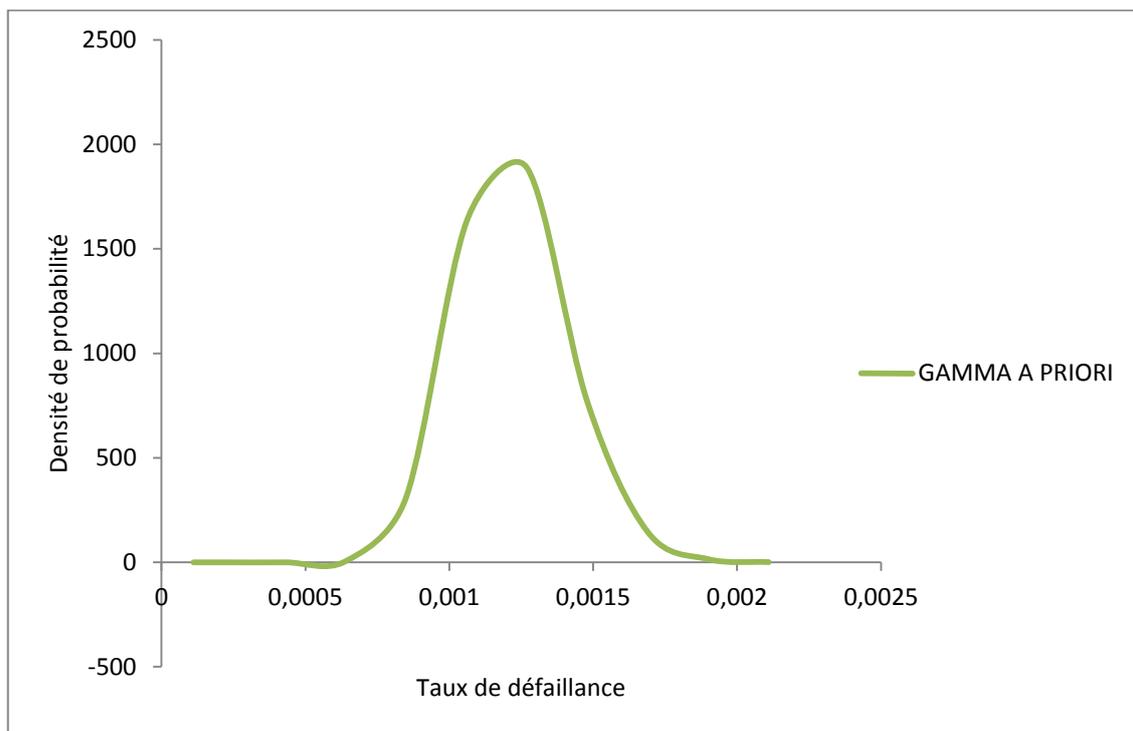


Figure V.3. Distribution a priori gamma de  $\lambda$

**Distribution a posteriori de  $\lambda$  :**

Le retour d'expériences indiquant les temps de bon fonctionnement pour les 4 TC est représenté sur les tableaux suivants :

TC : 1	
N° de panne	TBF (h)
1	47,2
2	67,2
3	114,5
4	36,1
5	27
6	0,2
7	803,1
8	1300,5
9	967,1
10	1474,3

TC : 2	
N° de panne	TBF (h)
1	62,4
2	406
3	92,5
4	1371,1
5	1101,5
6	564,7
7	6,4
8	2769
9	476,1
10	0,3

TC : 3	
N° de panne	TBF (h)
1	283
2	552
3	117,7
4	47,8
5	182,5
6	1583,7
7	3238,7
8	3400,9

TC : 4	
N° de panne	TBF (h)
1	104,47
2	152,89
3	86,14
4	65,3
5	1723,5
6	1
7	2991,3
8	35,6
9	2213,6
10	50,2

**Pour TC1 :**

Nombre de pannes  $k = 9$  ; le temps de marche cumulé  $t = 4837$  h

On déduit la distribution a postérieure gamma du taux de défaillance :

Paramètre d'échelle :  $k + \alpha = 9 + 38,7611995 = 47,7611995$

Paramètre de forme :  $t + \beta = 4837 + 31805,105 = 36642,105$

L'espérance correspond à l'estimateur bayésien a postérieur de  $\lambda$  :

$$\hat{s} = E[g(\lambda/k, \alpha, \beta)] = \frac{k + \alpha}{t + \beta} = \frac{9 + 38,7611995}{4837 + 31805,105} = 0,00130345 \text{ h}^{-1}$$

$$\hat{\lambda}_1 = 0,00130345 \text{ h}^{-1}$$

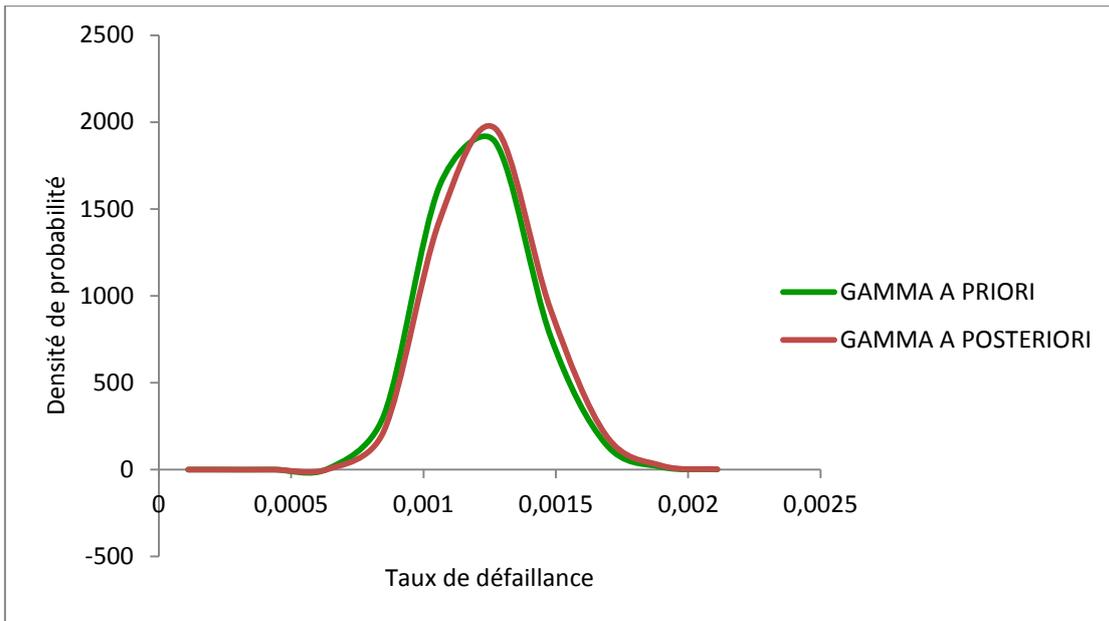


Figure V.4. Distribution a posteriori gamma de  $\lambda_1$

**Pour TC2 :**

$K= 8$  ;  $t = 6843,3$  h

$$\hat{S} = \frac{k+\alpha}{t+\beta} = \frac{8 + 38,7611995}{6843,3 + 31805,105} = 0,00120983 h^{-1}$$

$$\hat{\lambda}_2 = 0,00120983 h^{-1}$$

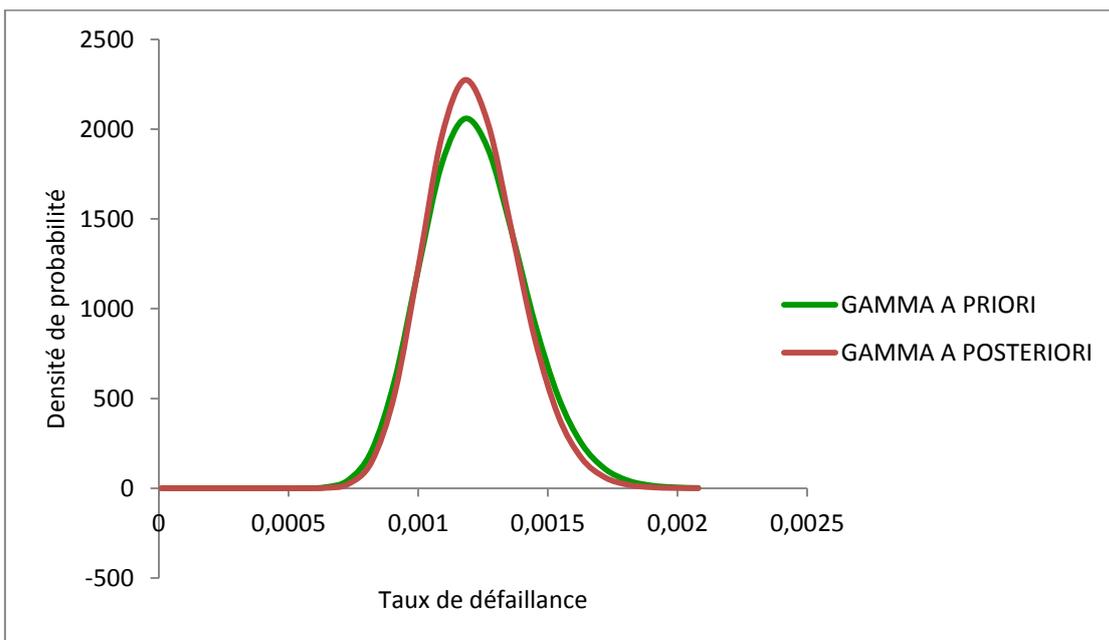


Figure V.5. Distribution a posteriori gamma de  $\lambda_2$

**Pour TC3 :**

$$K = 8 \quad ; \quad t = 9406,3 \text{ h}$$

$$\hat{S} = \frac{k+\alpha}{t+\beta} = \frac{8 + 38,7611995}{9406,3 + 31805,105} = 0,00114947 \text{ h}^{-1}$$

$$\hat{\lambda}_3 = 0,0011347 \text{ h}^{-1}$$

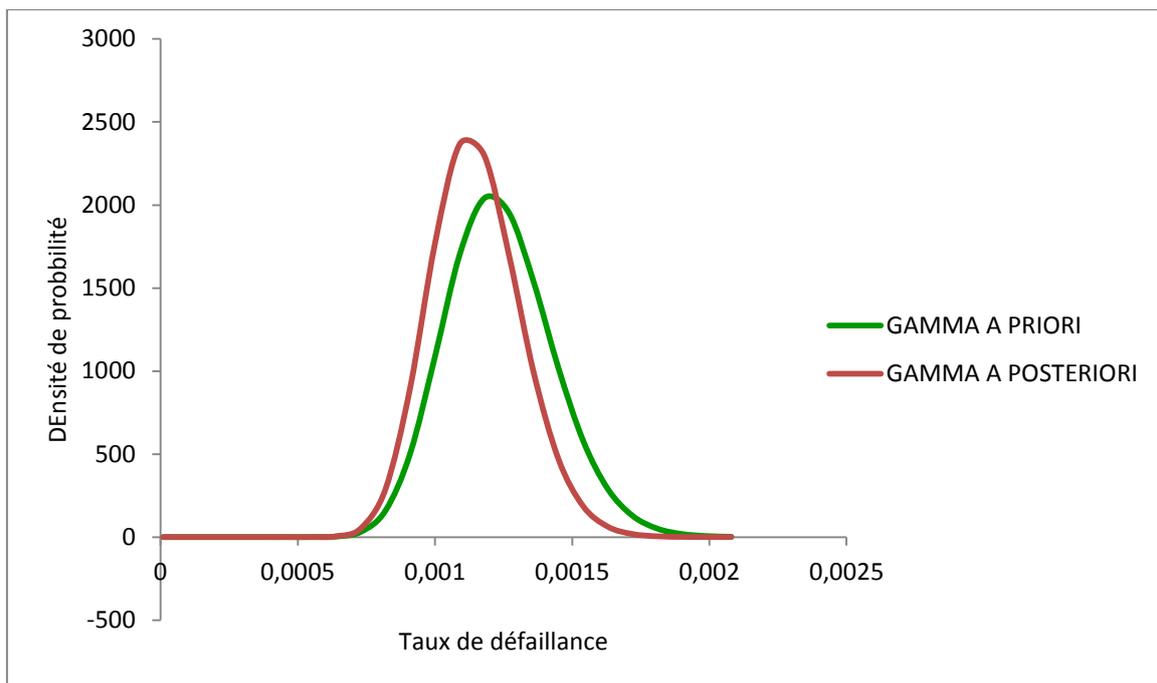


Figure V.6. Distribution a posteriori gamma de  $\lambda_3$

**Pour TC4 :**

$$K = 8 \quad ; \quad t = 7372,8 \text{ h}$$

$$\hat{S} = \frac{k+\alpha}{t+\beta} = \frac{8 + 38,7611995}{7372,8 + 31805,105} = 0,00120843 \text{ h}^{-1}$$

