

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Mémoire de MASTER

Présenté par

BENKAHLA Hanane

ELAKEB Houda

Filière : Hydrocarbures

Option : Génie Mécanique

Spécialité : Transport et distribution des hydrocarbures

Thème

**Usage des graphes de Markov pour la modélisation de la
performabilité de l'oléoduc OB1 (HEH-Bejaia)**

Devant le jury :

Mr. MENAA Abdenmour

UMBB

Président

Mr. YOUNSI Karim

UMBB

Encadrant

Mr. TIKOBAINI Mourad

UMBB

Examineur

Mr. BOUHAFS Smail

UMBB

Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

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 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 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.

Un très grand merci à tous nos enseignants du département : Transport et équipements des hydrocarbures pour leur aimable aide, leurs précieux conseils et leur encadrement dont on a pu bénéficier durant ces cinq années.

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

BENKAHLA Hanane / ELAKEB Houda

Dédicace

Le voyage n'était pas court, et il ne devrait pas l'être.

Le rêve n'était pas proche et le chemin n'était pas semé d'embûches.

Mais je l'ai fait et l'ai eu

*Louange à dieu, amour, remerciement et gratitude, grâce auxquels je suis ici aujourd'hui face
à un rêve tant attendu qui est devenu une réalité dont je suis fier.*

*À mon ange pur, ma force après dieu, ma première et éternelle supportrice, ma mère, qui sans
vos sacrifices, n'aurait pas existé cette réalisation, je vous en reconnaisante.*

*À ceux qui m'ont soutenu sans limites et qui m'ont donné gratuitement, mon père, tu as
toujours été à mes cotes pour m'encourager.*

Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

À mes belles sœurs pour l'amour qu'elles me réservent

Je leurs souhaite une vie pleine du bonheur et de succès.

À celui qui a inlassablement tendu la main dans mes moments de faiblesse, mon frère,

À mon amie et mon binôme 'ELAKEB Houda'

*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
souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.*

*À mes amies Nadia, Houda, Imen, Fatima, Yousra, Ikram, Hadjer, Ines, Roza, Ouafaa,
Djoumana, vous êtes pour moi des sœurs et des amies sur qui je peux compter.*

Je vous souhaite une vie pleine de sante et de bonheur.

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

Hanane

Dédicace

À mes chers parents et de mon grand-père bien-aimé, sans oublier mes sœurs et mes frères, mon arrivée ici n'est qu'une bénédiction de Dieu et leur soutien, alors merci beaucoup et je vous aime et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

À mon amie et mon binôme 'BENKAHLA Hanane'

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.

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

Houda

Résumé

Dans cette étude intitulée : Analyse de la performabilité du système de transport par canalisation OB1, on commence par donner une description générale de l'ouvrage étudié avec tous ses composants : Ses quatre stations de pompages, et la canalisation, ainsi que toute leurs caractéristiques, puis on passe à l'estimation des paramètres de fiabilité des composants du SP en utilisant pour la modélisation les chaîne de Markov, ensuite vient la modélisation de l'intégralité du système. Dans le but de calculer la performabilité de ce système, un calcul hydraulique est fait. Pour finir, après avoir obtenu les résultats de la modélisation et du calcul hydraulique du OB1 on procède à l'évaluation de la performabilité de ce système, et on interprète les résultats donnés.

Abstract

In this study entitled: Analysis of the performability of the pipeline transport system OB1, we begin by giving a general description of the structure studied with all its components: Its four pumping stations, and the pipeline, as well as all their characteristics, then we move on to the estimation of the reliability parameters of the SP components using Markov chains for modelling, then comes the modelling of the entire system. In order to calculate the performability of this system, a hydraulic calculation is made. Finally, after having obtained the results of the modelling and hydraulic calculation of OB1 we calculate the performability of this system, and we interpret the results given.

ملخص

في هذه الدراسة التي تحمل عنوان: تحليل أداء نظام النقل عبر الأنابيب OB1 نبدأ بإعطاء وصف عام للهيكل المدروس بجميع مكوناته: محطات الضخ الأربع، وخط الأنابيب، وكذلك جميع خصائصها، ثم ننتقل إلى تقدير الاعتمادية لمكونات SP باستخدام سلاسل ماركوف للنمذجة ثم تأتي نمذجة النظام بأكمله. من أجل حساب أداء هذا النظام، يتم إجراء حساب هيدروليكي. أخيرًا، بعد الحصول على نتائج النمذجة والحساب الهيدروليكي لـ OB1، قمنا بحساب أداء هذا النظام، وقمنا بتفسير النتائج المقدمة.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Description de l'ouvrage étudié.

Introduction :	3
-----------------------------	----------

I.1. Présentation général de la direction TRC :.....	3
I.1.1. Description du réseau de transport :.....	3
I.1.2. Patrimoine actuel :.....	4
I.2. Présentation de la DRGB :	5
I.2.1. Organigramme de la DRGB :.....	5
I.2.2. Description des Terminaux de RTC :.....	6
I.3. Description et historique de l'OB1 :	7
I.3.1. Caractéristiques de L'OB1 :.....	9
I.3.2. Caractéristiques des stations :	10
I.3.3. Caractéristiques de fonctionnement :	13

Conclusion :	13
---------------------------	-----------

Chapitre II : Approche systémique de la modélisation de la fiabilité, maintenabilité et disponibilité des systèmes mécaniques

Introduction :	15
-----------------------------	-----------

II.1. Analyse RAM :.....	15
II.1.1. Fiabilité :	15
II.1.1.1. Définition de la fiabilité :	15
II.1.1.2. Type de fiabilité :	15
II.1.1.3. La fonction de fiabilité $R(t)$:	16
II.1.2. Maintenabilité :	19
II.1.3.1. Définition de maintenabilité :	19
II.1.3.2. Les types de maintenabilité :.....	20
II.1.3.3. Les paramètres et les indicateurs de maintenabilité :.....	20
II.1.3. Disponibilité :	21
II.1.3.1. Définition de la disponibilité :.....	21
II.1.3.2. Les types de disponibilité :.....	21
II.1.5. Analyse RAM d'un oléoduc :.....	21
II.1.5. Diagramme de fiabilité ou diagramme de succès (Reliability block diagram) :..	22
II.1.5.1. Définition :	22
II.1.5.2. Etude de la disponibilité de quelques systèmes simples réparables :.....	23
II.1.5.2.1 Cas des systèmes à configuration série :.....	23
II.2. Modélisation de la FMD de l'oléoduc OB1 :.....	26
II.2.1. Méthode de Graphe des états "graphe de Markov "	26

II.2.1.1. Redondance passive :	27
II.2.1.2. Redondance active :	28
II.2.1.3. Equations d'état du système :	29
II.2.2. Méthode analytique :	30
II.2.2.1. Modèles de base de fiabilité et de disponibilité des systèmes.....	30
II.2.2.2. Modélisation de la fiabilité et disponibilité de l'oléoduc :	33
Conclusion :	40

Chapitre III : Approche systémique de la modélisation de la performabilité

Introduction :	42
III.1. La performabilité :	42
III.2. Différence entre fiabilité et performabilité :	42
III.3. Modèle de performabilité :	43
III.3.2. Modèle de fiabilité :	43
III.3.2. Modèle de processus :	43
III.3.2.1. Calcul hydraulique d'un oléoduc :	43
III.3.2.1.1. Dimensionnement de la canalisation :	43
III.3.2.1.2. Formules du calcul hydraulique :	46
Conclusion :	56

Chapitre IV : Evaluation de fiabilité, maintenabilité et disponibilité du système de transport par canalisation OB1

Introduction :	58
IV.1. Modélisation et Evaluation de la fiabilité et disponibilité du système :	58
IV.1.1. Evaluation de la disponibilité et de la fiabilité d'un système SP de configuration (1+1) :	58
IV.1.1.1. Par graphe de Markov (cas identique) :	58
IV.1.1.2. Calcul de la disponibilité par le modèle de YACIN (1+1) :	61
IV.1.1.3. Par graphe de Markov cas (Non identiques)	62
IV.1.2. Evaluation de la disponibilité et de la fiabilité du Système TP de configuration (3+2) :	65
IV.1.2.1. Par graphe de Markov cas (identiques) :	65
IV.1.2.2. Calcul de la disponibilité par le modèle de YACIN (3+2) :	68
IV.1.2.3. Par graphe de Markov cas (non identiques) :	69
IV.1.3. Evaluation de la disponibilité, la fiabilité et de la maintenabilité de système global :	76
IV.1.3.1. Par le graphe de Markov :	76
IV.1.3.2. par la Modèle analytique :	81
IV.1.4 Comparaison entre les deux approches de modélisation :	80

Conclusion :	82
---------------------	-----------

Chapitre V : Evaluation de la performabilité de l'oléoduc OB1

Introduction :	84
-----------------------	-----------

V.1.Evaluation de la performabilité de l'oléoduc OB1 :	84
--	----

V.1.1. Modèle de fiabilité :	84
------------------------------	----

V.1.2. Modèle processus (régime de fonctionnement) :	84
--	----

V.1.2.1. Calcul hydraulique :	84
-------------------------------	----

V.1.2.1.1 Données des tronçons entre les stations de pompage :	84
--	----

V.1.2.1.2 Calcul de la charge de refoulement exigée et la pente hydraulique pour le débit 1800 m ³ /h :	85
--	----

V.1.3. Modèle de performabilité :	99
-----------------------------------	----

V.1.3.1. Calcul de la performabilité :	99
--	----

V.2. Impact de la dégradation du pipeline sur la performabilité et la disponibilité :.....	100
--	-----

Conclusion :	100
---------------------	------------

Chapitre VI : Estimation des paramètres de fiabilité des principaux éléments de l'oléoduc OB1

Introduction :	102
-----------------------	------------

VI.1. Estimation des indices de fiabilité :	102
---	-----

VI.2. L'inférence bayésienne :	103
--------------------------------	-----

VI.2.1. Théorème de bayes :	103
-----------------------------	-----

VI.2.2. La démarche bayésienne :	104
----------------------------------	-----

VI.3. Estimation du taux de défaillance « λ » :	104
---	-----

VI.3.2. Distribution a priori :	104
---------------------------------	-----

VI.3.2. Distribution a posteriori :	105
-------------------------------------	-----

VI.3.1. Application numérique :	105
---------------------------------	-----

VI.4. Estimation des indices de fiabilité du pipe-line :	112
--	-----

VI.4.1. Le taux de défaillance :	112
----------------------------------	-----

VI.4.2. Fréquences génériques de défaillance suivant les causes :	113
---	-----

VI.4.3. Adaptation de données génériques aux particularités de l'ouvrage OB1 :.....	114
---	-----

VI.4.4. Comparaison entre la fiabilité de l'OB1 sur la base de valeurs de paramètre de fiabilité fournies par les bases des données internationales et estimées :	116
---	-----

VI.4.5. Comparaison entre la disponibilité et la maintenabilité de l'OB1 sur la base de valeurs de paramètre de fiabilité fournies par les bases des données internationales et estimées :	117
--	-----

Conclusion :	119
---------------------	------------

Conclusion générale	121
----------------------------	------------

Nomenclature

BEF : Bon état de fonctionnement

BDI : Base des données internationales

CDHL : Centre de dispatching de Haoud El Hamra

CONCAWE: Performance of European Cross-country Oil Pipelines

FMD : Fiabilité, maintenabilité, disponibilité

MTBF : La moyenne du temps de bon fonctionnement

MTTR : La moyenne du temps technique de réparation

PK : Point kilométrique

RTC : Régionale Transport Centre

RAM: Reliability, Availability, Maintainability

SP : Station de pompage

SA : Système auxiliaire

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

γ : Probabilité de non démarrage du pompe

λ_c : Taux de défaillance de la canalisation

μ_c : Taux de réparation du canalisation

λ_{SA} : Taux de défaillance du système auxiliaire

μ_{SA} : Taux de réparation du système auxiliaire

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$: Taux de défaillance des pompes

$\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5$: Taux de réparation des pompes

$\lambda_{SP(1,2,3,1b)}$: Taux de défaillance des stations

$\mu_{SP(1,2,3,1b)}$: Taux de réparation des stations

λ_g : Taux de défaillance de système globale

μ_g : Taux de réparation de système globale

Liste des figures

Figure I. 1 : Canalisation aérienne.	3
Figure I. 2: Carte du réseau de transport Algérien.	4
Figure I. 3 : Organigramme de la DRGB.	5
Figure I. 4 : Terminaux de RTC.	6
Figure I. 5: une gare racleur.	6
Figure I. 6: port pétrolier.	7
Figure I. 7 : ligne OB1.	8
Figure I. 8 : Schéma descriptif de L'OB1.	8
Figure I. 9: Profil en long de l'OB1.	9
Figure I. 10 : les différentes variations de l'épaisseur de l'OB1.....	10
Figure II. 1 : Fonction de défaillance $F(t)$ et de fiabilité $R(t)$	16
Figure II. 2: Courbe en baignoire.....	18
Figure II. 3: Type de maintenance.	20
Figure II. 4 : Schéma de principe de l'analyse RAM.	21
Figure II. 5 : Diagramme en parallèle.....	23
Figure II. 6 : Diagramme en série.	23
Figure II. 7 : Schéma bloc d'un système série.	23
Figure II. 8: Schéma bloc d'un système parallèle à deux éléments.	24
Figure II. 9: Schéma bloc d'un système Parallèle à « n » éléments.....	24
Figure II. 10: Diagramme de fiabilité d'un système r/n	25
Figure II. 11 : Diagramme de fiabilité d'un système à redondance.	25
Figure II. 12 : Graphe des états.	27
Figure II. 13: Graphe des états pour la disponibilité.....	27
Figure II. 14: Graphe des états pour la disponibilité (redondance passive).	28
Figure II. 15: Graphe de Markov pour la fiabilité (redondance passive).	28
Figure II. 16 : Graphe des états pour la disponibilité (redondance active).	28
Figure II. 17 : Graphe des états pour la fiabilité (redondance active).	28
Figure II. 18 : Diagramme de fiabilité du sous-système1.	33
Figure II. 19 : Diagramme de fiabilité du sous-système3.	35
Figure II. 20 : Diagramme de fiabilité du sous-système4.	36
Figure II. 21: Diagramme de fiabilité du sous-système5.....	37
Figure II. 22: Diagramme de fiabilité du système global.	39
Figure III. 1: Modèle de performabilité.....	43
Figure III. 2: Courbe caractéristique du réseau.	50
Figure III. 3: Courbe caractéristique de la pompe.	51
Figure III. 4: Le NPSH requis et disponible d'une pompe.	53
Figure III. 5: Assemblage des pompes en série.	53
Figure III. 6: Assemblage des pompes en parallèle.....	54
Figure III. 7: Point de fonctionnement.	55
Figure III. 8: point de fonctionnement avant et après la régulation de vitesse.	56
Figure IV. 1: Graphe des états de la disponibilité de configuration (1+1) cas identique	59
Figure IV. 2: Graphe des états de la fiabilité de configuration (1+1) cas identique.....	60
Figure IV. 3 : Graphe des états de la disponibilité de configuration (1+1) cas non identique. 62	

Figure IV. 4: Graphe des états de la fiabilité de configuration (1+1) cas non identique.....	64
Figure IV. 5: Graphe des états de la disponibilité pour la configuration (3+2) cas identique. 66	
Figure IV. 6: Graphe des états de la fiabilité de configuration (3+1) cas identique.....	67
Figure IV. 7: Graphe des états de la disponibilité de la station de pompage de configuration (3+2) cas non identique en tenant compte du système auxiliaire.....	70
Figure IV. 8: Graphe des états pour la fiabilité de la station de pompage de configuration (3+2) en tenant compte du système auxiliaires cas non identique.	73
Figure IV. 9 : Graphe des états de la disponibilité de l'oléoduc OB1.	76
Figure IV. 10: Graphe des états de la fiabilité de l'oléoduc OB1.....	79
Figure IV. 11 : Fiabilité et maintenabilité résultant des approches de modélisation par les graphes de Markov et la méthode analytique.	81

Figure V. 1: Profil au long et les pentes hydrauliques.	86
Figure V. 2: Courbe caractéristique des conduites	86
Figure V. 3: les courbes caractéristiques la charge de refoulement-station.....	89
Figure V. 4: Représentation graphique du point de fonctionnement.	90
Figure V. 5: Représentation graphique du nouveau point de fonctionnement	92
Figure V. 6: Représentation graphique du point de fonctionnement correspondant au débit 1251,598 m3/h.....	96
Figure V. 7: Représentation graphique du point de fonctionnement Correspondant au.....	97
Figure V. 8: Représentation graphique du point de fonctionnement Correspondant au.....	97
Figure V. 9: les pentes hydrauliques qui correspondent au débit 1251,598 m3/h (sp1-bis)... 98	
Figure V. 10: les pentes hydrauliques qui correspondent au débit 941,74 m3/h (SP2).	98
Figure V. 11: les pentes hydrauliques qui correspondent au débit 807,356 m3/h	98
Figure V. 12: la variation de la disponibilité en fonction de la dégradation de canalisation. 100	
Figure V. 13: la variation de la performabilité en fonction de la dégradation de canalisation.	100

Figure VI. 1: Distribution a priori gamma de λ	108
Figure VI. 2: Distribution a posteriori gamma de λ_1	109
Figure VI. 3: Distribution a posteriori gamma de λ_2	109
Figure VI. 4: Distribution a posteriori gamma de λ_3	110
Figure VI. 5: Distribution a posteriori gamma de λ_4	110
Figure VI. 6: Distribution a posteriori gamma de λ_5	111
Figure VI. 7: Distribution a posteriori gamma de λ_1	111
Figure VI. 8: Distribution a posteriori gamma de λ_{1-a}	112
Figure VI. 9: Causes de défaillances d'oléoduc en %.	113
Figure VI. 10: Facteur de réduction en fonction de l'épaisseur.....	113
Figure VI. 11: Facteur de réduction en fonction du coefficient de sécurité design.....	113
Figure VI. 12: Facteur de réduction en fonction de la profondeur d'enfouissement de la canalisation.....	113
Figure VI. 13: Facteur de réduction en de la fréquence de patrouillage	115
Figure VI. 14: Comparaison de la fiabilité de l'OB1 en considérant des taux de défaillance issus de bases des données internationales et estimées.	117
Figure VI. 15: Comparaison de la maintenabilité de l'OB1 en considérant des taux de réparation issus de bases des données internationales et estimées.	118

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Caractéristiques de l'OB1.....	9
Tableau I. 2: Caractéristiques de SP1.	10
Tableau I. 3: Caractéristiques de SP1 bis.....	11
Tableau I. 4: Caractéristiques de SP2.	11
Tableau I. 5: Caractéristiques de SP3.	12
Tableau I. 6: Caractéristiques de terminal arrivée Béjaia.	12
Tableau I. 7: Caractéristiques de fonctionnement des stations.	13
Tableau II. 1: Les modèles de probabilité de panne.....	26
Tableau II. 2: Récapitulatif des modèles de base de la fiabilité.....	31
Tableau II. 3: Récapitulatif des modèles de base de la disponibilité.	32
Tableau III. 1: Les limites d'élasticité et de rupture de l'acier.	45
Tableau III. 2: les coefficients de sécurité.	46
Tableau III. 3: Régimes d'écoulements et Coefficient de perte de charge λ	49
Tableau IV. 1: Probabilité des différents états SP issue du modèle de Markov disponibilité .	73
Tableau IV. 2: Probabilité des différents états de la SP issue du modèle de Markov fiabilité.	76
Tableau IV. 3: Probabilité des différents états de l'OB1 issue du modèle de Markov disponibilité.....	78
Tableau IV. 4: Probabilité des différents états de l'OB1 issue du modèle de Markov fiabilité.	80
Tableau V. 1: Données du calcul.	84
Tableau V. 2: Les résultats numériques de calcul hydraulique.	85
Tableau V. 3: Détermination des coefficients (a, b) par la méthode de la régression linéaire.	87
Tableau V. 4: Coefficients des modèles mathématiques des caractéristiques des pompes.	87
Tableau V. 5: Charge manométrique des pompes principales et booster.	88
Tableau V. 6: la charge refoulement des stations.	88
Tableau V. 7: Débit correspond au point d'intersection.	90
Tableau V. 8: Régulation de la vitesse de rotation des pompes.....	91
Tableau V. 9: Calcul des rendements et puissances des pompes.....	93
Tableau V. 10: Calcul des débits des états de défaillance.	93
Tableau V. 11: calcul des charges de refoulement.	94
Tableau V. 12: régulation de la charge de refoulement de chaque cas.	95
Tableau V. 13: Tableau récapitulatif du système OB1.	99
Tableau VI. 1: Les données des pompes GEP1.....	106
Tableau VI. 2: Les données des pompes GEP2.....	106
Tableau VI. 3: Les données des pompes GEP3.....	106
Tableau VI. 4: Les données des pompes GEP4.....	106
Tableau VI. 5: Les données des pompes GEP5.....	107
Tableau VI. 6: Les données d'intervention corrective pour TP01.	107

Tableau VI. 7: Les données d'intervention corrective pour TP02.	107
Tableau VI. 8: Causes de défaillances de pipeline en %.....	113
Tableau VI. 9: Fiabilité de l'OB1 selon la BDI et les valeurs estimées.....	116
Tableau VI. 10: La disponibilité et la maintenabilité du OB1 selon la BDI et selon les valeurs estimées.	118

Introduction générale

L'Algérie est l'un des plus grands pays producteurs de pétrole brut. D'un point de vue sécurité, bien que le brut soit non-toxique, il peut être très dangereux s'il n'est pas manipulé correctement. Une rupture partielle ou complète d'un oléoduc, entraîne un rejet accidentel, causera de la pollution.

Les oléoducs sont des systèmes complexes étendus en longueur (plusieurs centaines de kilomètres) destinés au transport du pétrole brut par canalisation.

Un oléoduc est composé d'un certain nombre de stations de pompages (SP) espacées de centaines de kilomètres les unes des autres et destinées à fournir l'énergie de pression nécessaire à l'écoulement du pétrole dans la conduite. L'équipement principal des SP est constitué des pompes.

Les pompes des stations, ainsi que les canalisations des oléoducs sont des éléments essentiels dans le transport du pétrole brut, leur niveau de performance conditionne au plus haut point la performance d'un oléoduc, 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.

Afin de bien cerner notre problématique, nous avons structuré notre mémoire en cinq chapitres présentés de la façon suivante :

Le premier chapitre du mémoire s'attache à la description de l'installation étudiée (l'oléoduc OB1), à savoir les principaux ouvrages qui le constitue.

Nous présenterons en deuxième lieu dans notre travail l'aspect modélisation de la disponibilité et de la fiabilité des stations pompages en particulier et de l'oléoduc OB1 en général par une approche analytique en se basant sur une décomposition hiérarchique associant les diagrammes de fiabilité au modèle de base de la fiabilité des systèmes.

À ce stade de notre étude, nous aborderont également la modélisation de ces deux critères pour l'OB1 en usant des graphes de Markov en considérant les hypothèses permettant d'approcher le plus fidèlement possible les réalités d'exploitation.

Troisièmement, nous traiterons de l'opportunité de l'évaluation de la performabilité de l'oléoduc OB1 en se basant sur le concept de fiabilité et de performance (régime de fonctionnement) dans un même référentiel afin de déterminer sa productivité.

Le quatrième volet portera sur approche d'estimation des paramètres de fiabilité des pompes par inférence bayésienne avec l'évaluation d'indice de fiabilité de la canalisation.

Enfin, les modèles développés de FMD et de performabilité feront l'objet d'une application en considérant l'information estimée, d'une part et l'information issue de bases de données internationales d'autre part.

Chapitre I

Description de l'ouvrage étudié.

Introduction :

Dans ce chapitre, sera présenté la description technique du réseau de transport par canalisation ainsi qu'un aperçu de l'installation TRC de Bejaïa suivi d'une description des SP existantes plus particulièrement l'OB1 et ses caractéristiques.