$$\hat{\lambda}_4 = 0,00120843 \text{ h}^{-1}$$

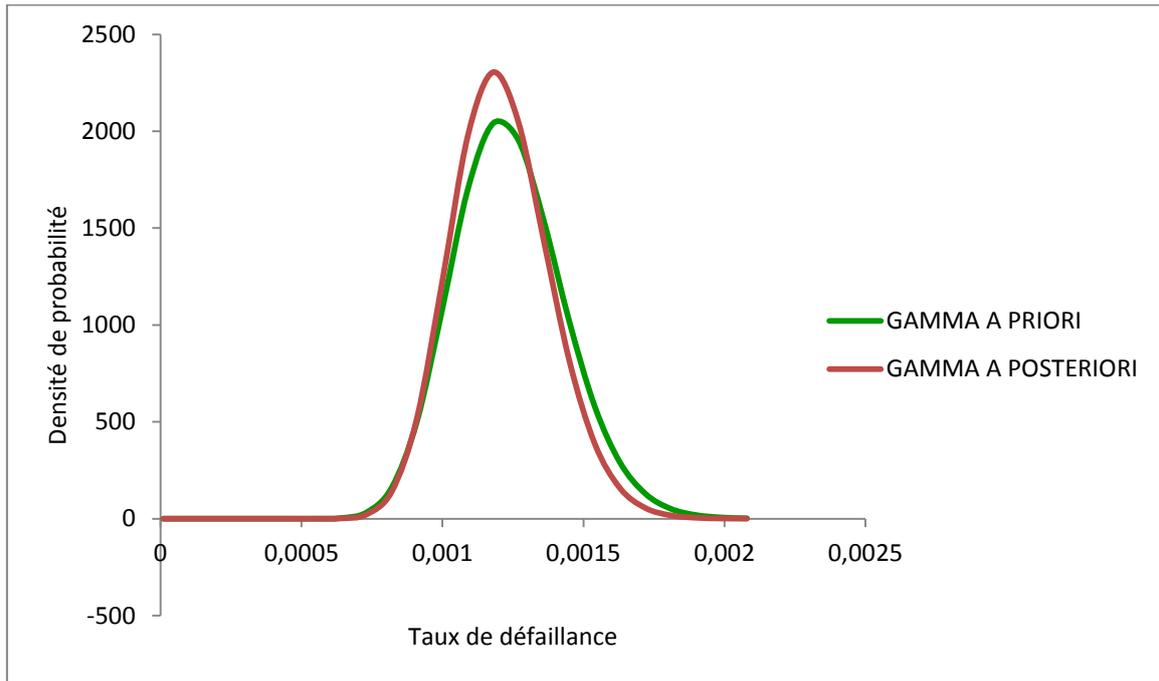


Figure V.7. Distribution a posteriori gamma de  $\lambda_4$

**V.5.5. Estimation du taux de réparation «  $\mu$  » :**

**Simulation de Monte-Carlo :**

Exemple de 6 échantillons et 6 valeurs parmi les 50 simulées de chacune est représenté dans le tableau suivant

Nombre de variable Nombre d'échantillon	A	B	C	D	E	F
1	0,73241371	0,66649373	0,00317392	0,50141911	0,2059389	0,82219916
2	0,52775658	0,06982635	0,00396741	0,12924589	0,64357433	0,91015351
3	0,62828455	0,10251167	0,0524308	0,09610279	0,75118259	0,52882473
4	0,14651936	0,75032807	0,28385266	0,53071688	0,10077212	0,39951781
5	0,45866268	0,2903531	0,21189001	0,16953032	0,71330912	0,58140812
6	0,37952818	0,64543596	0,02887051	0,36582537	0,30082095	0,93514817

Tableau V.7 .Exemple de la génération de nombre pseudo-aléatoire

	A	B	C	D	E	F
1	3,11409749	4,05724549	57,5278629	6,90312979	15,8017575	1,95772622
2	6,39120116	26,6174384	55,2964274	20,4603858	4,40717753	0,94142003
3	4,64762103	22,777786	29,4826109	23,4233697	2,86106525	6,37098221
4	19,2059768	2,87244736	12,5929999	6,33526583	22,9489357	9,1749694
5	7,79440243	12,3665751	15,5168795	17,7472349	3,37840401	5,42302318
6	9,68826419	4,37829288	35,4493462	10,0559918	12,0124005	0,67050294

Tableau V.8. Exemple de TTR générer

Exemple d'application :

- La valeur pseudo-aléatoire  $U_{A1} = 0,73241371$
- Les TTR sont simulés suivant une loi exponentielle de moyenne  $MTTR = \frac{1}{\mu} = 10 \text{ h}$   
(selon la base des données internationale)
- $TTR_{A1} = -\frac{1}{\lambda} \text{LN}(U_{A1}) = -10 \text{LN}(0,73241371) = 3,11409749 \text{ heures.}$
- $MTTR_A = \sum_{i=1}^{50} TTR_i / 50 = \frac{TTR_{A1} + TTR_{A2} + \dots + TTR_{A50}}{50} = 8,44336154 \text{ heures}$
- $\mu_A = \frac{1}{MTTR_A} = 0,11843624 \text{ heures}^{-1}$

D'après les 50 valeurs du taux de défaillance  $\mu$ , on peut déduire l'espérance et l'écart type.

Tel que, la moyenne de taux de réparation représente l'espérance S.

**Distribution a priori de  $\mu$  :**

Moyenne :  $S = 0,10154211$

Ecart type :  $\sigma = 0,01401912$

Détermination des paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  :

$$\alpha = \frac{s^2}{\sigma^2} = \left( \frac{0,10154211}{0,01401912} \right)^2 \quad \alpha = 52,4627269$$

$$\beta = \frac{s}{\sigma^2} = \frac{0,10154211}{0,01401912^2} \quad \beta = 516,659807$$

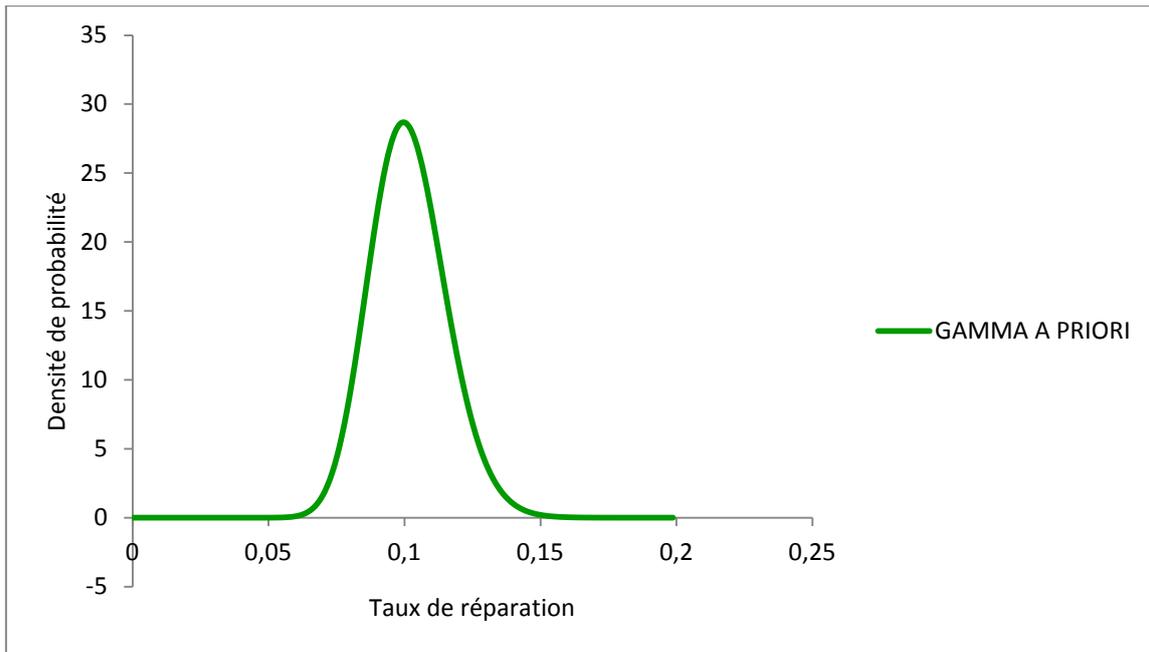


Figure V.8. Distribution a priori gamma de  $\mu$

**Distribution a posteriori de  $\mu$  :**

Le retour d'expériences indiquant les temps de réparation pour les 4 TC est représenté sur les tableaux suivants :

TC : 1	
N° de panne	Durée de réparation
1	3
2	28
3	36
4	4
5	23
6	3000
7	35.5
8	95
9	43
10	48

TC : 2	
N° de Panne	Durée de réparation
1	0.5
2	12.2
3	0.5
4	11.5
5	60
6	207.3
7	39
8	20
9	480
10	3700

TC : 3	
N° de Panne	Durée de réparation
1	23
2	48
3	11,6
4	72
5	12
6	8
7	3
8	12,1

TC : 4	
N° de panne	Durée de réparation
1	4
2	8
3	72
4	36
5	15
6	28,6
7	8
8	67
9	2098
10	264

**Pour TC1 :**

Nombre de réparations :  $k = 9$  ; le temps de réparation cumulé :  $t = 315,5$  h

On déduit la distribution a postériori gamma du taux de réparation :

Paramètre d'échelle :  $k+\alpha = 9+ 52,4627269 = 61,4627269$

Paramètre de forme :  $t+\beta = 315,5 + 516,659807= 832,159807$

L'espérance correspond à l'estimateur bayésien a postériori de  $\mu$  :

$$\hat{S} = E[g(\mu/k, \alpha, \beta)] = \frac{k+\alpha}{t+\beta} = \frac{9+ 52,4627269}{315,5 + 516,659807} = 0,07385928h^{-1}$$

$$\hat{\mu}_1 = 0,07385928 h^{-1}$$

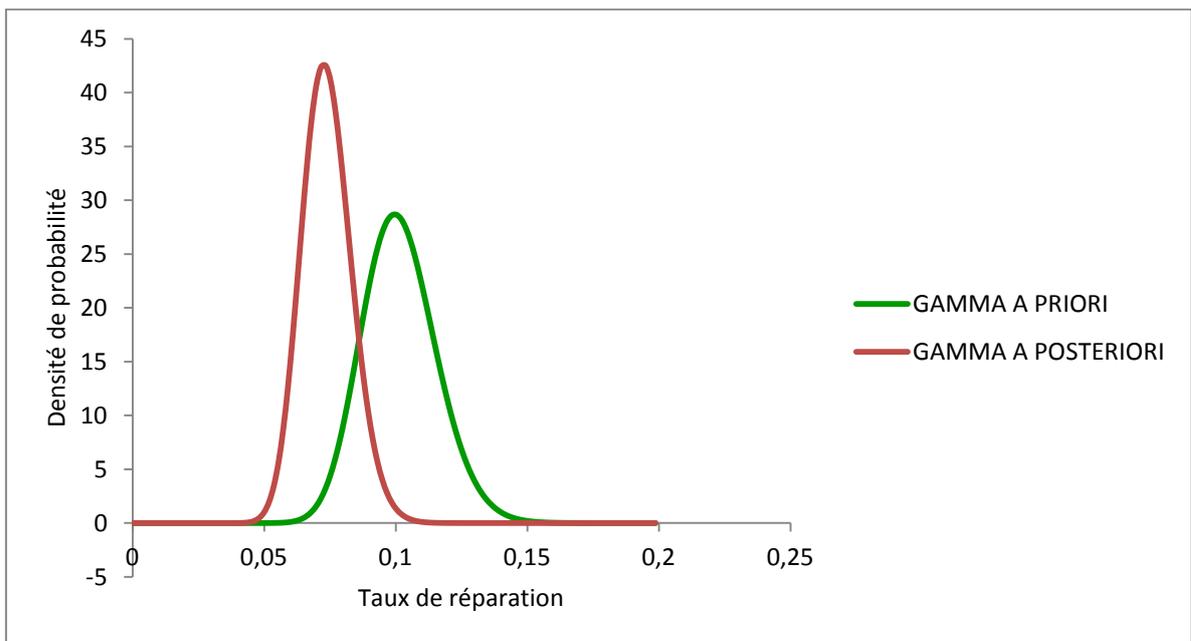


Figure V.9. Distribution a postériori gamma de  $\mu_1$

**Pour TC2 :**

$K=9$  ;  $t = 831$  h

$$\hat{S} = \frac{k+\alpha}{t+\beta} = \frac{9+ 52,4627269}{831 + 516,659807} = 0,045607h^{-1}$$