I.1. Présentation général de la direction TRC :

L'activité Transport par Canalisations (TRC) est le noyau à partir duquel, Sonatrach fut créé en 1963. Elle se place entre l'amont et l'aval et se charge de l'acheminement et du stockage des hydrocarbures (gaz et pétrole). Le cœur de l'Algérie pétrolière se trouve à Haoud El Hamra, base de TRC située à quelque 1000 km au Sud d'Alger et d'où l'oléoduc 24'' OB1 commence. TRC possède un réseau de pipeline de plus de 18000 Km et assure le transport du gaz naturel, du pétrole brut, du condensat et du GPL (gaz de pétrole liquéfié). Les missions affectées à la branche transport par canalisation sont :

- La gestion et l'exploitation des ouvrages et canalisations de transport d'hydrocarbures ;
- La coordination et le contrôle de l'exécution des programmes de transport arrêtés en fonction des impératifs de production et de commercialisation ;
- La maintenance, l'entretien et la protection des ouvrages et canalisation ;
- L'exécution des révisions générales, des machines tournantes et équipements ;
- Les installations de pompage et de stockage pour répondre aux besoins de SONATRACH dans les meilleures conditions d'économie, de qualité, de sécurité et de respect de l'environnement ;
- Gère l'interface transport des projets internationaux du groupe ou en partenariat.



Figure I. 1 : Canalisation aérienne.

I.1.1. Description du réseau de transport :

Le réseau actuel de transport peut être divisé en trois parties en fonction de l'utilisation des canalisations.

En examinant ce réseau, on constate que les gisements se trouvent tout à fait au sud du pays et ils représentent le point de départ du réseau. Ensuite, la région de Haoud El Hamra (HEH)

au centre du réseau peut être comparée à un nœud central dans un graphe. Puis arrivent les stations portuaires qui sont la fin du parcours du produit.

Il y a donc :

- Les terminaux sud.
- Le terminal de HEH (centre de Dispatching de l'Hydrocarbure liquide).
- Les terminaux nord.

Pour assurer l'activité de transport par canalisation des hydrocarbures liquides ou gazeux du sud vers le nord du pays, SONATRACH possède 5 régions opérationnelles :

- Région Transport Centre - Bejaïa (RTC).
- Région Transport Sud de Haoud El- Hamra (RTS).
- Région Transport d'In Amenas (RTI).
- Région Transport Est -Skikda (RTE).
- Région Transport Ouest Arzew (RTO).

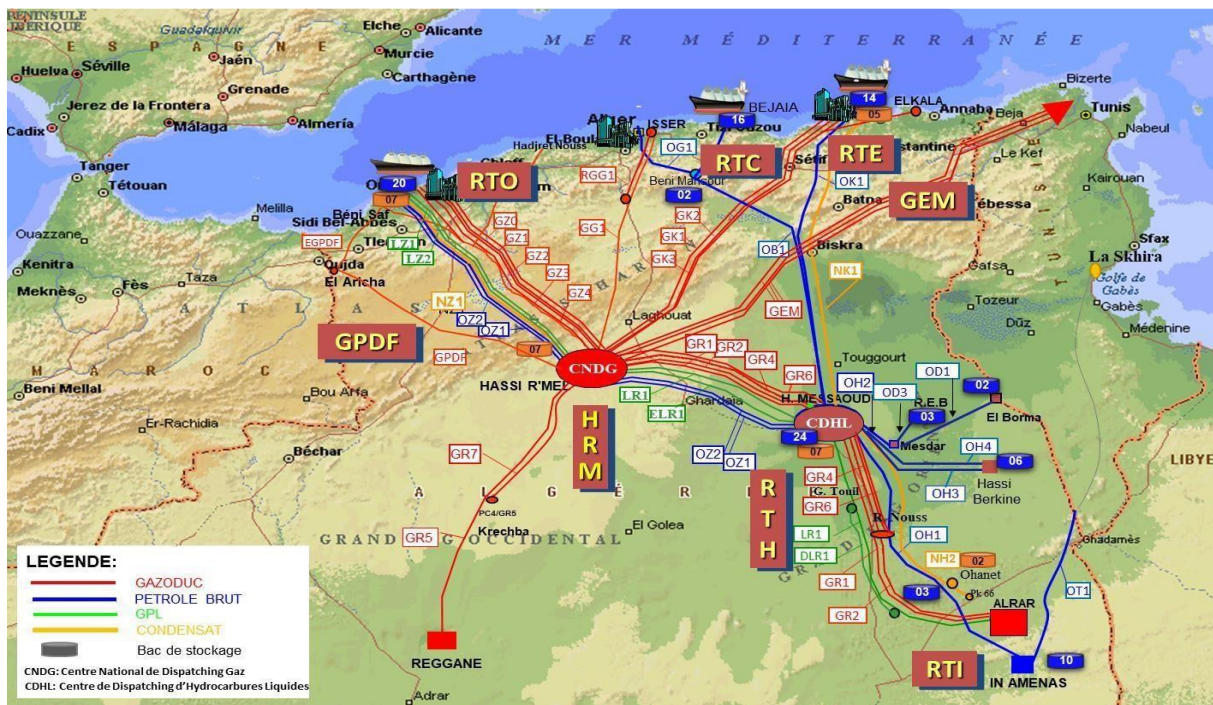


Figure I. 2: Carte du réseau de transport Algérien.

I.1.2. Patrimoine actuel :

- Une capacité de transport de 348 MTEP (Millions de Tonnes Equivalent Pétrole) ;
- 21 Systèmes de transport par canalisation d'une longueur totale de près de 18 722 km
- 82 stations de pompage et de compression ;
- 121 bacs de stockage d'une capacité utile de près de 3 090 465 TM (Tonnes Métriques)
- 03 Directions opérationnelles de maintenance ;

- 03 Bases régionales d'intervention (HEH – Barika – SP6/Tiaret) ;
- 01 Centre National de Dispatching Gaz (CNDG) ;
- 01 Centre de Dispatching des Hydrocarbures Liquides (CDHL) ;
- 01 Centre de Stockage et Transfert des Fluides (CSTF) ;

I.2. Présentation de la DRGB :

La Direction Régionale de Bejaïa, située à 2 km de la ville de Bejaïa, est l'une des 5 directions régionales de la Sonatrach, sa principale mission opérationnelle englobe le transport, la réception, le stockage et l'expédition du brut et le transport du gaz naturel, elle est rattachée directement à la division exploitation.

La DRGB s'occupe de la gestion des lignes suivantes :

- L'OB1 24" / 22" : HEH - Béjaïa.
- L'oléoduc OG1 20" : Béni Mansour vers la raffinerie d'Alger (Sidi Resine).
- Le gazoduc GG1 42" : Hassi R'mel -Bordj Menail.

I.2.1. Organigramme de la DRGB :

La direction régionale de Bejaïa est répartie comme le décrit l'organigramme suivant :

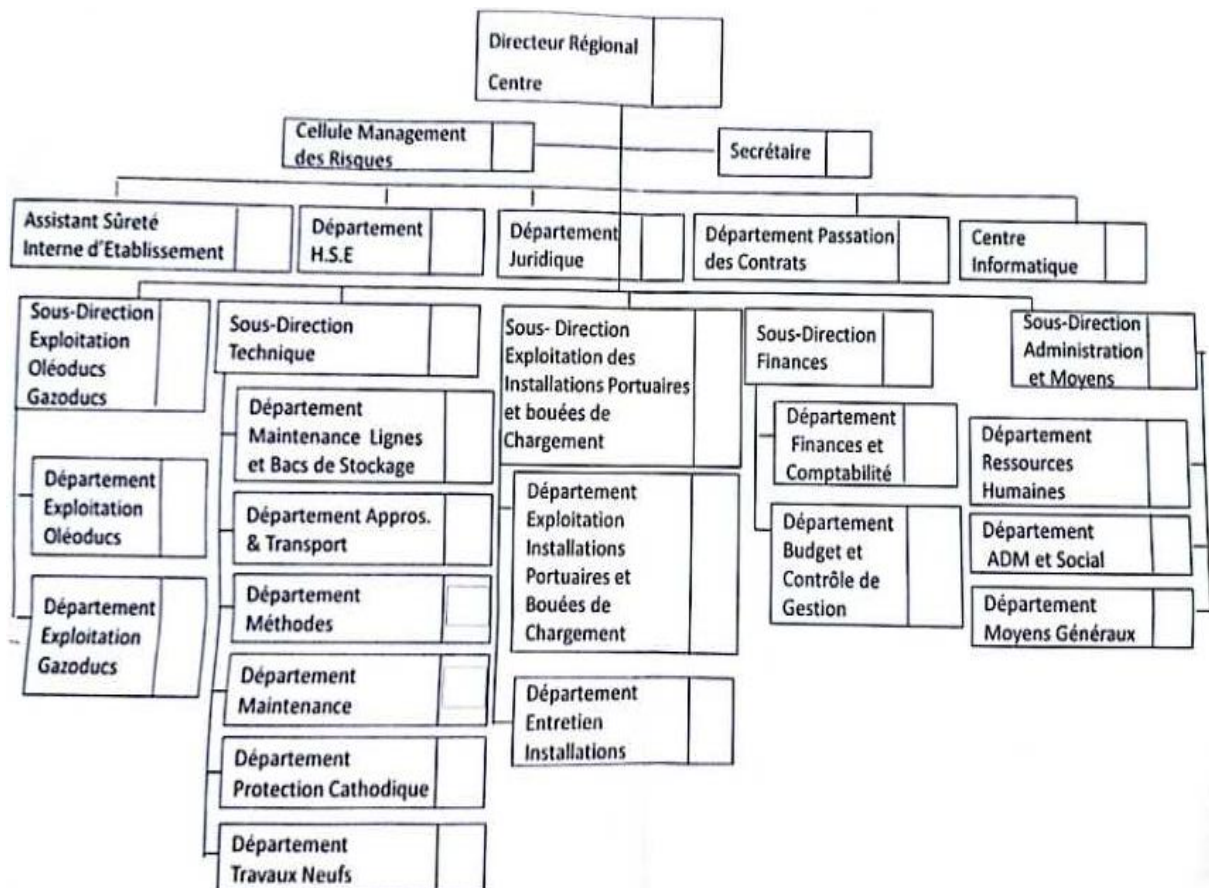


Figure I. 3 : Organigramme de la DRGB.

I.2.2. Description des Terminaux de RTC :

Le Terminal Marin de Bejaïa est divisé en deux parties sont : Terminal Nord, Terminal Sud.



Figure I. 4 : Terminaux de RTC.

I.2.2.1 Parc de stockage :

a. Le terminal nord :

Il contient 12 réservoirs à toit flottant d'une capacité de stockage de brut de 35 000 m³, et un bac 4Y1 à toit fixe de capacité de 2900 m³ pour récupérer les purges de la gare racleur arrivée et les décharges des soupapes de sécurités.

b. Le terminal sud :

Il contient 4 bacs à toits flottants de capacité volumique de 50 000 m³.

I.2.2.2 Manifold :

C'est un ensemble de canalisations et d'accessoires de vannes.

Les collecteurs du manifold ont un diamètre égal à celui de la ligne de réception, d'aspiration et d'expédition.

Le manifold permet de :

- Envoyer le liquide arrivant par la ligne vers un réservoir choisi.
- Vidanger d'un bac ou plusieurs vers le poste de chargement.
- Transférer le brut d'un réservoir à un autre.

I.2.2.3 Gare Racleur :

Elle permet la réception d'un racleur (ce dernier est un outil qu'on introduit à l'intérieur de l'oléoduc pour nettoyer les parois intérieures de la pipe).

Chaque station de pompage possède une gare racleur d'arrivée et une autre de départ.



Figure I. 5: une gare racleur.

I.2.2.4 Tour de contrôle :

C'est une salle dans laquelle on trouve les pupitres de commande pour le terminal nord et sud. C'est d'ici qu'on commande à distance l'ouverture et la fermeture des vannes des manifolds nord et sud. Cette tour occupe la salle de contrôle et la salle trafic.

I.2.2.5 Système anti incendie :

Il comprend deux bassins d'eau d'une capacité de 8 000m³ et de 600m³ qui alimentent tout le réseau anti-incendie.

I.2.2.6 Port Pétrolier :

Il est composé de :

- 03 postes de chargement.
- 02 cuves ouvertes pour recevoir le ballast d'une capacité de 12000m³.
- 02 bassins de décantation.
- 02 groupes électropompes pour le réseau incendie.
- 01 groupe moto pompe pour le réseau incendie lors d'une coupure d'électricité.



Figure I. 6: port pétrolier.

I.3. Description et historique de l'OB1 :

Le premier oléoduc installé en Algérie, connu sous le nom d'OB1, a été réalisé par la SOPEG, fondée en 1957 par la Compagnie Française de Pétrole (CFP) et la SNREPAL. Il a été mis en service en 1959 pour transporter le pétrole brut jusqu'au terminal marin de Bejaïa sur une distance d'environ 668 km. Ce pipeline part du centre de stockage de Haoudh-El-Hamra, atteignant finalement le Terminal Marin de Bejaïa (TMB). La section entre Haoudh-El-Hamra et Selatna mesure 24 pouces de diamètre, tandis que le reste du parcours vers Bejaïa est de 22 pouces.

Initialement équipé de trois stations de pompage (SP1, SP2 et SP3) avec une capacité de 12,5 millions de tonnes par an (MTA), sa capacité a été augmentée à 15 MTA en 1959 avec la construction de la station SP1bis à Djamâa. En 1969, quatre stations intermédiaires (SPA, SPB, SPC et SPD) ont été ajoutées pour atteindre une capacité de 17,8 MTA afin de répondre à la demande croissante en pétrole.

La gestion des stations principales et du Terminal Marin de Bejaia est assurée par la Direction Régionale de Bejaia (DRGB), tandis que la station SP1 est gérée par la Direction Régionale de HEH (DRGH). En 1974, le transport de condensat a commencé.

Un second oléoduc, OG1, a été construit à partir de 1970 sur une longueur de 131 km pour acheminer le brut vers la raffinerie de Sidi-Arcine à Alger. En 2005, OG1 a été remplacé par un pipeline de 20 pouces sur presque le même parcours.

Actuellement, les stations satellites ne sont plus opérationnelles, ayant cessé leurs activités respectivement en 1998 (SPA), 2007 (SPB), 2001 (SPC) et 1994 (SPD). De plus, depuis septembre 2011, l'OB1 ne transporte plus de condensat après la création de la raffinerie de Skikda, alimentée directement depuis Haoudh-El-Hamra.



Figure I. 7 : ligne OB1.

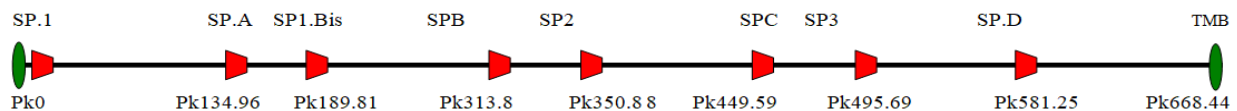


Figure I. 8 : Schéma descriptif de L'OB1.

I.3.1. Caractéristiques de L'OB1 :

Diamètre	24''/22''
Longueur	668,44 km
Épaisseurs	12,7 / 9,52 / 9,0 / 8,73 / 7,92 / 7,13 / 6,35 mm
Nuance d'acier	X42 et X52
Type d'enrobage	Brai de houille et PE (Polyéthylène)
Nombre de PS	10
Nombre de station	11
Produits transportés	Pétrole Brut et Condensat
PMS design (Bars)	83
PMS actuelle (Bars)	70
Capacité design (MTA)	14
Capacité Maximale Réelle (MTA)	11,4
Date de mise en service	10 novembre 1959
Constructeur	TRAPIL

Tableau I. 1: Caractéristiques de l'OB1.

- Topographie de l'OB1 :

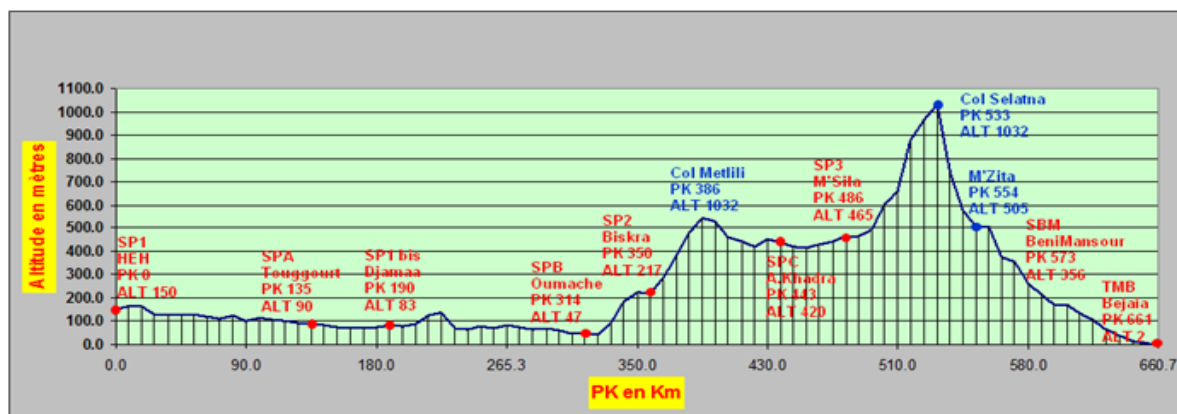


Figure I. 9: Profil en long de l'OB1.

- Variation de l'épaisseur de L'OB1 :

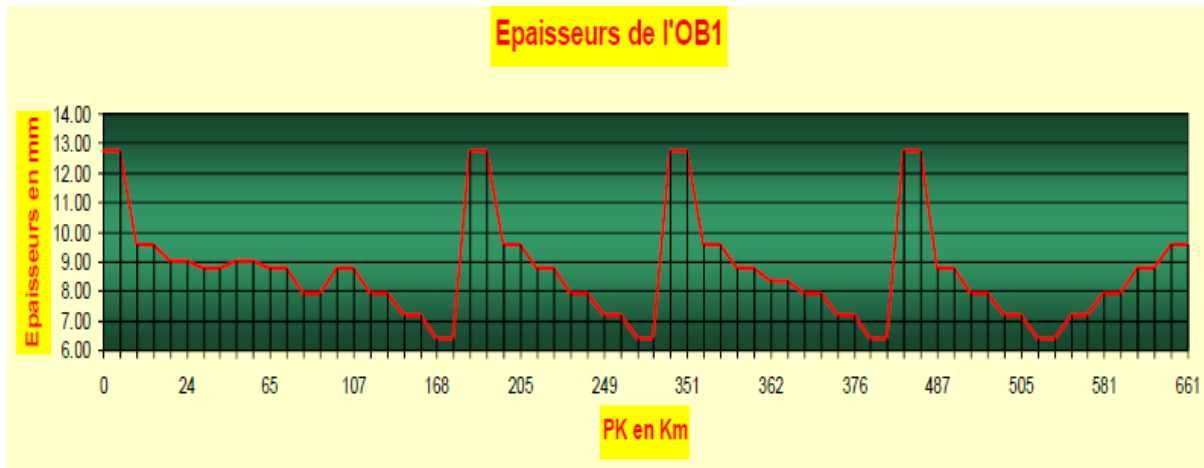


Figure I. 10 : les différentes variations de l'épaisseur de l'OB1.

I.3.2. Caractéristiques des stations :

➤ **SP1 :**

Situation géographique			Altitude (m): 150,34
			PK: 0.000 km
TP: Turbopompe Tc: Turbocompresseur EP: Electropompe MP: Motopompe	Turbine ou Moteur	Nombre	5 EP
		Constructeur	CEN
		Type	Asynchrone
		Puissance CV	10 000
	Pompe ou Compresseur	Nombre	5 pompes
		Constructeur	GUINARD
		Type	Centrifuge
Turboalternateur ou Groupe électrogène		Nombre	1
		Constructeur	SDMO
		Puissance KVA	250
Consommation			Secours

Tableau I. 2: Caractéristiques de SP1.

➤ SP1 bis :

Situation géographique			Altitude (m):83
			PK: 189,830 km
TP: Turbopompe Tc: Turbocompresseur EP: Electropompe MP: Motopompe	Turbine ou Moteur	Nombre	2 TP
		Constructeur	NuovoPignone
		Type	Turbine à gaz
		Puissance CV	13410.22 (10MW)
	Pompe ou Compresseur	Nombre	2 pompes
		Constructeur	NuovoPignone
		Type	Centrifuge
Turboalternateur ou Groupe électrogène		Nombre	2 TA
		Constructeur	Solar
		Puissance KVA	(1MW)
Consommation			Secours

Tableau I. 3: Caractéristiques de SP1 bis.

➤ SP2 :

Situation géographique			Altitude (m): 217,10
			PK: 350,489 km
TP: Turbopompe Tc: Turbocompresseur EP: Electropompe MP: Motopompe	Turbine ou Moteur	Nombre	5 EP
		Constructeur	ASP ROBICON
		Type	Asynchrone
		Puissance CV	2011.533(1500 KW)
	Pompe ou Compresseur	Nombre	5 pompes
		Constructeur	GUINARD
		Type	Centrifuge
Turboalternateur ou Groupe électrogène		Nombre	1 GE
		Constructeur	ROSSI GE
		Puissance KVA	630
Consommation			Secours

Tableau I. 4: Caractéristiques de SP2.

➤ SP3 :

Situation géographique			Altitude (m):465,20
			PK: 486.243 km
TP: Turbopompe Tc: Turbocompresseur EP: Electropompe MP: Motopompe	Turbine ou Moteur	Nombre	5 EP
		Constructeur	ASP ROBICON
		Type	Asynchrone
		Puissance CV	2145.635 (1600KW)
	Pompe ou Compresseur	Nombre	5 pompes
		Constructeur	GUINARD
		Type	Centrifuge
Turboalternateur ou Groupe électrogène		Nombre	1 GE
		Constructeur	ROSSI GE
		Puissance KVA	630
Consommation			Secours

Tableau I. 5: Caractéristiques de SP3.

➤ Terminal arrivée :

Situation géographique			Altitude (m): 2,20
			PK: 660.721 km
TP: Turbopompe Tc: Turbocompresseur EP: Electropompe MP: Motopompe	Turbine ou Moteur	Nombre	10 EP
		Constructeur	BREGUET; CEN; BSH; SW
		Type	Asynchrone
		Puissance CV	6 137
	Pompe ou Compresseur	Nombre	10 pompes
		Constructeur	GUINARD
		Type	Centrifuge
Turboalternateur ou Groupe électrogène		Nombre	1 GE
		Constructeur	PETBOW
		Puissance KVA	165
Consommation			Secours

Tableau I. 6: Caractéristiques de terminal arrivée Béjaia.

I.3.3. Caractéristiques de fonctionnement :

L'exploitation de la ligne se fait de 800 m³/h à 1800 m³/h et peut aller jusqu'à 2200 m³/h selon la demande du TMB.

Section	Débit (m ³ /h)	N° de pompe principale	N° de pompe booster	Configuration de pompe	Vitesse de rotation (tr/min)
SP1-SP2	800	01	01	En série	2950
	1100	02	02		
SP1-SP1Bis	1800	03	02		
	2200	03	03		
SP1Bis-SP2	1800	01	/	En parallèle	3970
	2200	01	/		
SP2-SP3	800	01	01	En série	2950
	1400	02	02		
	1800	03	02		
	2200	03	03		
SP3-TMB	800	01	01	En parallèle	3560
	1400	02	02		
	1800	03	02		
	2200	03	03		

Tableau I. 7: Caractéristiques de fonctionnement des stations.

Conclusion :

Ce chapitre donne une description générale de l'OB1 : tous ces composants et leurs caractéristiques. Les données présentées dans ce chapitre sont essentielles pour les calculs réalisés dans les chapitres suivants.^[1]

Chapitre II

**Approche systémique de la modélisation de la fiabilité, maintenabilité
et disponibilité des systèmes mécaniques.**

Introduction :

L'analyse de fiabilité, de maintenabilité et de disponibilité (RAM) d'un système de transport par canalisation des hydrocarbures revêt une importance capitale dans l'industrie énergétique. Ces trois aspects sont essentiels pour garantir le bon fonctionnement, la durabilité et la sécurité d'un réseau de canalisation, qui joue un rôle crucial dans le transport efficace et sécurisé des hydrocarbures.

Une analyse RAM approfondie permet de minimiser les risques d'arrêts non planifiés, de déversements ou d'autres incidents graves qui pourraient avoir des conséquences environnementales et économiques désastreuses. En utilisant des techniques telles que l'analyse des modes de défaillance, des effets, les exploitants de ce réseau peuvent prendre des décisions éclairées pour améliorer la sécurité, l'efficacité et la rentabilité de leurs opérations.

Afin d'effectuer cette analyse on commence par donner un rappel général sur les notions de fiabilité, disponibilité, et maintenabilité.

II.1. Analyse RAM :

II.1.1. Fiabilité :

II.1.1.1. Définition de la 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 ».

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.

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

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

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.1.1.2. Type de 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.

II.1.1.2.1 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 :

$R(t)$ = nombre moyen d'entités non défaillantes à l'instant 't' / nombre totale d'entités sur $[0, t]$

II.1.1.2.2 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.