$$\hat{\mu}_2 = 0,045607h^{-1}$$

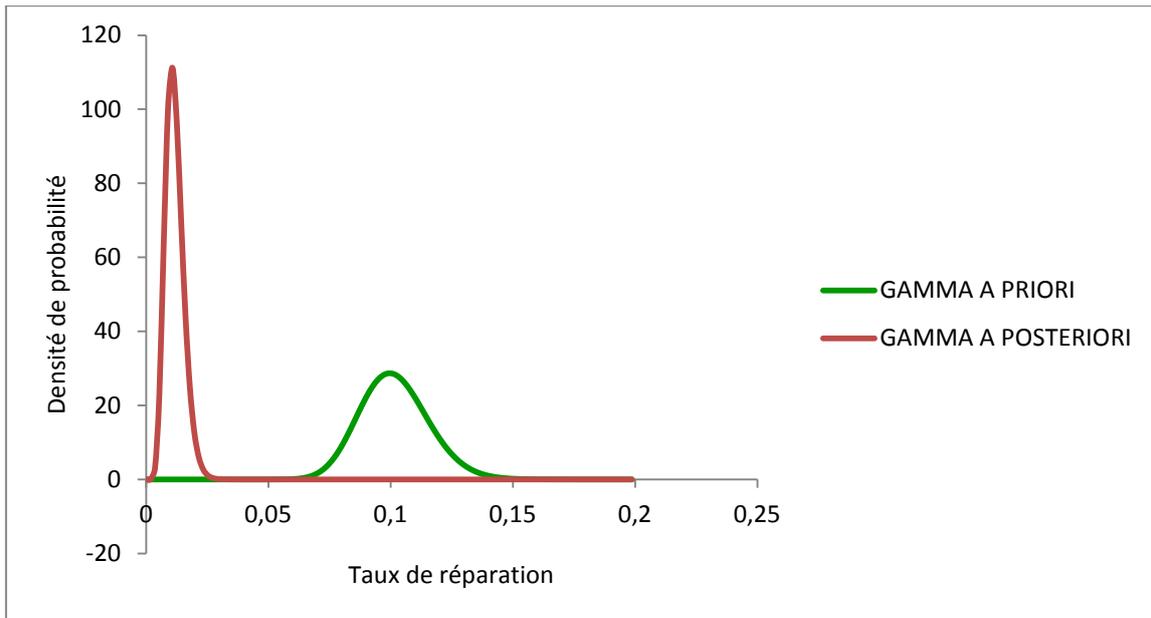


Figure V.10. Distribution a posteriori gamma de  $\mu_2$

**Pour TC3 :**

$K = 8$  ;  $t = 189,7$  h

$$\hat{S} = \frac{k+\alpha}{t+\beta} = \frac{8 + 52,4627269}{189,7 + 516,659807} = 0,08559763h^{-1}$$

$$\hat{\mu}_3 = 0,08559763 h^{-1}$$

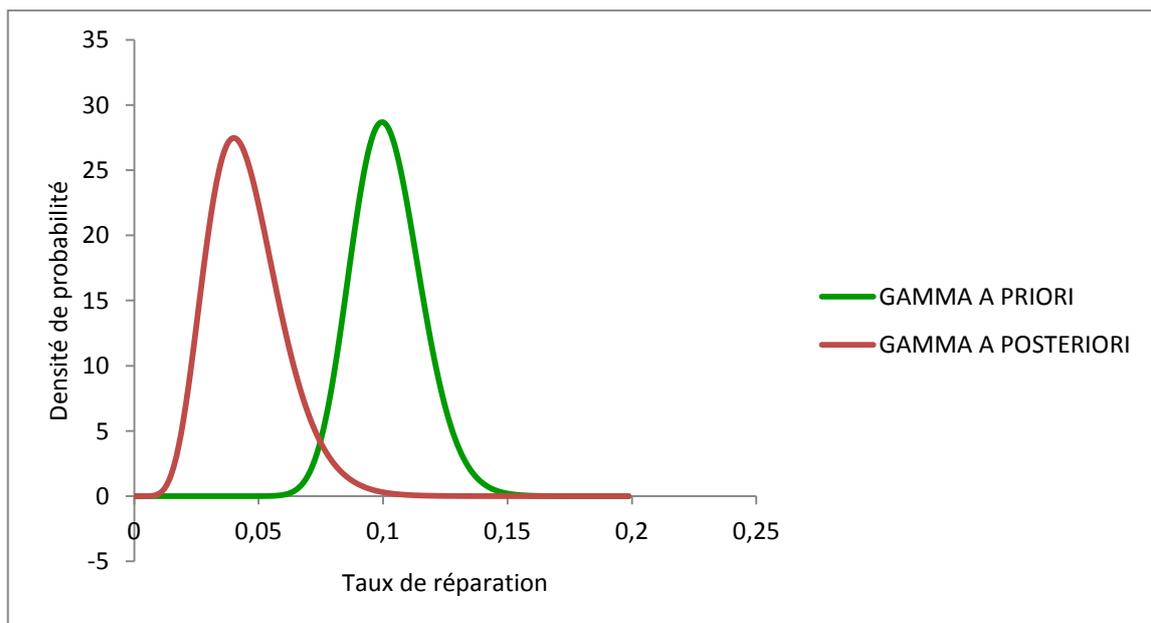


Figure V.11. Distribution a posteriori gamma de  $\mu_3$

Pour TC4 :

$$K = 9 \quad ; \quad t = 502,6 \text{ h}$$

$$\hat{S} = \frac{k+\alpha}{t+\beta} = \frac{9+52,4627269}{502,6+516,659807} = 0,06030133 \text{ h}^{-1}$$

$$\hat{\mu}_4 = 0,06030133 \text{ h}^{-1}$$

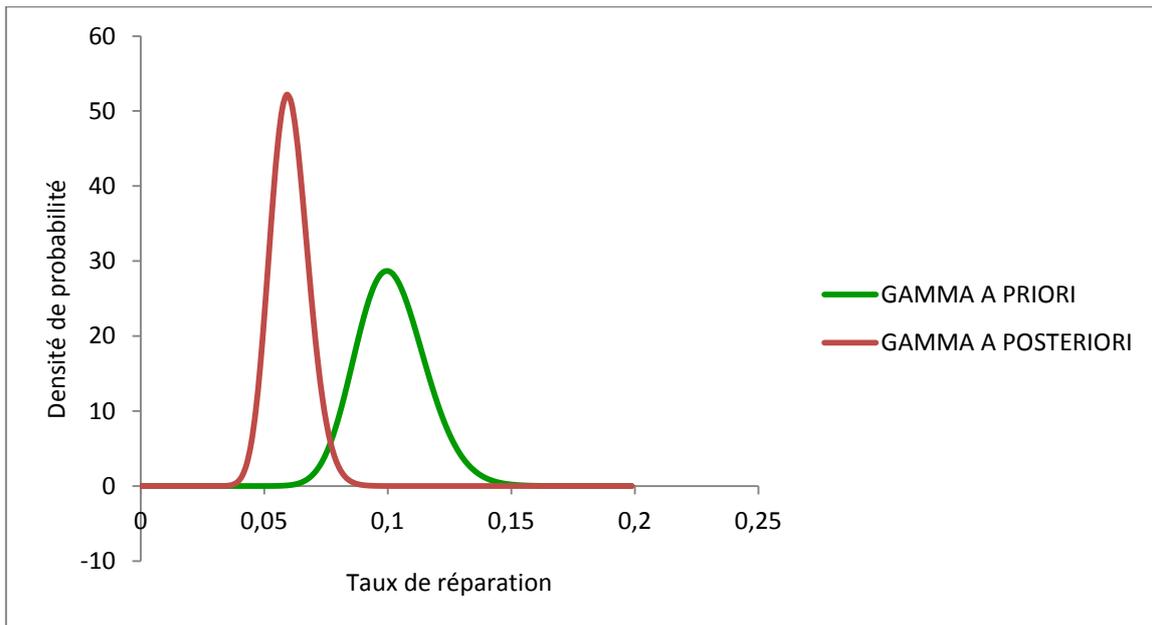


Figure V.12. Distribution a posteriori gamma de  $\mu_4$

## Conclusion

Généralement l'approche fréquentiste ne permet pas une bonne estimation en raison de la faiblesse des données.

Pour contourner ce problème de manque de données, l'alternative adoptée est l'enrichissement de l'information disponible sur chaque machine par une information issue de bases de données et de jugement d'experts en usant des techniques d'inférence bayésienne. Cette approche permet d'améliorer la qualité de l'estimation.

L'usage des techniques bayésiennes n'a de sens que pour de faible retour d'expérience. Il sera possible de s'affranchir de ces techniques pour passer vers une estimation fréquentiste classique dès l'atteinte d'un niveau d'information acceptable.

# Chapitre VI

Estimation des indices de fiabilité d'un pipe-line

« Car il est facile, une fois qu'on acquiert une certaine connaissance des questions d'en imaginer, ensuite, la démonstration que si l'on cherchait sans aucune préalable »

**-Archimède de Syracuse -**

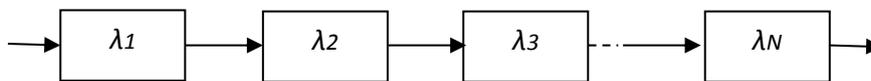
## Introduction :

La majorité des canalisations de transport des hydrocarbures dans le monde ont aujourd'hui plusieurs années de service. Ces derniers ne peuvent pas être remplacés dans leur totalité, par conséquent la réparation ou la réhabilitation de ces pipelines constituent donc une solution préconisée, qui consiste à effectuer un contrôle d'intégrité détaillé via un programme d'inspection en ligne par outil intelligent, dans le but d'obtenir les données nécessaires à l'évaluation de l'état de la ligne. [5]

Les principales données de base de l'étude FMD d'une canalisation sont représentées par les indices de fiabilité qui sont le taux de défaillance qui peut être conclu à partir des historiques de panne et le taux de réparation correspond non seulement du durée de réparation mais ainsi la durée logistique qui englobe le temps de remplissage, vidange, purge ...etc.

### VI.1. Fiabilité du gazoduc GK1 :

Le projet se caractérise par une succession de tronçons formant la canalisation GK1. Le gazoduc est considéré, d'un point de vue fiabilité, comme un « système série » simple dont les éléments sont la succession des N tronçons qui le compose.



La fonction de fiabilité est une fonction du temps et dépend uniquement du taux de défaillance global de la canalisation  $\lambda_c$ .

$$R(t) = e^{-\lambda_c * t} \quad (\text{VI. 1})$$

#### VI.1.1. Le taux de défaillance :

En raison de la structure en série du gazoduc, le taux de défaillance global est calculé comme la somme des taux de défaillance des composants (des tronçons) :

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^N \lambda_i = \lambda L \quad (\text{VI. 2})$$

Où :

$\lambda_c$  : Taux de défaillance global du gazoduc [heures<sup>-1</sup>];

$\lambda_i$  : Taux de défaillance du tronçon  $i$  du gazoduc [heures \* Km]<sup>-1</sup>;

$\lambda$  : Taux de défaillance générique global du gazoduc [ $\text{heures} \cdot \text{Km}$ ]<sup>-1</sup>;

N : Nombre de tronçons;

L : Longueur du gazoduc [km].

Le taux de défaillance d'un gazoduc en projet tel que le GK1 ne peut évidemment pas être connu à l'avance. Il peut être estimé par analogie avec des ouvrages similaires ou, le plus souvent, tiré des bases de données reconnues.

#### VI.1.1.1. Correction du taux de défaillances :

Les données issues de différentes bases de données montrent des écarts importants quant à l'estimation des fréquences de défaillance des pipelines. Ainsi, CONCAWE propose une valeur de  $4.2 \times 10^{-4} / \text{km.an}$ , The European Gas Pipeline Incident Report donne une moyenne de fréquence de défaillance de  $7.75 \times 10^{-4} / \text{km.an}$ , L'US Gas Transmission Pipeline Data propose une valeur très proche de  $7.4 \times 10^{-4} / \text{km.an}$  et British Gas Pipeline Data suggère une valeur nettement plus basse estimée à  $1.1 \times 10^{-4} / \text{km.an}$ . [6]

##### VI.1.1.1.1. Fréquences génériques de défaillance suivant les causes :

L'EGIG a effectué, en collaboration avec plusieurs exploitants européens, une étude des accidents survenus sur les gazoducs. Différents rapports ont été délivrés permettant la mise en place des banques de données sur les types de défaillances les plus répandus et leurs fréquences d'apparition.

L'élaboration de ce rapport repose sur plusieurs conditions, parmi lesquelles on cite :

- Les canalisations sont en acier ;
- La base de données concerne les gazoducs enfouis ;
- La pression maximale est supérieure à 15 bars.

Une étude sur 130 000 Km de canalisation a fait ressortir que 50 % des accidents sont dus à des travaux de tiers contre 15.4% lié au phénomène de corrosion. Le tableau 1 résume ces accidents en pourcentage d'apparition.