II.1.1.2.3 La fiabilité extrapolée :

Déduite de la fiabilité opérationnelle par extrapolation ou interpolation pour des conditions ou des durées différentes.

II.1.1.3 Les paramètres et les indicateurs de fiabilité :**II.1.1.3. La fonction de fiabilité $R(t)$:**

C'est la probabilité de non défaillance C'est aussi la probabilité que la durée de vie T du système soit strictement supérieure à t .

$$R(t) = P(T > t) \quad (\text{II.1})$$

II.1.1.3.2 La fonction de défaillance :

Elle représente la fonction de défaillance ou la fonction de répartition associée aux durées de vie qui exprime la probabilité que le système ait une défaillance avant l'instant T , pendant l'intervalle de temps $[0, t]$.

$$F(t) = P(T \leq t) \quad (\text{II.2})$$

Cette fonction nous amène naturellement une fonction associée : la fonction de fiabilité R définie pour tout $t \geq 0$ par :

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (\text{II.3})$$

D'Où : **$F(t) + R(t)$**

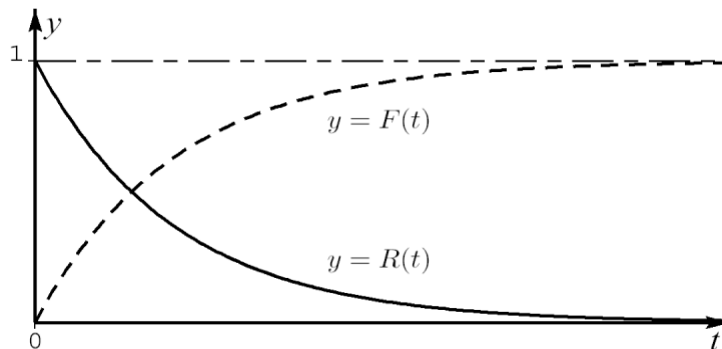


Figure II. 1 : Fonction de défaillance $F(t)$ et de fiabilité $R(t)$

II.1.1.3.3 La fonction de Densité de défaillance :

La densité de probabilité de l'instant de la défaillance T s'obtient en dérivant la fonction de Répartition $F(t)$:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (II.4)$$

Ce terme est appelé la densité de défaillance.

II.1.1.3.4 Temps moyen de bon fonctionnement Le MTBF (Mean Time Between Failure) :

Est la durée de vie moyenne du système, Est souvent traduit comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement mais représente la moyenne des temps entre deux défaillances.^[2] En d'autres termes, il correspond à l'Espérance de la durée de vie t .

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) \quad (II.5)$$

et peut être exprimé par le rapport des temps :

$$MTBF = \frac{\text{Somme des temps de bon fonctionnement entre les } n \text{ défaillances}}{\text{Nombre d'intervention de maintenance avec immobilisation}}$$

$$\checkmark \text{ Si } \lambda \text{ est constant : } MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (II.6)$$

II.1.1.3.5 Taux de défaillance $\lambda(t)$:

Est un indicateur de fiabilité qui représente :

- Soit un taux supposé constant de défaillance par unité d'usage exprimé sous la forme générale :

$$\lambda = \frac{\text{Nombre total de défaillances}}{\text{Durée d'usage}} \quad (II.7)$$

S'il est constant on le calcule comme suit :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (II.8)$$

C'est une courbe de type exponentiel résultant de l'apparition des défaillances suivant un Processus stochastique. C'est à dire avec des courbes aléatoires indépendantes du temps. Dans ce cas la fiabilité s'exprime par la relation :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (II.9)$$

- Soit la fonction $\lambda(t)$ qui représente une proportion de survivants à l'instant t , tirée d'un échantillon.
- C'est la probabilité ($0 \leq R \leq 1$) ; un produit doit accomplir de manière satisfaisante une fonction requise, sous des conditions données et pendant une période de temps donné. Le taux de défaillance à l'instant t , noté $\lambda(t)$ et s'écrit comme suite :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \right) \quad (II.10)$$

- Δt mesure la probabilité qu'une défaillance d'un dispositif se produise dans l'intervalle de temps $[t, +\infty]$ sachant que ce dispositif a bien fonctionné à l'instant Δt .

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 II.2: 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).

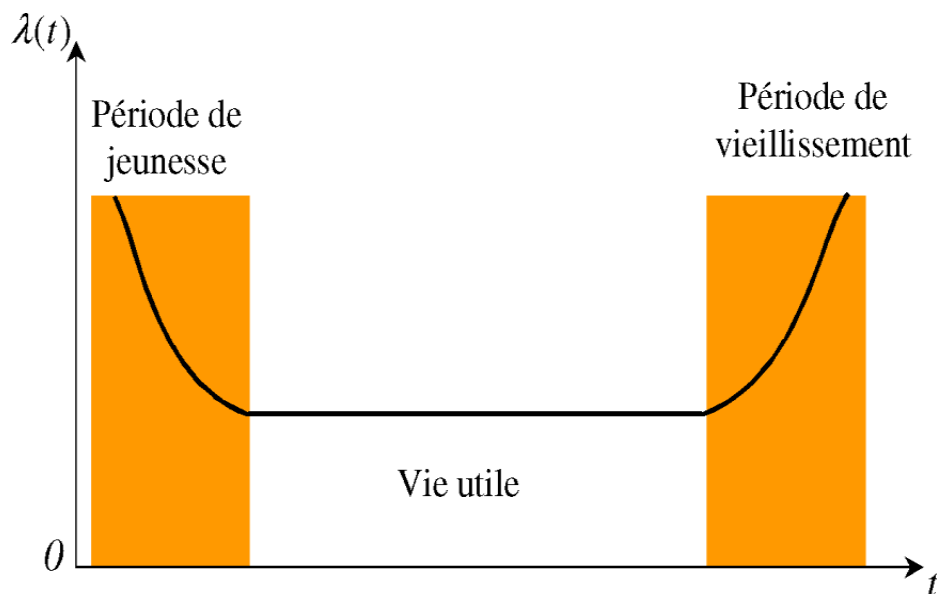


Figure II. 2: Courbe en baignoire.

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.1.2. Maintenabilité :**II.1.3.1. Définition de maintenabilité :**

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

Et 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'maintenabilité correspond à la probabilité contraire, soit :

$$\bar{M}(t) = 1 - M(t) \quad (\text{II. 11})$$

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

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

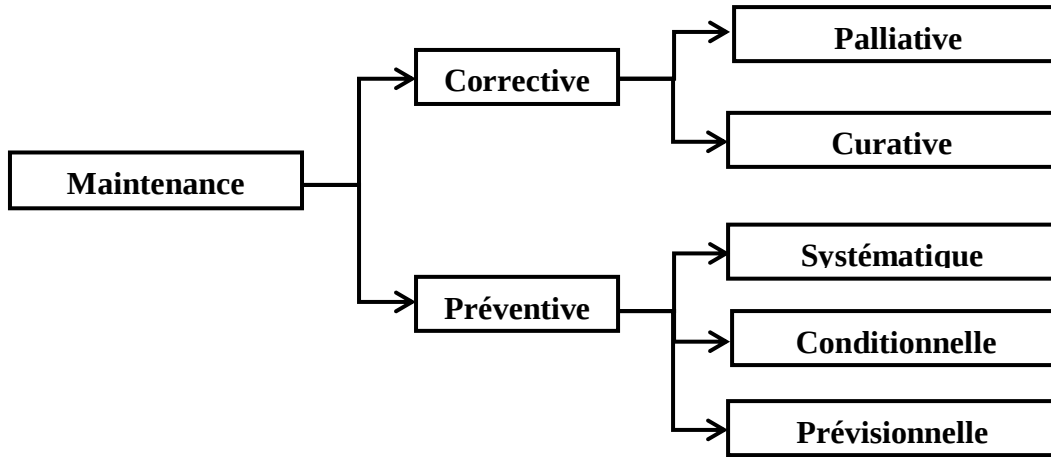


Figure II. 3: Type de maintenance.

II.1.3.2. Les types de maintenabilité :

II.1.2.2.1 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.).

II.1.2.2.2 La maintenabilité prévisionnelle :

Elle est également « construite », mais à partir de l'objectif de disponibilité.

II.1.2.2.3 La maintenabilité opérationnelle :

Elle sera mesurée à partir des historiques d'interventions.

II.1.3.3. Les paramètres et les indicateurs de maintenabilité :

II.1.2.3.1 La fonction de maintenabilité :

Maintenabilité = être rapidement dépanné

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (II. 12)$$

II.1.2.3.2 Le taux de réparation $\mu(t)$:

Le taux de réparation s'obtient par la relation suivante :

$$\mu(t) = \frac{1}{MTTR} \quad (II. 13)$$

Le taux de réparation indique l'aptitude d'un bien à être dépanné et/ou réparé. Dans le cas où il est constant la fonction de maintenabilité est :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (II. 14)$$

II.1.2.3.3 Le temps technique moyen de réparation (MTTR) (Mean Time To Repair)

Il mesure le temps moyen de réparation. Il est donné par cette relation ;

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (II. 15)$$

II.1.2.3.4 MUT (MEAN UP TIME):

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

$$MTBF = MTTR + MUT$$

II.1.3. Disponibilité :

II.1.3.1. Définition de la disponibilité :

La disponibilité est la probabilité pour qu'une entité soit en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données à instant t , en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée. On la note $D(t)$ ou $A(t)$. C'est la traduction du nom anglais : Availability.

$$A(t) = P \{ \text{Système non défaillant à l'instant} \}$$

Le fonctionnement à l'instant t ne nécessite pas forcément le fonctionnement sur $[0, t]$, pour un système réparable ; c'est là que se situe la différence fondamentale avec la fiabilité.

II.1.3.2. Les types de disponibilité :

II.1.3.2.1 Disponibilité intrinsèque :

Cette disponibilité est évaluée en prenant en compte les moyennes de bon fonctionnement et les moyennes de réparation ce qui donne :

$$Ai = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (II. 16)$$

II.1.3.2.1 Disponibilité instantanée :

Pour un système avec l'hypothèse d'un taux de défaillance λ constant et d'un taux de réparation μ constant, la disponibilité instantanée est :

$$A_{(t)} = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-t(\lambda + \mu)} \quad (II. 17)$$

II.1.5. Analyse RAM d'un oléoduc :

En règle générale, l'analyse(RAM) (Reliability, Availability, Maintainability) ou FMD (dans sa terminologie française), vise à garantir que l'ouvrage technique étudié est suffisamment fiable pour son exploitation et configuré de manière à atteindre les objectifs de production qui lui sont fixés.

Les principales données de base de l'étude sont les taux de défaillance des équipements constitutifs de l'ouvrage et de leurs taux de réparation et Comme pour tout système technique, l'analyse RAM d'un oléoduc obéit aux mêmes règles méthodologiques présentées ce qui implique une étude de fiabilité, de maintenabilité est de disponibilité.

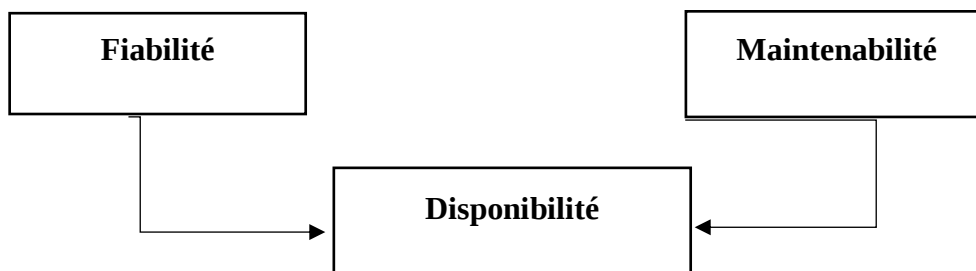


Figure II. 4 : Schéma de principe de l'analyse RAM.

Il y a lieu donc de commencer par l'identification des indices de fiabilité que sont le taux de défaillance et le taux de réparation des éléments composant l'oléoduc. En accord avec le règlement de sécurité des canalisations de transport du brut, un oléoduc est considéré comme un système mécanique qui représente un ensemble d'éléments technologiques liés par des relations statiques et dynamiques assez complexes et c'est là où réside toute la difficulté de cette étude.