Causes	%
Interférences externes	49,6
Défauts de matériel et de construction	16,5
Corrosion	15,4
Mouvement du terrain	7,3
Erreurs d'exploitation	4,6
Autres causes	6,7

Tableau VI.1.Causes de défaillances de gazoduc en % (source EGIG)

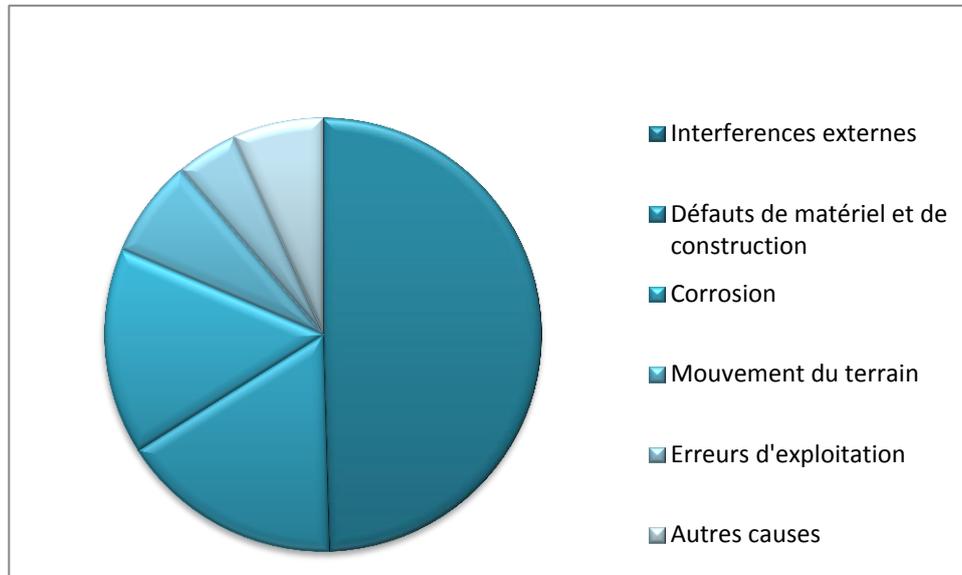


Figure VI.1 .Causes de défaillances de gazoduc en % (source

### VI.1.1.2. Adaptation de données génériques aux particularités de l'ouvrage GK1

Pour le cas d'un gazoduc de grande longueur tel que le GK1, la canalisation représente l'élément prépondérant d'un point de vue risque. Les probabilités de défaillance issues des bases de données représentent une estimation moyenne résultant d'un traitement statistique des historiques d'incidents:

- De canalisations de dimensions variables (diamètres, épaisseurs, etc.) constituées de tubes de nuances d'acier diverses ;
- De canalisations plus ou moins âgées, évoluant dans des environnements différents (Pression, température, agressivité du sol et du produit transporté, type de revêtement, etc.) ;
- De canalisations soumises à des politiques diverses de maintenance (programmes de surveillance de la protection cathodique, raclage périodique, etc.) ;
- De canalisations transportant des hydrocarbures de qualités différentes, ayant des potentiels d'agressivité variables ;

Il en résulte des valeurs ayant des fréquences de dispersions statistiques assez larges et des estimations très variables d'une base de données à une autre. En conséquence, l'usage d'une démarche classique basée sur des données génériques brutes, issues de bases de données et ne tenant pas compte des particularités de chaque ouvrage, peut se traduire par des sous-estimations ou des surestimations importantes des risques.

Dans ce qui suit, on considère que 4 types de causes sont susceptibles de générer l'événement E correspondant à une perte de confinement :

$$E = E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cup E_4$$

- E1 : Dégradation du tube par perte de métal (corrosion interne et externe, érosion);
- E2 : Interférences externes (travaux de tiers à proximité de l'ouvrage);
- E3 : défauts du matériel et vices de construction;
- E4 : Causes diverses.

$$P(E) = P(E_1) + P(E_2) + P(E_3) + P(E_4)$$

- $P(E_1)$  est définie comme le seuil de risque maximum toléré après une inspection par outil intelligent ou par ondes guidées selon DNV RP F101 (10-5 à 10-3 /km/an selon la classification par zone), valeur prise dans l'étude est de  $2 \cdot 10^{-4}$  /km/an.
- $P(E_2)$  à calculer selon règles UKOPA.
- $P(E_3)$  à calculer selon règles UKOPA.
- $P(E_4)$  à estimer (20% de la valeur de  $P(E)$ ).

Le supplément de l'UKOPA introduit des facteurs de réduction (FR) pour tenir compte des particularités relatives aux évolutions technologiques récentes et aux caractéristiques propres de chaque pipeline.

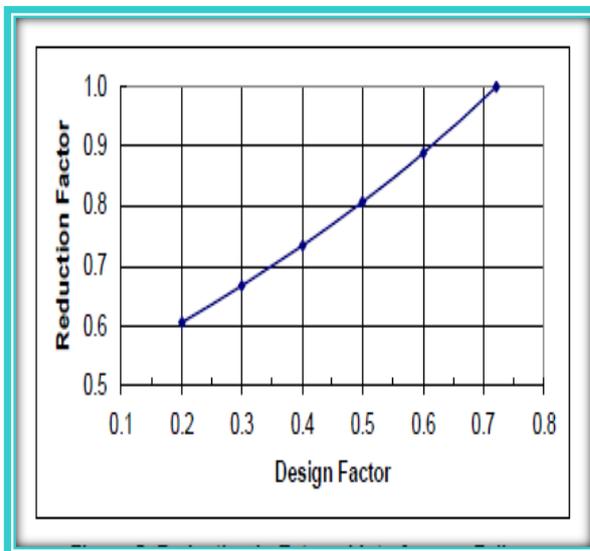


Figure VI.2. Facteur de réduction en fonction du coefficient de sécurité design.

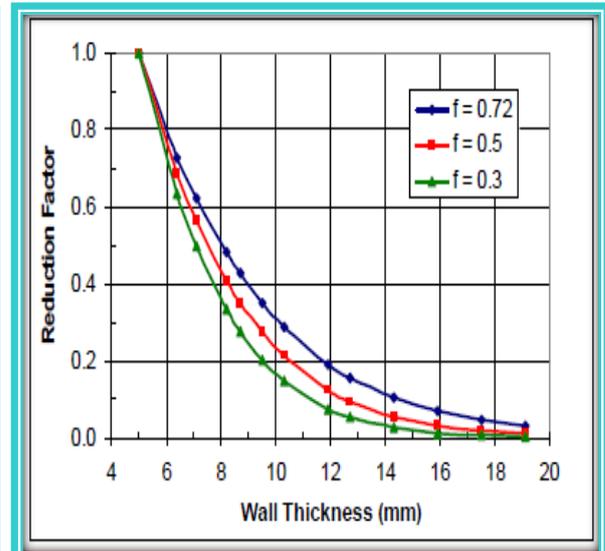


Figure VI.3. Facteur de réduction en fonction de l'épaisseur.

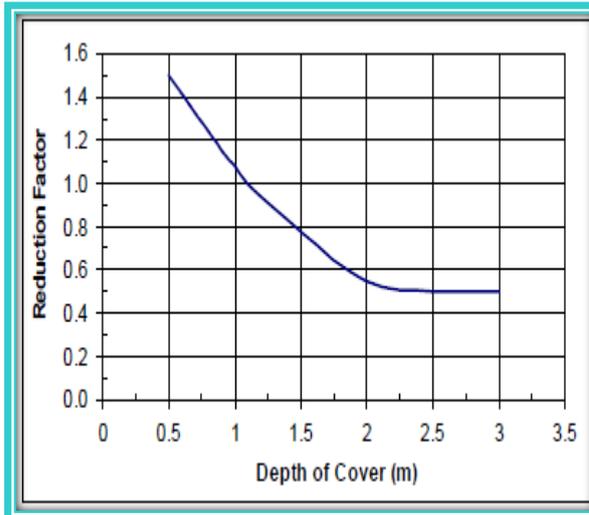


Figure VI.4. Facteur de réduction en fonction de la profondeur d'enfouissement de la canalisation.

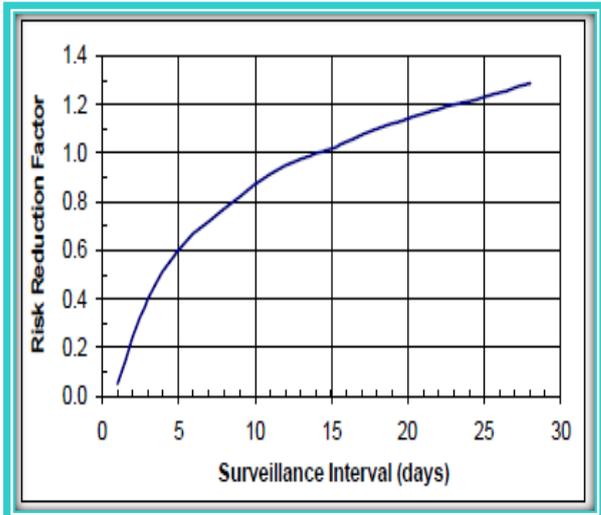


Figure VI.5. Facteur de réduction en fonction de la fréquence de patrouillage.

- Le tracé du gazoduc objet de l'étude se trouve loin de toute zone urbaine ou agricole et dans un corridor sécurisé (patrouilles fréquentes). Sur la base des règles d'adaptation recommandées par l'UKOPA (2008), la probabilité d'un accident consécutif à des travaux de tiers est de l'ordre de  $1,2 \cdot 10^{-5}$  /km.an.
- La probabilité des défaillances dues à des défauts du matériel et à des vices de construction, estimée également sur la base des recommandations de l'UKOPA, est de l'ordre de  $1,5 \cdot 10^{-5}$  /km.an.
- De ce fait, la principale source de défaillance proviendra des altérations susceptibles d'être provoquées par des phénomènes de dégradation dynamique de la canalisation (corrosion, érosion, fissuration) ;
- La canalisation sera soumise, selon les meilleures pratiques de gestion de l'intégrité, à des inspections périodiques par racleurs instrumentés et les résultats d'inspection soumis à une analyse structurale probabiliste. L'analyse structurale probabiliste permet, par modélisation, d'associer à toute état de dégradation constaté après inspection une probabilité de défaillance;
- Sur la base des règles d'adaptation recommandées par l'UKOPA (2008), le seuil limite de défaillance en fonction du diamètre de la canalisation est fixé à  $2,10^{-4}$  /km/an.

En conséquence, sous les hypothèses émises au paragraphe précédent, les probabilités de défaillance qui seront appliquées à ce projet seront de l'ordre  $2,64 \cdot 10^{-4}$  /km.an.

Le tableau 2 donne les taux de défaillances  $\lambda_i$  ramenés à chaque tronçon de canalisation GK1 ainsi que le taux de défaillance global  $\lambda$ .

Tr N°	L km	$\lambda_i$ 1/an.Km	$\lambda_i$ 1/h
1	83,2	0,000264	2,5074E-06
2	96,17	0,000264	2,89827E-06
3	91,41	0,000264	2,75482E-06
4	84,11	0,000264	2,53482E-06
5	75,9	0,000264	2,2874E-06
6	144,08	0,000264	4,34214E-06
<b>Taux de défaillance de canalisation :</b>			1,73248E-05

Tableau VI.2.Le taux de défaillance globale du gazoduc

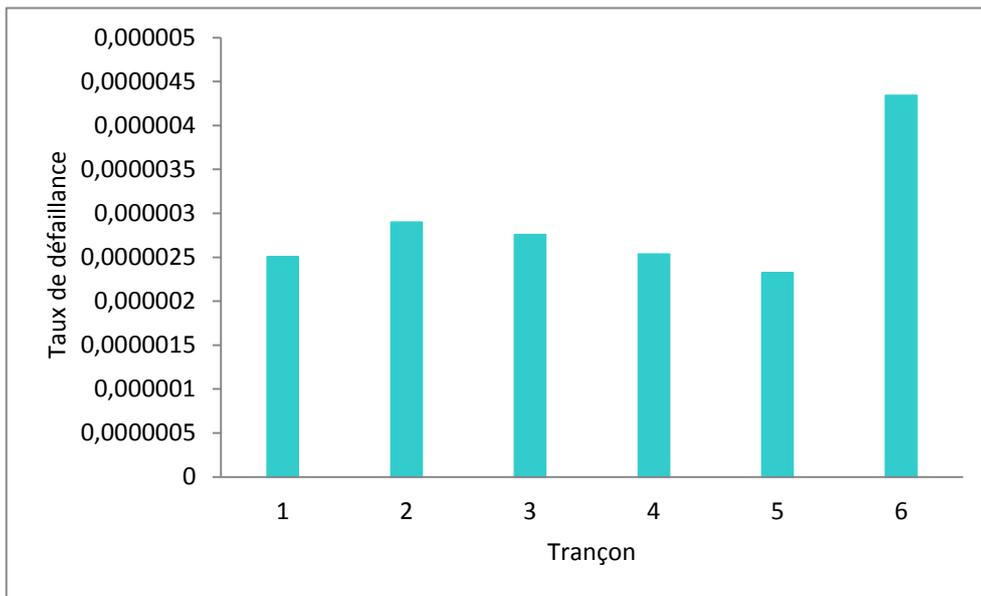
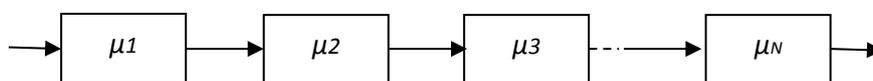


Figure VI.6.Taux de défaillance par trançon du gazoduc GK1

**VI.2. Maintenabilité du gazoduc GK1 :**

La maintenabilité dépend du taux de réparation de l'ouvrage dans sa totalité  $\mu_c$  :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu_c t} \quad (VI.3)$$



Pour un gazoduc composé de N tronçons :

$$\mu_c = \lambda_c \frac{\prod_1^N \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i}}{1 - \prod_1^N \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i}} \quad (\text{VI. 4})$$

### VI.2.1. Taux de réparation :

$$\mu_i = \frac{1}{\text{MTTR}_i} \quad (\text{VI. 5})$$

Où :

$\mu_i$  : Taux de réparation du tronçon i du gazoduc [heures<sup>-1</sup>];

MTTR<sub>i</sub> : Durée moyenne de réparation du tronçon i [heures];

(MTTR: Acronyme de Mean Time To Repair).