Pour pouvoir y parvenir et surmonter la complexité de ce système technique (oléoduc) qu'on note système A composé d'une succession de tronçons et de quatre stations de pompes, Le système de transport OB1 sera scindé en quatre sous-systèmes qui représenteront les stations de pompes plus un autre sous système qui représente la canalisation, et afin d'éviter l'explosion combinatoire dans la modélisation on représentera chaque station de pompe par un sous-système qui inclut les 5 GEP pour sp1, sp2 et sp3 et les 2 turbopompes pour sp1-bis plus le système auxiliaire de la station, et on calculera les paramètres de fiabilité (taux de défaillance et taux de réparation) de ces sous-systèmes pour ensuite les injecter dans le système A (qui représente les stations sp1, sp3 et la canalisation en série et les stations sp2, sp1-bis en parallèle avec la canalisation) ce qui nous permettra d'établir l'analyse RAM de tout le système de transport par canalisation OB1 avec ses divers composants.

Les calculs sont effectués sous l'hypothèse que les taux de défaillance sont constants dans le temps, une hypothèse acceptable pour la plupart des composants. La détermination de la performance du système oléoduc OB1 et de ces composants est effectuée à partir des modèles développés de fiabilité et de disponibilité en utilisant des graphes de Markov et la matrice des taux de transition de ce système, leur résolution est faite via un logiciel appelé MARKOV process Wingsb en considérant que les taux de défaillance et réparation ne sont pas identiques au niveau des pompes dans les stations de pompes et un taux de défaillance du pipe (pour tous ses tronçons).

Afin d'aboutir aux résultats qui nous permettront de déterminer la performabilité de ce système on fera cette analyse pour différentes configurations de fonctionnement pour évaluer tous les scénarios possibles ce qui permettra d'avoir une approche plus précise pour évaluer la performance de l'oléoduc.^[2]

II.1.5. 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.^[5]

II.1.5.1. 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.

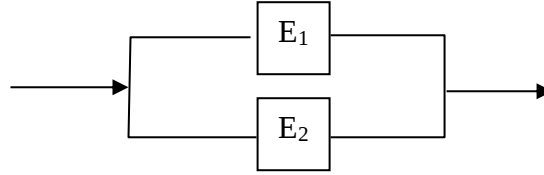


Figure II. 5 : Diagramme en parallèle.

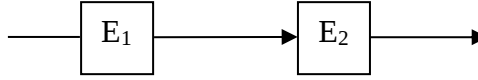


Figure II. 6 : Diagramme en série.

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.1.5.2. Etude de la disponibilité de quelques systèmes simples réparables :

II.1.5.2.1 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.

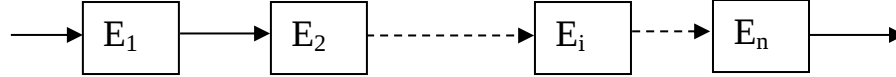


Figure II. 7 :Schéma bloc d'un système série.

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 :

$$A_S = \prod_{i=1}^n A_i \quad (\text{II. 18})$$

Dans le cas ou λ_i et μ_i sont constants, on obtient :

$$A_S = \prod_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} \quad (\text{II. 19})$$

Où :

λ_i : Taux de défaillance.

μ_i : Taux de répartition.

II.1.5.2.2 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 rend 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.

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

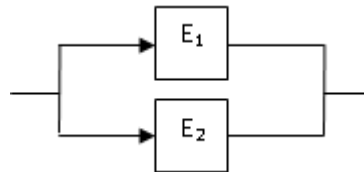


Figure II. 8:Schéma bloc d'un système parallèle à deux éléments.

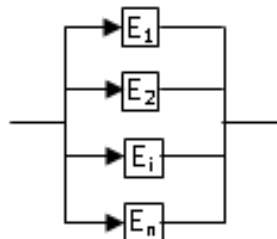


Figure II. 9: Schéma bloc d'un système Parallèle à « n » éléments.

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

$$A_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_i) \quad (\text{II. 20})$$

$$A_S = 1 - \prod_{i=1}^n \bar{A}_i \quad (\text{II. 21})$$

$$A_S = 1 - \prod_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_i}{\mu_i + \lambda_i} \right) \quad (\text{II. 22})$$

• **La redondance active partielle :**

Le système peut accepter (r/n) défaillances s'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 :

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

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

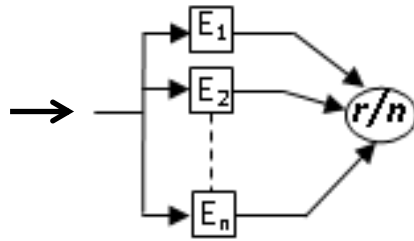


Figure II. 10:Diagramme de fiabilité d'un système r/n.

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.

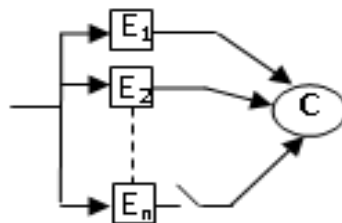


Figure II. 11 : Diagramme de fiabilité d'un système à redondance.

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	$\pi_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^l m^k \frac{\gamma^k}{k!} + m^l \sum_{k=l+1}^{m+l} \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s)}$
Probabilité que parmi les m+l éléments il y ait k éléments défectueux	$\pi_k = \begin{cases} m^k \frac{\gamma^k}{k!} \pi_0 & , \quad k \leq l \\ m^l \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s) \pi_0 & , \quad k > l \end{cases}$
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. 1: Les modèles de probabilité de panne.

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

II.2. Modélisation de la FMD de l'oléoduc OB1 :

II.2.1. Méthode de Graphe des états "graphe de Markov "

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.

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 + Δt 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 valués à l'aide de taux de transition non nuls associés aux événements qui font évoluer le système.

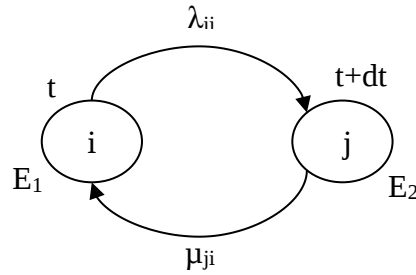


Figure II. 12 : Graphe des états.

Sur ce graphe, chaque arc (i, j) est valué 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 λ_{ij} et de l'état j à l'état i entre les instants $(t+dt)$ et t est μ_{ji} alors λ_{ij} et μ_{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).

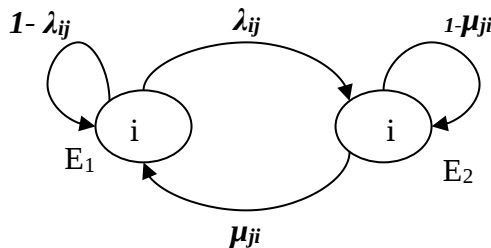


Figure II. 13: Graphe des états pour la disponibilité.

II.2.1.1. Redondance passive :

Considérons deux éléments identiques de taux de défaillance λ et de taux de réparation μ , 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.

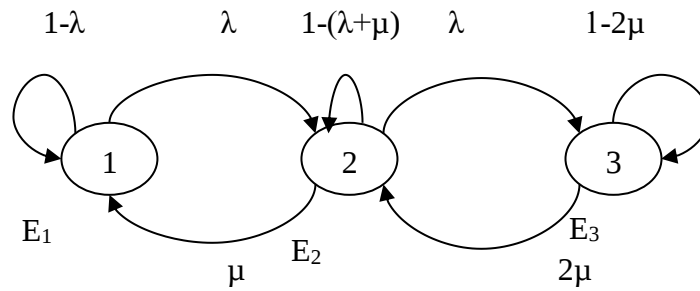


Figure II. 14: Graphe des états pour la disponibilité (redondance passive).

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 n'y a pas de réparation à l'état 3 (c'est-à-dire y a plus de retour).

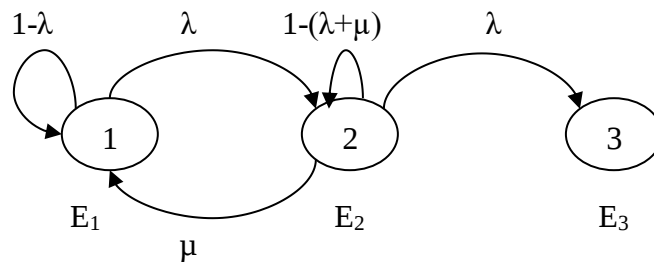


Figure II. 15: Graphe de Markov pour la fiabilité (redondance passive).

II.2.1.2. 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.

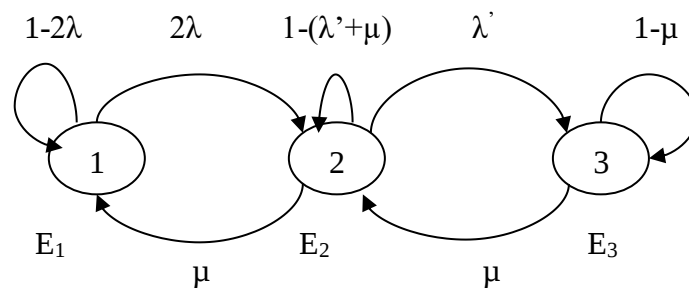


Figure II. 16 : Graphe des états pour la disponibilité (redondance active).

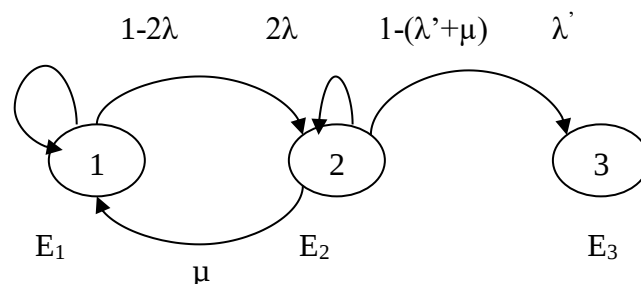


Figure II. 17 : Graphe des états pour la fiabilité (redondance active).

II.2.1.3. Equations d'état du système :

$P_i(t)$: Probabilité que le système occupe l'état i à l'instant t ;

ρ_{ij} : Taux de transition instantané de l'état i à l'état j ;

Evaluons la probabilité $P_i(t+dt)$ pour que le système occupe l'état i à l'instant $t+dt$:

$P_i(t+dt)$: probabilité que le système est dans l'état i à l'instant t et y reste dans l'intervalle dt + la somme des probabilités que le système est dans l'état j à l'instant t et dans l'état i à l'instant $(t+dt)$.

On obtient alors :

$$p_i(t+dt) = p_i(t) [1 - \sum_{j \in E - \{i\}} \rho_{ij}(t)dt] + \sum_{j \in E - \{i\}} p_j(t) \rho_{ji}(t)dt \quad (II.23)$$

D'où

$$\frac{P_i(t+dt) - P_i(t)}{dt} = -P_i(t) \sum_{j \in E - \{i\}} \rho_{ij}(t) + \sum_{j \in E - \{i\}} \rho_{ji}(t)P_j(t) \quad (II.24)$$

Nous supposons que $P_i(t)$ est différentiable. Dans ce cas on obtient :

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = -(\sum_{j \in E - \{i\}} \rho_{ij}(t))p_i(t) + \sum_{j \in E - \{i\}} \rho_{ji}(t)p_j(t) \quad (II.25)$$

Dans le cas d'un processus homogène les termes ρ_{ij} ou ρ_{ji} sont constants et $P_i(t)$ est différentiable. L'ensemble des équations différentielles constitue les équations d'état du système. Matriciellement, on obtient en supposant que $E = \{1, 2, \dots, n\}$:

$$\left[\frac{dp_1}{dt}(t), \frac{dp_2}{dt}(t), \dots, \frac{dp_n}{dt}(t) \right] = [p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)] A \quad (II.26)$$

La matrice A est appelée matrice des taux de transition.

La résolution du système peut être effectuée par un grand nombre de méthodes, nous citons :

- Résolution explicite à l'aide de la transformation de Laplace ;
- Discrétisation ;
- Calcul des valeurs propres de la matrice A et utilisation des exponentielles de matrice ;
- Utilisation du processus markovien.

La fiabilité étant la probabilité pour que le système se trouve dans un état de marche sans jamais être passé par un état de panne, il suffira de supprimer les transitions des états de panne vers les états de marche dans la matrice A pour calculer la fiabilité. C'est-à-dire, en supposant que les états de marche soient numérotés de 1 à l et les états de panne de $l+1$ à n .

$$i > l \text{ et } j \leq l \Rightarrow a_{ij} = 0 \quad (***)$$

Lorsque cette condition sera remplie, nous appellerons $P'_i(t)$ la probabilité de se trouver à l'état i à l'instant t .