En cas de défaillance de la canalisation, la procédure de réparation passe préalablement par la vidange (dépressurisation) du tronçon endommagé. Une fois la réparation effectuée mais avant la mise en gaz (pressurisation), il y a lieu de purger le tronçon de manière à éviter le risque de formation de mélange explosif. La succession des opérations est schématisée par la figure 2.

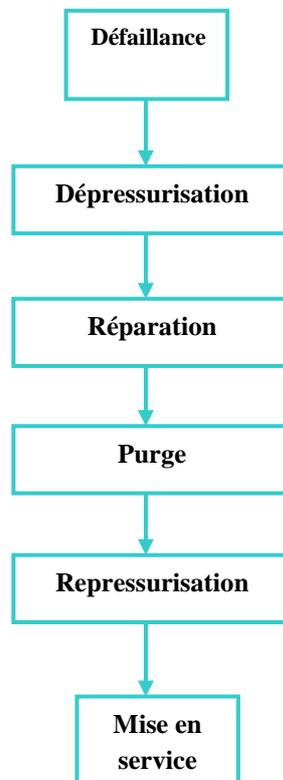


Figure VI.7 .La succession des opérations suite à une défaillance de la canalisation

La durée de réparation effective  $MTTR_i$  est donc la somme de :

- La durée de vidange du tronçon  $T_{v_i}$  du tronçon  $i$  [heures];
- La durée de réparation technique proprement dite  $Tr_i$  [heures];
- La durée de l'opération de purge  $T_{p_i}$  [heures];
- La durée de remplissage  $Tr_{p_i}$  [heures].

$$\mu_i = \frac{1}{T_{v_i} + Tr_i + T_{p_i} + Tr_{p_i}} \quad (\text{VI. 6})$$

### VI.2.1.1. Durée de vidange

La durée de vidange fait partie de la durée d'indisponibilité de l'ouvrage. De ce fait, apparait l'intérêt de la réduire au minimum tout en respectant un niveau de sécurité tolérable.

Pour calculer cette durée, on utilise le modèle de WEISS :

**Durée de vidange totale :**

$$TT = (t_c + 0.7833)t_v C_f \quad (\text{VI. 7})$$

**Durée de vidange adimensionnelle en régime sonique :**

(Dans le circuit de l'événement, principalement en début d'opération, l'écoulement du gaz est le plus souvent de type sonique ce en raison de la différence de pression très élevée à cet instant) :

$$t_c = \ln\left(\frac{p_2}{p_a}\right) - \left(\frac{k}{k-1}\right) * \ln\left(\frac{k+1}{2}\right) \quad (\text{VI. 8})$$

**Durée de vidange adimensionnelle en régime subsonique :** (la pression dans la canalisation diminuant) :

$$tv = V * \frac{\left(\frac{k+1}{2}\right)^{K+\frac{1}{2(K-1)}}}{C * Ath * Cd} \quad (\text{VI. 9})$$

**Facteur de correction :**

$$C_f = a_1 + a_2 \log_{10} \left(\frac{fL}{D}\right) + a_3 \left[\log_{10} \left(\frac{fL}{D}\right)\right]^2 + a_4 \left[\log_{10} \left(\frac{fL}{D}\right)\right]^3 \quad (\text{VI. 10})$$

Avec :

$$a_1 = b_{1.1} + b_{1.2} \left(\frac{1}{A_r}\right) + b_{1.3} \left(\frac{1}{A_r}\right)^2 + b_{1.4} \left(\frac{1}{A_r}\right)^3$$

$$a_2 = b_{2.1} + b_{2.2} \left(\frac{1}{A_r}\right) + b_{2.3} \left(\frac{1}{A_r}\right)^2 + b_{2.4} \left(\frac{1}{A_r}\right)^3$$

$$a_3 = b_{3.1} + b_{3.2} \left(\frac{1}{A_r}\right) + b_{3.3} \left(\frac{1}{A_r}\right)^2 + b_{3.4} \left(\frac{1}{A_r}\right)^3$$

$$a_4 = b_{4.1} + b_{4.2} \left(\frac{1}{A_r}\right) + b_{4.3} \left(\frac{1}{A_r}\right)^2 + b_{4.4} \left(\frac{1}{A_r}\right)^3$$

où

$$A_r = A_p / (A_{th} C_d)$$

et

$b_{1.1} = 1.0319$	$b_{1.2} = -5.2735$	$b_{1.3} = 25.680$	$b_{1.4} = -38.409$
$b_{2.1} = -0.26994$	$b_{2.2} = 17.304$	$b_{2.3} = -86.415$	$b_{2.4} = 144.77$
$b_{3.1} = 0.24175$	$b_{3.2} = -12.637$	$b_{3.3} = 56.772$	$b_{3.4} = -88.351$
$b_{4.1} = -0.054856$	$b_{4.2} = 2.6258$	$b_{4.3} = -8.9593$	$b_{4.4} = 12.139$

Vitesse du son :

$$C = \sqrt{\frac{Z * K * R * T}{MW}} \quad (\text{VI. 11})$$

$P_2$  : Pression initiale dans le tronçon;

$P_a$  : Pression atmosphérique;

$K$  : coefficient isentropique du gaz;

R : Constante des gaz;

V : Volume « eau » du tronçon;

Cd : Coefficient de décharge;

f: Coefficient de friction;

L: Longueur du tronçon;

D: Diamètre du gazoduc;

$A_p$  : Section intérieure du tronçon;

$A_{th}$ : Section d'étranglement (vanne de régulation);

T : température du gaz;

MW; Masse moléculaire du gaz;

Z : Coefficient de compressibilité

Sachant que les poste de sectionnement sont installés tout les 20 km et on considérant la pression de refoulement est 71 bar et la pression d'aspiration est 48 bar , on va calculer la pression  $P_x$  au niveau de chaque PS selon la relation suivante :

$$P_x = \sqrt{P_1^2 - (P_1^2 - P_f^2) \frac{x}{l}} \quad (\text{VI.12})$$

Avec :

$P_x$  : pression d'opération appliquée sur le PS à une distance x.

$P_i$  : pression initiale.

$P_f$  : pression finale.

l : longueur du tronçon du pipe.

On déduit le temps de vidange pour chaque 20 à 15 km, à partir de la pression moyenne  $P_m$  suivant la relation :

$$P_m = \frac{2}{3} \left( P_1 + \frac{P_2^2}{P_1 + P_2} \right) \quad (\text{VI.13})$$

Le temps de vidange du tronçon sera alors la moyenne des temps de vidange pour chaque 20 km, on fait les calculs du  $T_v$  avec la moitié de longueur entre deux postes de sectionnements pour faciliter la tâche.

Tronçon 1 (pour les premiers 20km)	
L en km	10
D en in	40
Dint	39
d event in	8
P en bar	68,6303011
t °c	15
K	1,3
R	8314
% ouverture	50%
Coeff de decharge Cd	0,85
Z	0,8627394
C en m/s	386,3
d orifice vanne mm	330,00
Course en mm	127,00
Ath m <sup>2</sup>	0,0658
V m <sup>3</sup>	7 703,11
K+1	2,30
K-1	0,30
Num-tv	1,51380613
Denum-tv	21,6029337
Tv en sec	540
Tc	3,62
Ts	0,7833
Ap m <sup>2</sup>	0,77031136
1/Ar	0,07
a1	0,76968755
a2	1,12617419
a3	-0,41030501
a4	0,09320828
f*L/D	131,233596
Cf	2,01
T vid en sec	5 018
Tvid en h	1,39

Tableau VI.3. Exemple de calcul de la durée de dépressurisation

Suivant la même démarche sous Excel, on a trouvé les temps de vidange des six tronçons de canalisation :

$$T_{\text{vid1}} = 1,395 \text{ h}$$

$$T_{\text{vid4}} = 1,415 \text{ h}$$

$$T_{\text{vid2}} = 1,282 \text{ h}$$

$$T_{\text{vid5}} = 1,2625 \text{ h}$$

$$T_{\text{vid3}} = 1,5575 \text{ h}$$

$$T_{\text{vid6}} = 1,38 \text{ h}$$

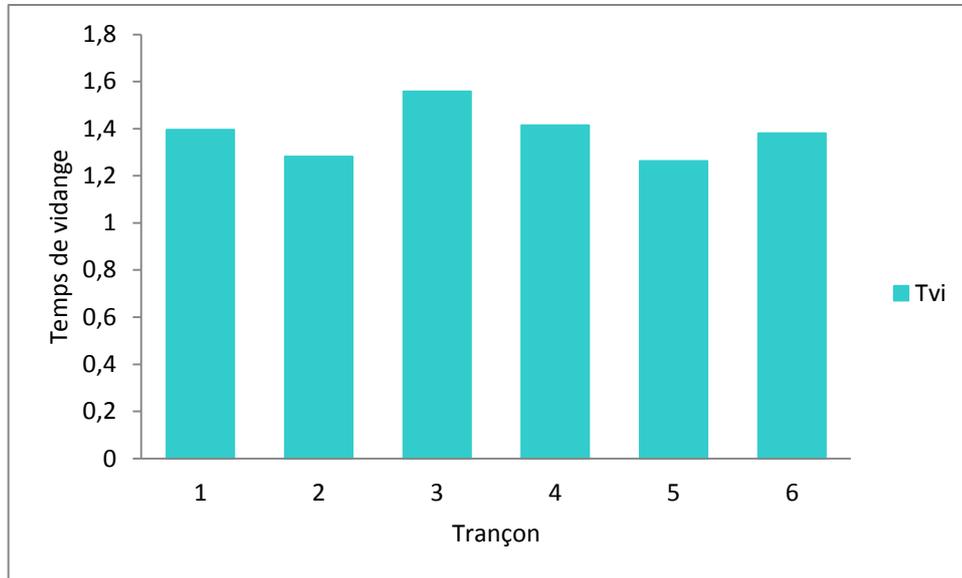


Figure VI.8 .Durée de dépressurisation (vidange) par trançon

### VI.2.1.2. Durée de réparation

Après la vidange du trançon, l'opération de réparation proprement dite commence.

La durée de réparation est variable et dépend de nombreux paramètres, en particulier de la nature du sol et de l'importance de la défaillance. Aucun modèle d'estimation de la durée ne se retrouve dans la littérature hormis quelques valeurs de cas concret. Dans ce travail comme hypothèse nous avons utilisé une durée moyenne de réparation de 24 heures pour un 40'', tirée de l'expérience des services de réhabilitation de SONATRACH TRC.

### VI.2.1.3. Durée de purge

Après réparation, le trançon de canalisation contient de l'air. Pour éviter les risques de formation de mélanges explosifs le trançon réparé subit une opération de purge. Cette opération est réalisée par injection d'un bouchon d'azote.

la durée estimée de l'opération  $T_{\text{pi}}$  définie par la relation suivante :

$$T_{\text{pi}} = \frac{L_i}{W_{\text{min}}} \quad (\text{VI. 14})$$

Où :

$L_i$  , Longueur du trançon i en mètres,

$W_{\min}$  : vitesse minimale de l'écoulement en m/s (1 m/s)

La durée de purge dépend uniquement de la longueur du tronçon.