Nous appellerons A' la matrice déduite d' A par application des conditions (***) et A_l , la matrice $(a_{ij}, 1 \leq i \leq l, 1 \leq j \leq l)$; la relation (II.26) et la condition (***) permettent d'écrire :^[4]

$$\left[\frac{dp'_1}{dt}(t), \frac{dp'_2}{dt}(t), \dots, \frac{dp'_l}{dt}(t) \right] = \left[p'_1(t), p'_2(t), \dots, p'_l(t) \right] A_l \quad (\text{II.27})$$

II.2.2. Méthode analytique :

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, dans cette représentation en considérant que les fonctions globales de ces 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.

II.2.2.1. 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 II.2 et II.3).

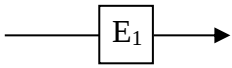
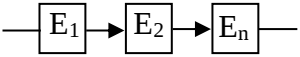
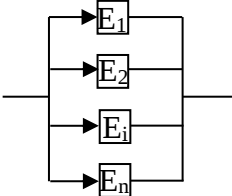
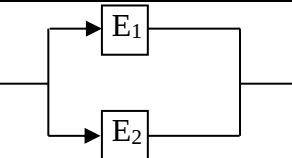
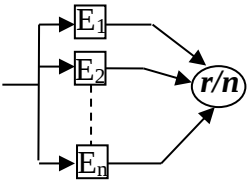
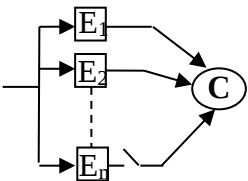
	Elément simple	$R(t) = \exp - (\lambda t)$
	Système en série à n éléments	$R = \exp \left[- \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \right) t \right]$
	Système en parallèle à n éléments	$R = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - e^{-\lambda_i t}]$
	Redondance active	$R = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$
	Redondance r/n	$R =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

Tableau II. 2: Récapitulatif des modèles de base de la fiabilité

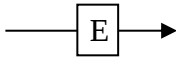
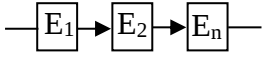
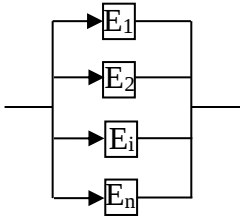
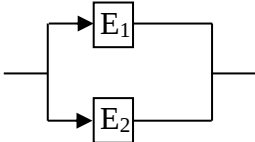
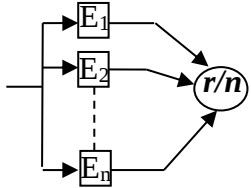
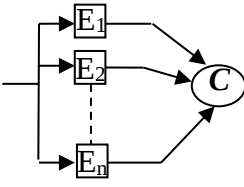
	Élément simple	$A = \frac{\mu}{\mu + \lambda}$
	Système en série à n éléments	$A = \prod_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i}$
	Système en parallèle à n éléments	$A = 1 - \prod_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_i}{\mu_i + \lambda_i} \right)$
	Redondance active	$A = \frac{\mu^2 + 2\lambda\mu}{\mu^2 + 2\lambda\mu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

Tableau II. 3: Récapitulatif des modèles de base de la disponibilité.

II.2.2.2. Modélisation de la fiabilité et disponibilité de l'oléoduc :

L'oléoduc (OB1) est composé des cinq 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 pompes sp1, sp2, sp3.
- La station de pompage sp1-bis.
- Les stations de pompes sp2 et sp1-bis en parallèle avec la canalisation.
- Le système auxiliaire en série avec les stations pompes.

Toute panne sur sp1 et sp3 (sp1 et sp3 en série avec la canalisation) entraîne l'arrêt complet de la ligne.

Toute panne sur sp2 et sp1-bis ne provoque qu'une diminution du débit c'est-à-dire un écoulement 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.

Remarque :

- Sp1, Sp2 et Sp3 ont les mêmes configurations donc elles auront le même diagramme de fiabilité (3+2).
- Sp1-bis est différente sa configuration est (1+1).

II.2.2.2.1 Reconstitution du système global (oléoduc) :

Afin de calculer la fiabilité de l'oléoduc, une reconstitution du système global est nécessaire, cette opération peut se faire en commençant à partir de niveau inférieur vers un niveau supérieur .

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

- Le taux de défaillance des pompes " λ_p ", de SA " λ_{SA} " et de la conduite " λ_C "
- Le taux de réparation de chaque élément " μ_P ", " μ_{SA} " et " μ_C ".

➤ Sous-système 1 :

Les tronçons de canalisation : la défaillance d'un tronçon de la canalisation provoque la défaillance totale de l'oléoduc, donc les blocs qui représentent les 4 tronçons de la canalisation sont placés en série.



Figure II. 18 : Diagramme de fiabilité du sous-système1.

- **La fiabilité :**

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

$$R = \exp[-(\sum_{i=1}^n \lambda_i)t] \quad (II.28)$$

Sachant que on un système en série à 4 éléments :

$$R = \exp \left[- \left(\sum_{i=1}^4 \lambda_i \right) t \right] \quad (\text{II. 29})$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = \lambda_c \quad (\text{II.30})$$

D'où :

$$R_{Ss1}(t) = e^{-\lambda_c \cdot t} \quad (\text{II.31})$$

- **La disponibilité :**

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

$$A = \prod_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} \quad (\text{II. 32})$$

$$A_{Ss1} = \prod_{i=1}^4 \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i}$$

D'autre part on a :

$$A_{Ss1} = A_c = \frac{\mu_c}{\mu_c + \lambda_c} \quad (\text{II. 33})$$

On obtient :

$$\mu_c = \lambda_c \frac{\prod_1^N \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i}}{1 - \prod_1^N \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i}} \quad (\text{II. 34})$$

➤ **Système auxiliaire 2 :**

La défaillance d'un système auxiliaire dans une station de pompage (par exemple un problème électrique avec une disjonction de la station ou un problème au niveau du système d'air instrument ou bien au niveau : des vannes, des soupapes ...) ne provoque pas la défaillance totale de l'oléoduc si la station en question ne représente pas un élément indispensable.

Pour chaque système auxiliaire (élément simple) :

- **La fiabilité :**

Pour un élément simple :

$$R_{Ss2}(t) = e^{-\lambda_{SA} t} \quad (\text{II. 35})$$

- **La disponibilité :**

$$A_{Ss2} = \frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} \quad (\text{II. 36})$$

➤ Sous-système 3 (SP1, SP2 et SP3)

Il est constitué du système auxiliaire et le sous-système pompes.

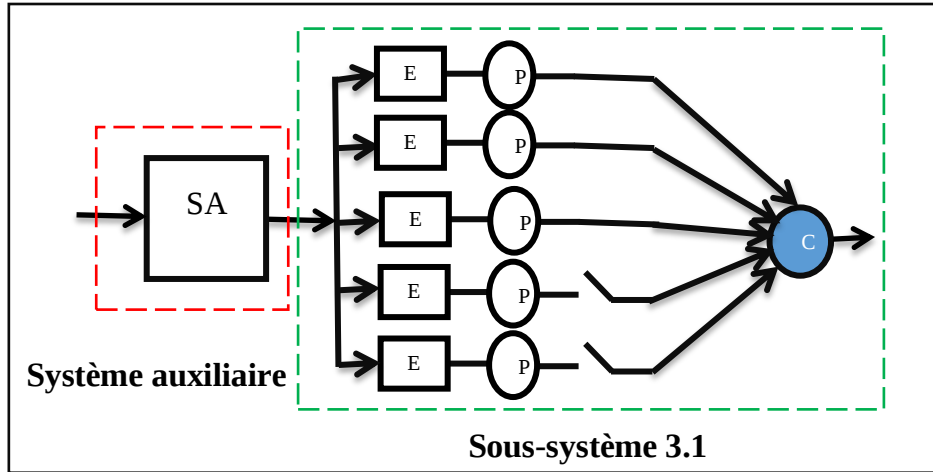


Figure II. 19 :Diagramme de fiabilité du sous-système3.

- **Sous-système 3.1:**

Les GEP : La défaillance d'une pompe dans les stations de pompage n'entraîne pas l'arrêt des stations, donc le diagramme de fiabilité représentant les 5 pompes d'une SP (sp1, sp2,) en série et (sp3) en parallèle sont représentées en parallèle d'un point de vue fiabilité.

- **La fiabilité :**

On peut déduire la valeur de λ_{SP} en utilisant le graphe de Markov pour une configuration (3+2) :

$$R_{Ss3.1}(t) = \exp(-\lambda_{SP} * t) \quad (II.37)$$

- **La disponibilité :**

Sachant que la somme des probabilités des différents états du système est égale à 1, donc la disponibilité du sous-système 3.1 est égale :

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

La valeur de l'indisponibilité des pompes est la probabilité de défaillance totale des pompes (P_6 déduite par graphe de Markov en chapitre IV :

$$\bar{A}_{Ss3.1} = P_6$$

D'où :

$$A_{Ss3.1} = 1 - P_6 \quad (II.38)$$

Donc pour le système3

- La fiabilité :

$$R_{Ss3} = R_{Ss2} * R_{Ss3.1}$$

$$R_{Ss3} = R_{SA} * R_{SP} = e^{-\lambda_{SA} * t} * e^{-\lambda_{SP} * t}$$

$$R_{Ss3} = e^{-(\lambda_{SA} + \lambda_{SP})t} \quad (II. 39)$$

- La disponibilité :

$$A_{Ss3} = A_{Ss2} * A_{Ss3.1}$$

$$A_{Ss3} = A_{SA} * A_{SP}$$

$$A_{Ss3} = \frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} * (1 - P6) \quad (II. 40)$$

- Sous-système 4 (SP1 bis) :

La station est constitué un système auxiliaire et sous-système pompes.

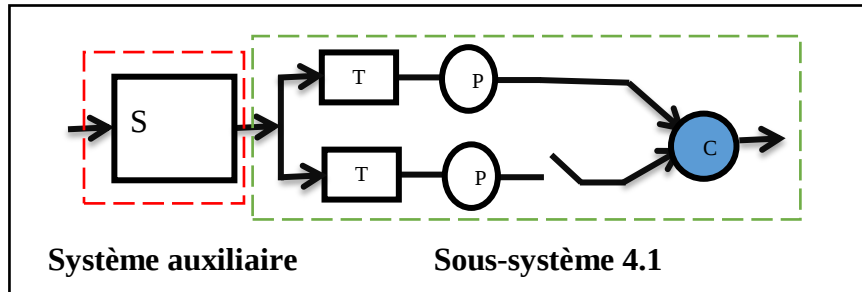


Figure II. 20 : Diagramme de fiabilité du sous-système4.

- Sous-système 4.1 :

La défaillance d'une turbopompe dans la station de pompage n'entraîne pas l'arrêt du station, donc les blocs qui représentent les 2TP de Sp1-bis sont placés en parallèle.

- La fiabilité :

On peut déduire la valeur de λ_{TP} en utilisant le graphe de Markov pour une configuration

$$(1+1) : \quad R_{Ss4.1}(t) = \exp(-\lambda_{SP} * t) \quad (II. 41)$$

- La disponibilité :

Sachant que la somme des probabilités des différents états est égale à 1, donc la disponibilité du sous-système 4.1 est obtenue comme suit.

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

La valeur de l'indisponibilité des turbopompes est la probabilité de défaillance totale des turbopompe (P_2 déduite par graphe de Markov en chapitre IV) :

$$\bar{A}_{Ss4.1} = P_3$$

D'où:

$$A_{Ss4.1} = 1 - P_3 \quad (II.42)$$

Donc pour le sous- système4 (SP1 bis)

- La fiabilité :

$$R_{Ss4} = R_{Ss2} * R_{Ss4.1}$$

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

$$R_{Ss4} = e^{-(\lambda_{SA} + \lambda_{SP})t} \quad (II.43)$$

- La disponibilité :

$$A_{Ss4} = A_{Ss2} * A_{Ss4.1}$$

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

$$A_{Ss4} = \frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} * (1 - P_3) \quad (II.44)$$

- Sous- système 5 :

Le sous-système 5 correspond à SP1 bis, SP2 et les tronçons de conduite installées en parallèle. De ce fait, il suffit que l'un des trois sous-systèmes est en bon état de fonctionnement pour que le sous-système 5 fonctionne.