Tr N°	L (km)	T <sub>rép</sub> (heures)	T <sub>purge</sub> (heures)
1	83,2	24	23,11
2	96,17	24	26,71
3	91,41	24	25,39
4	84,11	24	23,36
5	75,9	24	21,08
6	144,08	24	40,02

Tableau VI.4 .Durée de purge par tronçon du gazoduc

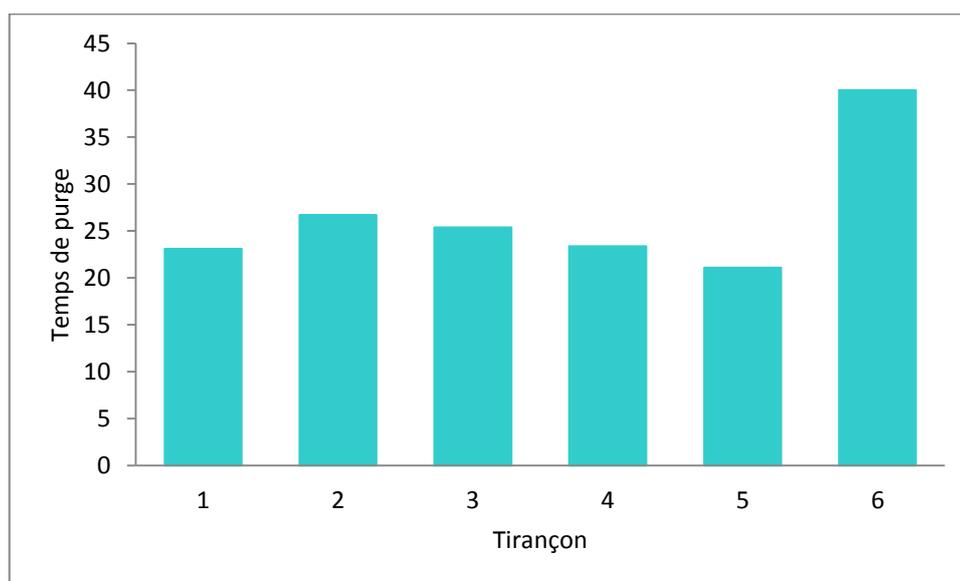


Figure VI.9 .Durée de purge par tronçon

#### VI.2.1.4. Durée de remplissage

Une fois le tronçon purgé, on procède à son remplissage

On considère que la durée de remplissage est égale à la durée de vidange dans cette étude :

Tr N°	L (km)	T <sub>v</sub> (heures)	T <sub>rp</sub> (heures)
1	83,2	1,395	1,395
2	96,17	1,282	1,282
3	91,41	1,5575	1,5575
4	84,11	1,415	1,415
5	75,9	1,2625	1,2625
6	144,08	1,38	1,38

Tableau VI.5. Durée de pressurisation par tronçon

Tr N°	L (km)	T <sub>v</sub> (h)	Tr (h)	T <sub>p</sub> (h)	Trp (h)	Mi 1/h
1	83,2	1,395	24	23,11	1,395	0,02004
2	96,17	1,282	24	26,71	1,282	0,0187701
3	91,41	1,5575	24	25,39	1,5575	0,019046
4	84,11	1,415	24	23,36	1,415	0,0199224
5	75,9	1,2625	24	21,08	1,2625	0,021006
6	144,08	1,38	24	40,02	1,38	0,014975
<b>Taux de réparation globale μ<sub>c</sub></b>						0,01860311

Tableau VI.6. Taux de réparation global et par tronçon

Comme on a mentionné précédemment, le taux de réparation globale est calculé à partir de la relation suivante :

$$\mu_c = \lambda_c \frac{\prod_1^N \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i}}{1 - \prod_1^N \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i}} \quad (VI. 15)$$

# *Chapitre VII*

Etude de cas : application de la méthodologie développée au gazoduc GK1

«Toutes choses sont bonnes ou mauvaises  
par comparaison »

**-Edgar Allan Poe -**

Dans ce chapitre, les modèles de fiabilité, maintenabilité et disponibilité du GK1 développés plus haut vont faire l'objet de l'application en considérant les paramètres de fiabilité issus des bases des données internationales et estimés.

**VII.1. Comparaison entre la fiabilité du GK1 sur la base de valeurs de paramètre de fiabilité fournies par les bases des données internationales et estimées :**

a/ données du calcul : [h<sup>-1</sup>]

$\lambda_{SA} = 0,0014$

$\lambda_C = 1,30203E-05$

$\lambda_{TC} = 2,31E-08$

b/ données de base de donnée internationale : [h<sup>-1</sup>]

$\lambda_{SC} = 0,0014$

$\lambda_C = 5,08589E-05$

$\lambda_{TC} = 5,79E-09$

Formule et résultats	
R(t)	$R_{S7}(t) = e^{-\lambda_C * t} * \left[ e^{-\lambda_C * t} + e^{-\frac{\lambda_{TC} + \lambda_{SA}}{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j}} * t} - e^{-\left(\frac{\lambda_{TC} + \lambda_{SA}}{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j}} + \lambda_C\right) * t} \right]$
	$R_{BDI}(t) = e^{-0,000101718 * t} + e^{-0,000664 * t} - e^{-0,000714859 * t}$
	$R_{Estimé} = e^{-0,00002604066 * t} + e^{-0,000626169 * t} - e^{-0,000639189 * t}$

Tableau VII.1. La fiabilité du GK1 selon la BDI et selon les valeurs estimées

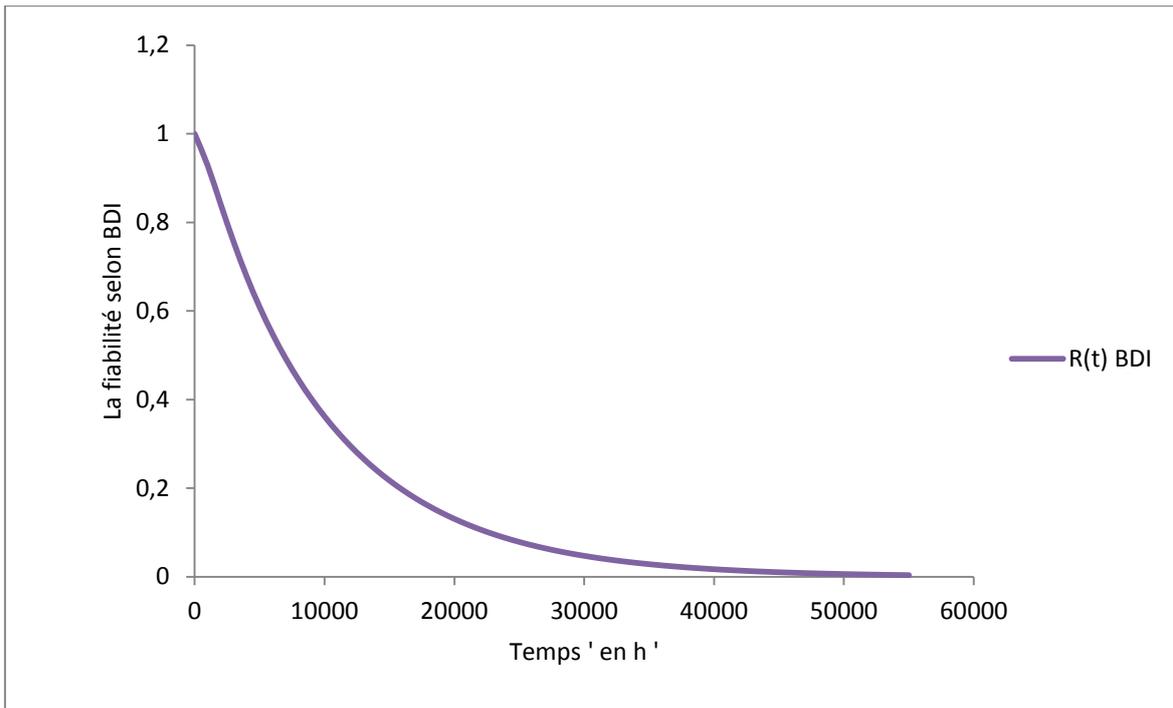


Figure VII.1. La fiabilité selon la base des données internationale

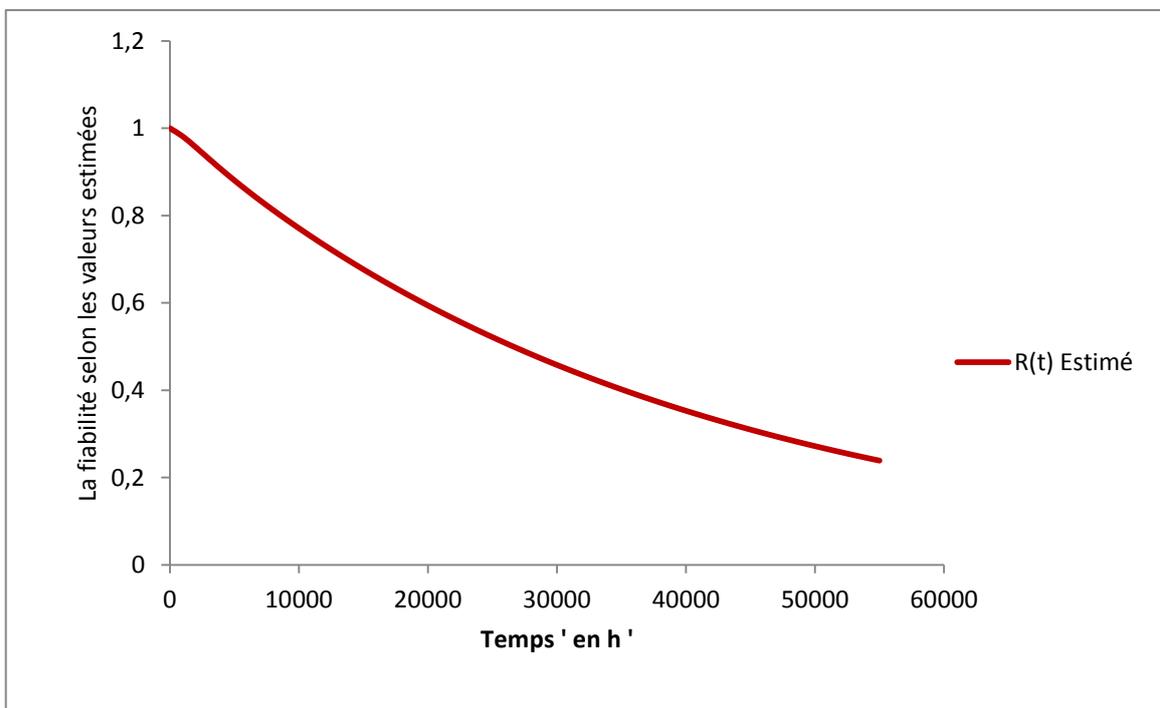


Figure VII.2. La fiabilité du gazoduc établie sur la base de valeurs de taux de défaillance estimés

L'analyse de ce graphe mis en évidence une assez bonne fiabilité du système vu que pour une période d'une année à titre d'exemple la probabilité pour que le système soit en état de bon fonctionnement est de 80%.

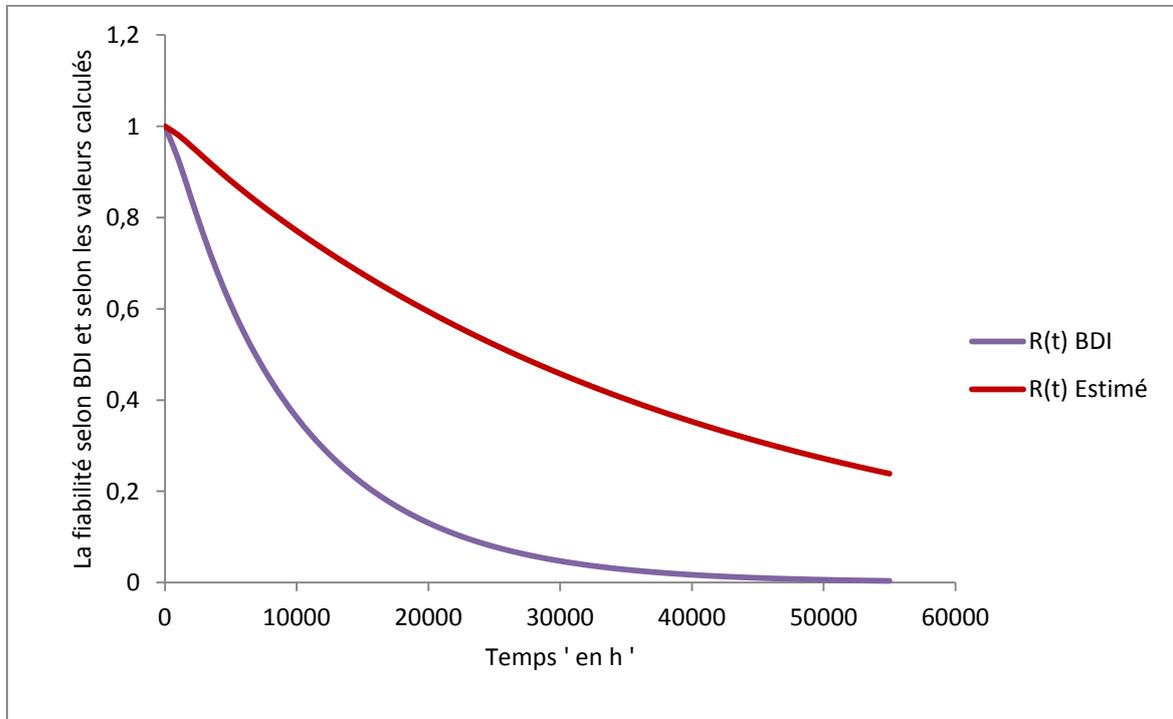


Figure VII.3. Comparaison entre la fiabilité du gazoduc GK1 et celle selon les données de la base de données internationale

## VII.2. Evaluation de fiabilité du gazoduc GK1 par rapport aux standards internationaux en tenant compte de la variation des indices de fiabilité de la canalisation :

a/ Si on prend  $\lambda_{\text{canalisation}}$  supérieur à  $\lambda_{\text{canalisation}}$  de la BDI :

$$\lambda_{SC} = 0,0014$$

$$\lambda_C = 5,08589E-04$$

$$\lambda_{TC} = 5,79E-09$$

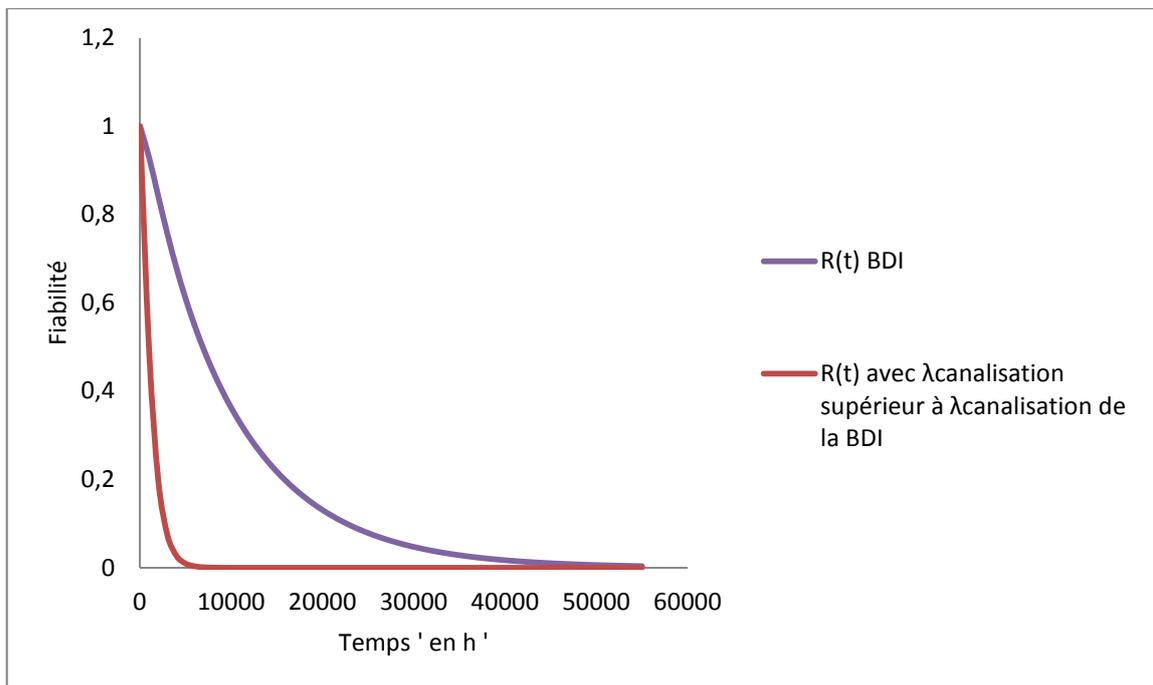


Figure VII.4. Comparaison entre la fiabilité du gazoduc avec les données de BDI et avec un  $\lambda_c$  plus grand

b/ Si on prend  $\lambda_{\text{canalisation}}$  inférieur à  $\lambda_{\text{canalisation}}$  de la BDI :

$$\lambda_{SC} = 0,0014$$

$$\lambda_c = 5,08589E-06$$

$$\lambda_{TC} = 5,79E-09$$

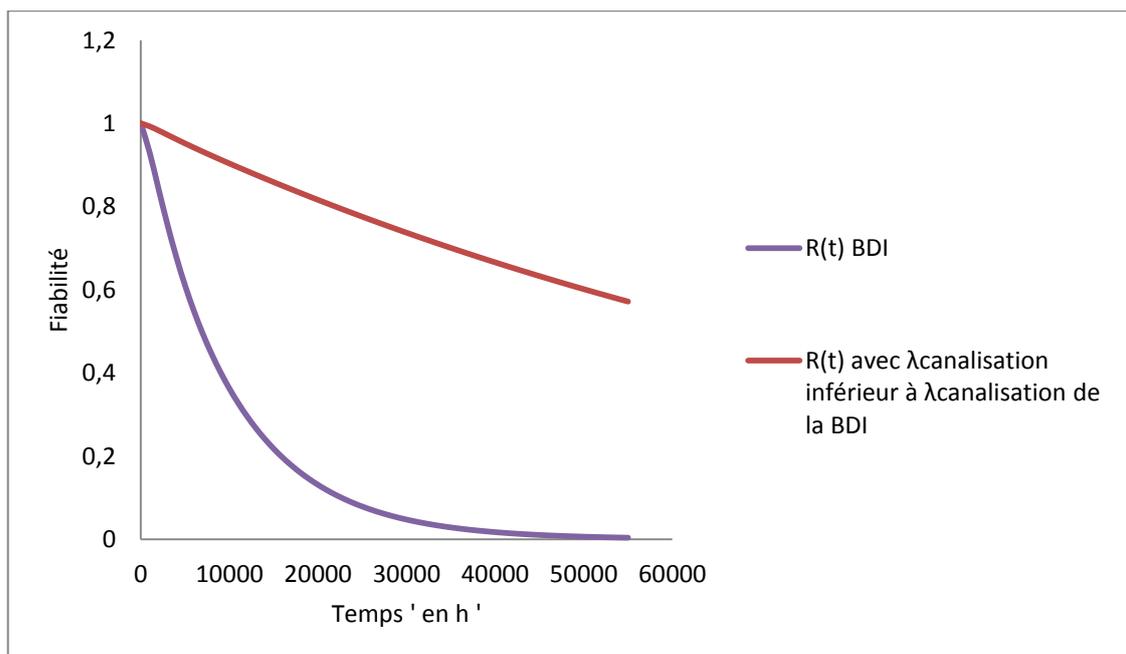


Figure VII.5. Comparaison entre la fiabilité du gazoduc avec les données de BDI et avec un  $\lambda_c$  plus petit

### VII.3. Evaluation de fiabilité du gazoduc GK1 par rapport aux standards internationaux en tenant compte de la variation des indices de fiabilité des turbocompresseurs :

a/ Si on prend  $\lambda_{TC}$  supérieur à  $\lambda_{TC}$  de la BDI :

$$\lambda_{SC} = 0,0014$$

$$\lambda_C = 5,08589E-05$$

$$\lambda_{TC} = 5,79E-08$$

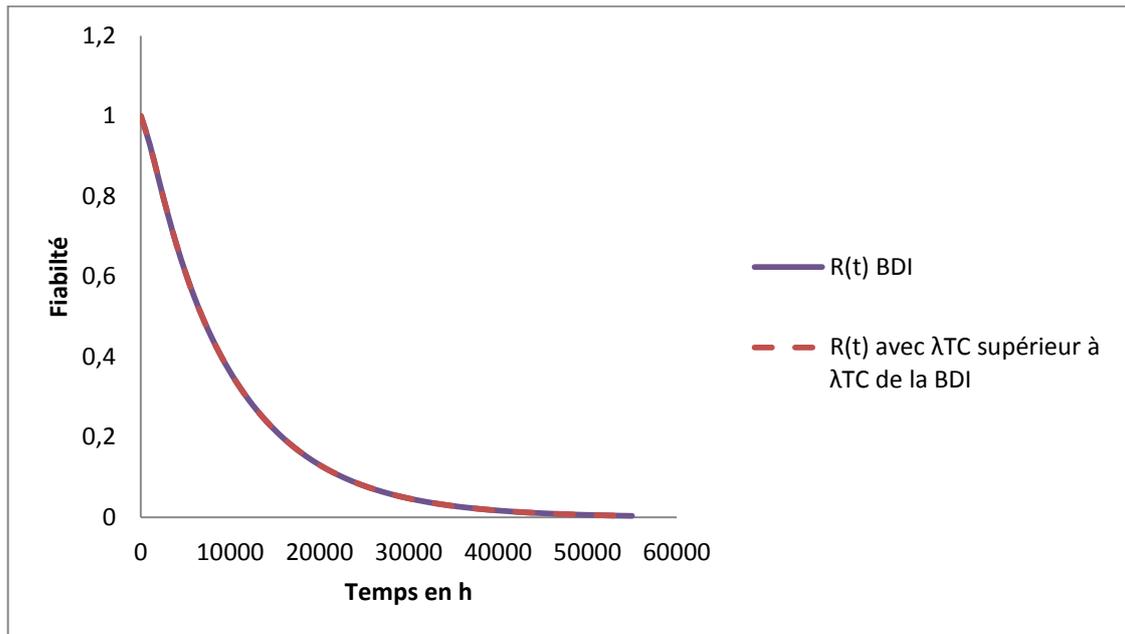


Figure VII.6. Comparaison entre la fiabilité du gazoduc avec les données de BDI et avec un  $\lambda_{TC}$  plus grand

b/ Si on prend  $\lambda_{TC}$  inférieur à  $\lambda_{TC}$  de la BDI :

$$\lambda_{SC} = 0,0014$$

$$\lambda_C = 5,08589E-05$$

$$\lambda_{TC} = 5,79E-10$$

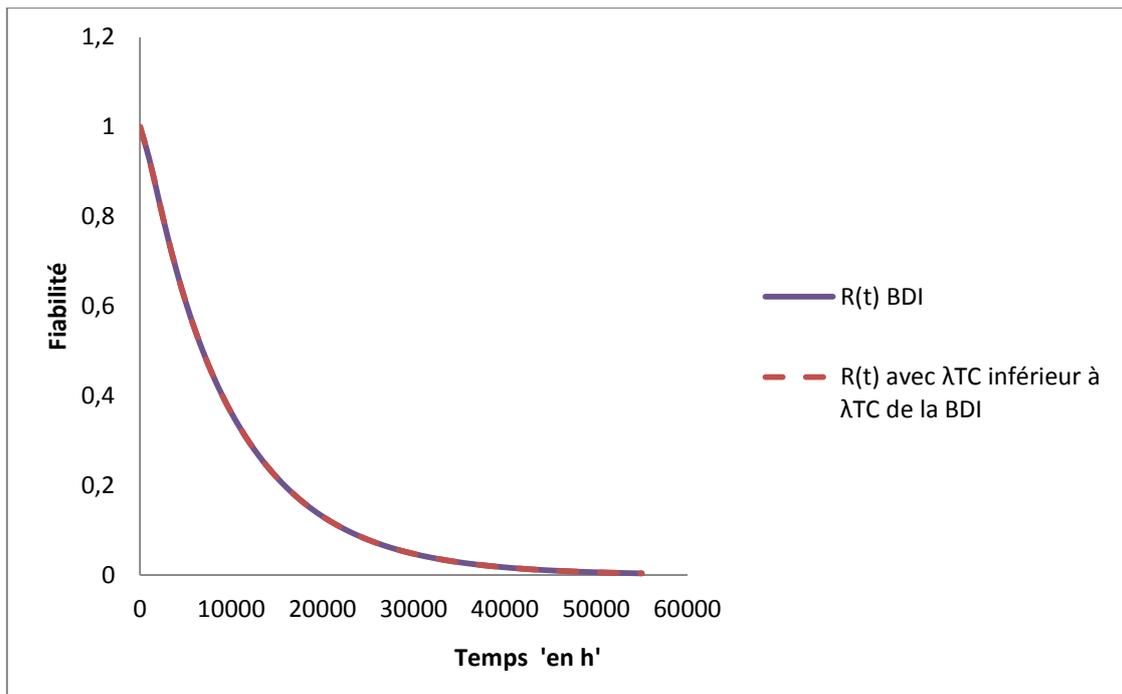


Figure VII.7. Comparaison entre la fiabilité du gazoduc avec les données de BDI et avec un  $\lambda_{TC}$  plus petit

### Analyse des résultats :

1. L'analyse de la figure (VII.3), montre que la fiabilité du gazoduc GK1 est bonne vue quelle est supérieure à celle des standards internationaux, ce qui permet de dire que ce gazoduc reste en bonne état de fonctionnement, cette conclusion ne peut être émise que pour les données prise dans cette études
2. L'analyse de sensibilité de la fiabilité du gazoduc nous permet de mieux voir l'influence de la variation des déférents indices de fiabilité sur paramètre.

On remarque que la variation des indices de fiabilité des systèmes en parallèle a une influence presque négligeable sur la fiabilité du gazoduc, en vue des grandes redondances sur ces éléments. Tandis que la variation des indices des éléments en série a une très grande influence. Enfin on constate que la fiabilité du gazoduc dépend principalement de l'état des éléments en série et plus exactement de l'état de la canalisation.

**VII.4. Comparaison entre la disponibilité et la maintenabilité du GK1 sur la base de valeurs de paramètre de fiabilité fournies par les bases des données internationales et estimées :**

**a/ données du calcul : [h<sup>-1</sup>]**

$$\lambda_{SA} = 0,0014 \qquad \lambda_C = 1,30203E-05 \qquad \lambda_{TC} = 2,31E-08$$

$$\mu_{SA} = 0,45 \qquad \mu_C = 0,018603115$$

**b/ données de base de donnée internationale : [h<sup>-1</sup>]**

$$\lambda_{SC} = 0,0014 \qquad \lambda_C = 5,08589E-05 \qquad \lambda_{TC} = 5,79E-09$$

$$\mu_{SA} = 0,45 \qquad \mu_C = 0,013888889$$

**Formules et résultats**

A(t)

$$A_{S7} = \frac{\mu_C}{\mu_C + \lambda_C} * [1 - [(1 - \frac{\mu_C}{\mu_C + \lambda_C}) * (\prod_{i=1}^5 (1 - (\frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} * (1 - P16))))]]]$$

$$A_{BDI} = 0,996351517$$

$$A_{Estimé} = 0,999300589$$

M(t)

$$M(t) = 1 - \exp - \left[ \frac{\frac{\mu_C}{\mu_C + \lambda_C} * [1 - [(1 - \frac{\mu_C}{\mu_C + \lambda_C}) * (\prod_{i=1}^5 (1 - (\frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} * (1 - P16))))]] * [\lambda_C + \frac{1}{\frac{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{\lambda_{TC} + \lambda_{SA}} + \frac{1}{\lambda_C} - \frac{1}{\lambda_C + \frac{\lambda_{TC} + \lambda_{SA}}{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{\lambda_{TC} + \lambda_{SA}}}}}}]}{1 - [\frac{\mu_C}{\mu_C + \lambda_C} * [1 - [(1 - \frac{\mu_C}{\mu_C + \lambda_C}) * (\prod_{i=1}^5 (1 - (\frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} * (1 - P16))))]]]} * t \right]$$

$$M(t)_{BDI} = 1 - e^{-0.027690094 * t}$$

$$M(t)_{Estimé} = 1 - e^{-0.037198018 * t}$$

Tableau VII.2. La disponibilité et la maintenabilité du GK1 selon la BDI et selon les valeurs estimées

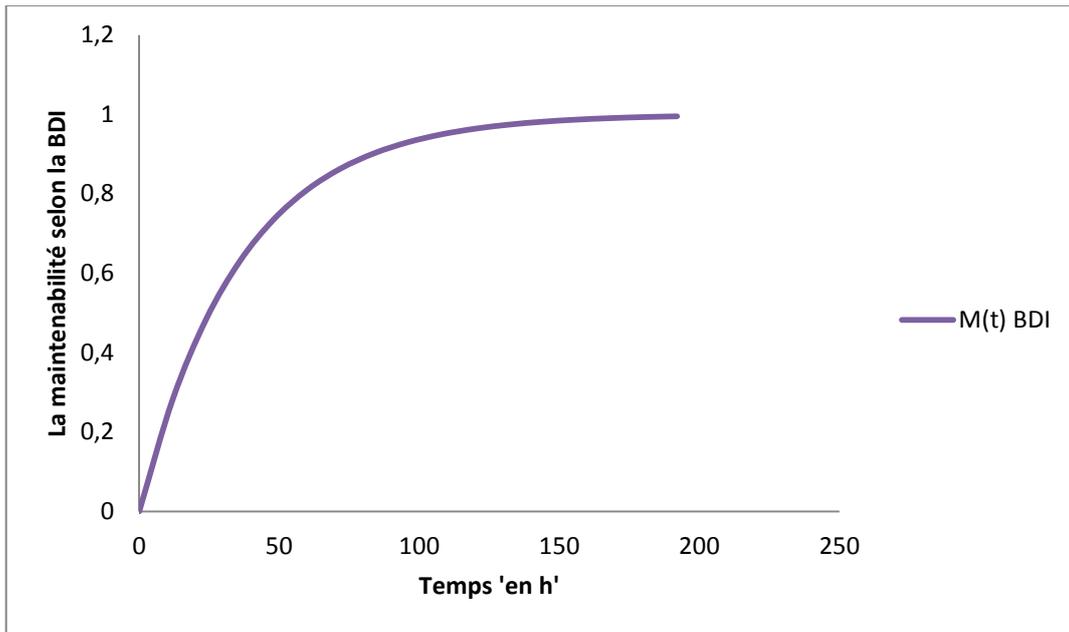


Figure VII.8.Maintenabilité du GK1 établie sur la base de taux de réparation des éléments issus des bases des données internationales

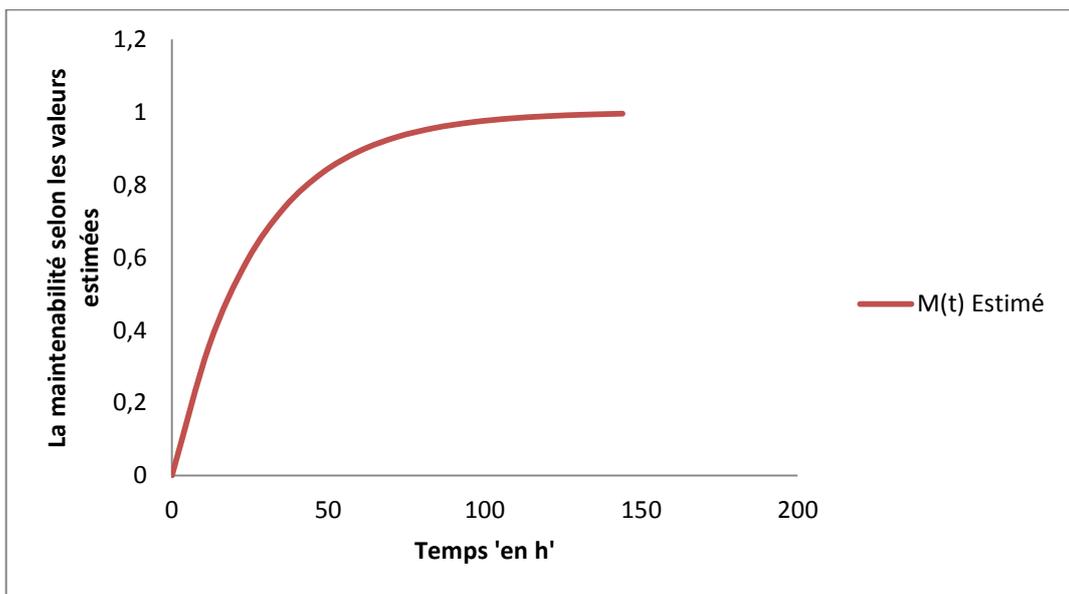


Figure VII.9.Maintenabilité du GK1 établie sur la base de taux de réparation estimés des éléments

L'analyse de ce graphe montre une assez bonne maintenabilité puisque pour une durée de réparation de 24h par exemple on constate une maintenabilité ou une probabilité de réparer une panne de 59% et pour 48h on remarque une maintenabilité de 83%

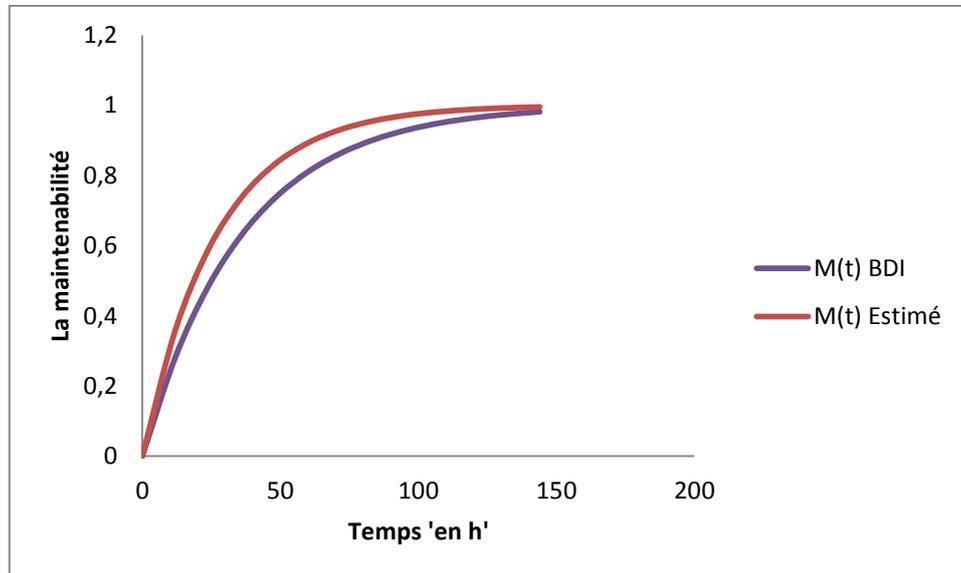


Figure VII.10 .Comparaison entre la maintenabilité du gazoduc GK1 pour des taux de réparation des éléments issus des BDI et estimés

### Analyse des résultats :

L'analyse de la figure (VII.10) et le tableau (VII.2), montre que la maintenabilité et la disponibilité du gazoduc GK1 est bonne vue quelle est supérieure à celle des standards internationaux, ce qui permet de dire que ce gazoduc est soumis à une politique de maintenance adéquate, il n'en demeure pas moins que cette conclusion ne peut être émise que pour les données considérées dans cette étude.

### Conclusion :

A la lumière des résultats obtenus on peut conclure que le GK1 a une bonne fiabilité, maintenabilité et disponibilité et il jouit d'une bonne performabilité, mais il faut toujours effectuer de la maintenance préventive (entretien régulier, suivi des taux d'anomalies ... ETC) afin de diminuer l'indisponibilité et maintenir une bonne productivité.

# *Conclusion Générale*



« La vie est l'art de tirer des conclusions  
suffisantes de prémisses insuffisantes»

**- Samuel Butler -**

## Conclusion générale :

La fiabilité et la disponibilité représentent des critères d'évaluation de l'état de marche et de la maintenance d'un système quel qu'il soit. L'évaluation de ces paramètres dans le cas de système complexe tel que les gazoducs passe par une modélisation établie sur la base d'une décomposition hiérarchique à plusieurs niveaux où l'ensemble du système occupe le sommet et les éléments, leurs diagrammes de fiabilité représentent le schéma fonctionnel. Cette démarche permet d'aborder l'aspect modélisation par sous-systèmes jusqu'à atteindre le modèle global.

Dans ce cadre, la modélisation de la fiabilité du sous-système turbocompresseurs a été réalisé par l'usage des graphes de Markov dans le souci de tenir compte le plus possible de la réalité d'exploitation de ce maillon essentiel constituant le gazoduc.

Cependant, le modèle développé quel que soit son degré de détail dépend essentiellement de la quantité estimable des paramètres de fiabilité des éléments qui le composent. Pour le cas des turbocompresseurs, l'estimation de ces paramètres par des méthodes fréquentistes est peu envisageable qu'elle se heurte à un manque d'information dû à la robustesse de ce type d'équipements. Pour palier à cet handicap, nous avons en recours à une approche d'estimation par inférence bayésienne. Cette technique à la lumière des résultats à obtenu c'est avéré efficace car avec le peu d'informations recueillies sur le terrain associée aux informations issues des bases de données internationales ou jugement d'experts a permis d'obtenir une assez bonne qualité d'estimation.

Alors que pour le cas des canalisations, l'évaluation de taux de défaillance est obtenue par la correction des informations tirées par les bases de données reconnues, et le taux de réparation est évalué à partir du temps de réparation et du temps logistique.

Par ailleurs, on peut dire que les modèles de fiabilité ou disponibilité permettent non seulement une évaluation de la fiabilité et de la disponibilité, mais également la détection des maillons faibles du système. Ces modèles présentent également l'avantage de quantifier l'impact de toute opération de maintenance sur la fiabilité et la disponibilité du gazoduc. De ce fait, ils représentent de formidable outil d'aide à la décision et un moyen efficace de comparaison par rapport aux standards internationaux.

Enfin, nous espérons que notre travail servira d'appui pour les futurs étudiants intéressés par ce domaine pour apporter d'éventuelles améliorations.

*Références*

*Bibliographiques*

« J'ai vu plus loin que les autres parce que je  
me suis juché sur les épaules des géants »

**- Isaac Newton -**

## Références bibliographique

- [1] **Yasmina Berro** « Evaluation de la fiabilité des systèmes temps réel distribués embarqués », Mémoire de Magistère, Université El Hadj Lakhdhar Batna, 2009.
- [2] **Boudoukara Zohra** « Méthodologie d'évaluation de maintenance pour les systèmes de production », Mémoire de magistère, ENSET 2008.
- [3] **Academia.edu** « chapitre 2 : DIAGRAMMES DE FIABILITE OU DIAGRAMMES DE SUCCES (Reliability block diagram) ».
- [4] [Martz 76, Procaccia 92, Lannoy 94].
- [5] **Mourad Bettayeb** Etude de la fiabilité des canalisations de transport d'hydrocarbures corrodées, estimation et analyse de sensibilité
- [6] **Direction exécution des projets**, « Analyse RAM » projet GR5 de Sonatrach