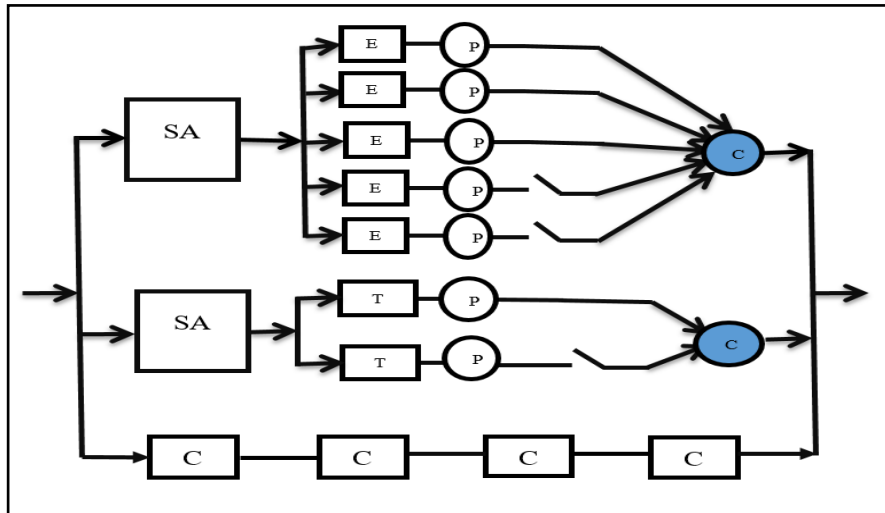


Figure II. 21: Diagramme de fiabilité du sous-système5.

- La fiabilité :

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - e^{-\lambda_i t}] \quad (\text{II.45})$$

$$R_{Ss5} = 1 - ((1 - R_{Ss1}) * (1 - R_{Ss3})) * (1 - R_{Ss4}) \quad (\text{II.46})$$

$$R_{Ss5} = 1 - ((1 - e^{-\lambda_{Ss1} * t}) * (1 - e^{-\lambda_{Ss3} * t}) * (1 - e^{-\lambda_{Ss4} * t}))$$

$$R_{Ss5} = e^{-\lambda_{Ss3} * t} + e^{-\lambda_{Ss4} * t} - e^{-(\lambda_{Ss4} * \lambda_{Ss3}) * t} + e^{-\lambda_{Ss1} * t} - e^{-(\lambda_{Ss1} * \lambda_{Ss3}) * t} - e^{-(\lambda_{Ss1} * \lambda_{Ss4}) * t} + e^{-(\lambda_{Ss1} * \lambda_{Ss3} * \lambda_{Ss4}) * t} \quad (\text{II.46})$$

Sachant que :

$$\lambda_{Ss5} = \frac{1}{\text{MTTF}_{Ss5}}$$

D'autre part :

$$\text{MTTF} = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (\text{II.47})$$

$$\text{MTTF} = \int_0^{\infty} R_{Ss5}(t) dt$$

$$\text{MTTF} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_{Ss3} * t} + e^{-\lambda_{Ss4} * t} - e^{-(\lambda_{Ss4} * \lambda_{Ss3}) * t} + e^{-\lambda_{Ss1} * t} - e^{-(\lambda_{Ss1} * \lambda_{Ss3}) * t} - e^{-(\lambda_{Ss1} * \lambda_{Ss4}) * t} + e^{-(\lambda_{Ss1} * \lambda_{Ss3} * \lambda_{Ss4}) * t} dt$$

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda_{Ss3}} + \frac{1}{\lambda_{Ss4}} - \frac{1}{\lambda_{Ss4} + \lambda_{Ss3}} + \frac{1}{\lambda_{Ss1}} - \frac{1}{\lambda_{Ss1} + \lambda_{Ss3}} - \frac{1}{\lambda_{Ss1} + \lambda_{Ss4}} + \frac{1}{\lambda_{Ss1} + \lambda_{Ss3} + \lambda_{Ss4}} \quad (\text{II.48})$$

$$\lambda_{Ss5} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{Ss3}} + \frac{1}{\lambda_{Ss4}} - \frac{1}{\lambda_{Ss4} + \lambda_{Ss3}} + \frac{1}{\lambda_{Ss1}} - \frac{1}{\lambda_{Ss1} + \lambda_{Ss3}} - \frac{1}{\lambda_{Ss1} + \lambda_{Ss4}} + \frac{1}{\lambda_{Ss1} + \lambda_{Ss3} + \lambda_{Ss4}}} \quad (\text{II.49})$$

Avec :

$$\lambda_{Ss1} = \lambda_c$$

$$\lambda_{Ss3} = \lambda_{SA} + \lambda_{SP}$$

- La disponibilité :

On a l'indisponibilité des sous-systèmes :

$$\bar{A}_{Ss4} = 1 - A_{Ss4} = 1 - \left(\frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} * (1 - P3) \right) \quad (\text{II.50})$$

$$\bar{A}_{Ss3} = 1 - A_{Ss3} = 1 - \left(\frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} * (1 - P6) \right) \quad (\text{II.51})$$

$$\bar{A}_{Ss1} = 1 - A_{Ss1} = 1 - \frac{\mu_c}{\mu_c + \lambda_c} \quad (\text{II.52})$$

Pour que le sous-système 5 soit indisponible il faut que la SP1bis et SP2 et la canalisation

soient indisponibles :

$$\bar{A}_{Ss5} = \prod_{i=1}^3 (1 - A_{ssi}) \quad (\text{II.53})$$

$$A_{Ss5} = 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - A_{ssi}) \quad (\text{II.54})$$

➤ Le système global :

il suffit que l'un des trois premiers sous-systèmes (.....) (soit défailtent pour que le système global (l'oléoduc) soit défailtent.

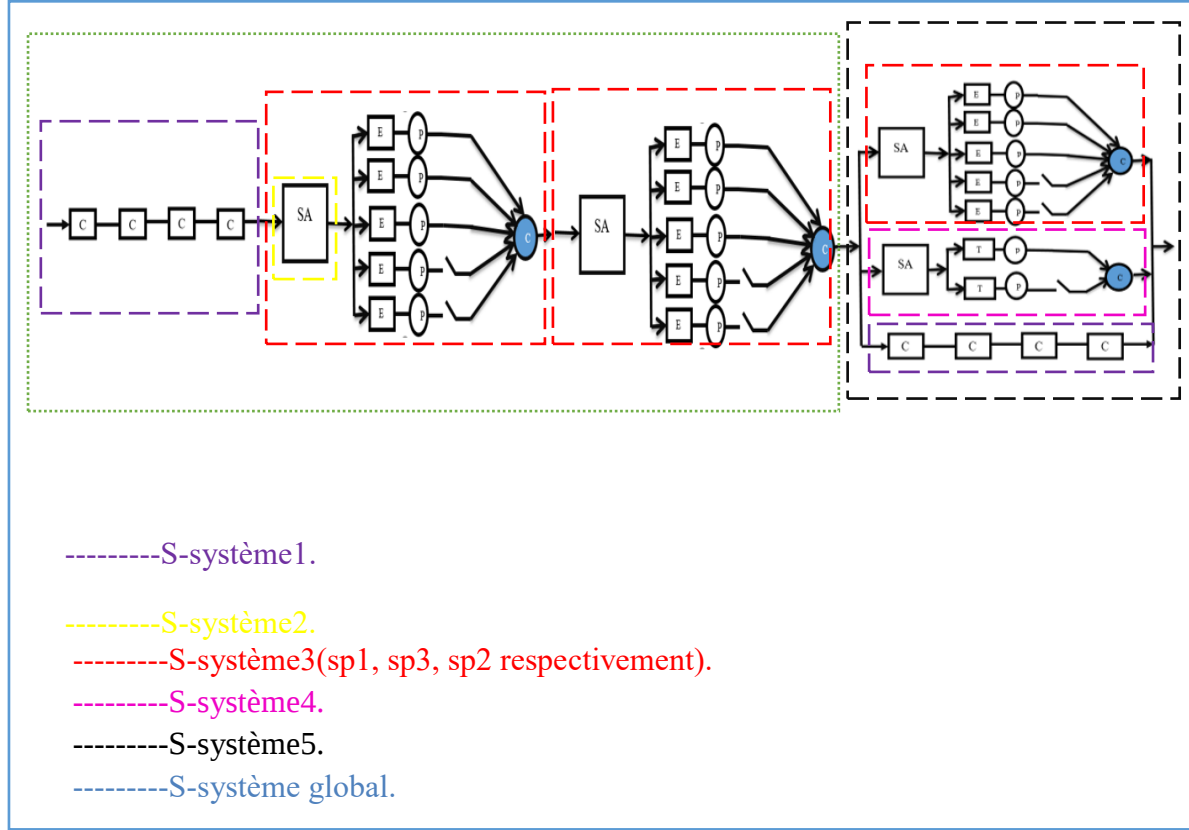


Figure II. 22: Diagramme de fiabilité du système global.

- La fiabilité du système global :

La canalisation principale est en série avec le sous-système3 (sp1et sp3) et le sous-système 5.

$$R_{Sg} = R_{Ss1} * R_{Ss3(sp1)} * R_{Ss3(sp3)} * R_{Ss5} \quad (II.55)$$

$$R_{Sg}(t) = e^{-\lambda_{Ss1} * t} * e^{-2\lambda_{Ss3} * t} * e^{-\lambda_{Ss5} * t} \quad (II.56)$$

Le modèle final de fiabilité de l'oléoduc s'écrit alors comme suit :

$$R_{Sg}(t) = e^{-\lambda_g * t} \quad (II.57)$$

Avec :

$$\lambda_g = \lambda_C + 2\lambda_{SA} + 2\lambda_{SP} + \lambda_{Ss5} \quad (II.58)$$

Avec :

λ_C : taux de défaillance de la canalisation.

λ_{SA} : taux de défaillance du système auxiliaire.

λ_{sp} : taux de défaillance des stations pompes.

- **La disponibilité du système global :**

La disponibilité de l'oléoduc OB1 correspond au produit des disponibilités des canalisations des stations SP1, SP3 et du sous-système 5 étant donnée qu'ils sont en série :

$$A_{Sg} = A_{Ss1} * A_{Ss3} * A_{Ss3} * A_{Ss5} \quad (II.59)$$

La disponibilité de l'oléoduc sera alors :

$$A_{Sg} = \frac{\mu_c}{\mu_c + \lambda_c} * 2 * \left(\frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} * (1 - P6) \right) * \left(1 - \left(\frac{\mu_c}{\mu_c + \lambda_c} * \left(\frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} * (1 - P3) \right) * \left(\frac{\mu_{SA}}{\mu_{SA} + \lambda_{SA}} * (1 - P6) \right) \right) \right) \quad (II.60)$$

Avec :

λ_c : taux de défaillance de la canalisation.

μ_c : taux de réparation de la canalisation.

λ_{SA} : taux de défaillance de système auxiliaire.

μ_{SA} : taux de réparation de système auxiliaire.

- **La maintenabilité du système global :**

On a la maintenabilité d'oléoduc :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu_g * t} \quad (II.61)$$

On peut déduire le taux de réparation μ_g d'après la formule de disponibilité d'oléoduc :

$$A_g = \frac{\mu_g}{\mu_g + \lambda_g} \longrightarrow \mu_g = \frac{A_g * \lambda_g}{1 - A_g} \quad (II.62)$$

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

**Approche systémique de la modélisation de la
performabilité**

Introduction :

Il n'est pas rare de rencontrer des systèmes susceptibles de cumuler des caractéristiques élevées de fiabilité intrinsèque et, paradoxalement, des capacités de production médiocres (l'inverse n'étant pas concevable).

Dans ce cas l'étude séparée de la fiabilité et des capacités de production d'un système ne nous fournit qu'une vue partielle et partielle des performances du système.

Il est donc très important d'englober la fiabilité et la capacité d'un système dans un même paramètre pour avoir une connaissance exacte du système.

La performabilité est donc le paramètre le mieux adapté pour juger des performances d'un système car il regroupe en lui-même les deux aspects les plus importants du système.

III.1. La performabilité :

La performabilité est un concept introduit par John Meyer (1985) pour mesurer la performance des réseaux informatiques, peu à peu ce concept a été mis à contribution pour l'évaluation de nombreux systèmes industriels (nucléaires, réseaux télécoms, réseaux électriques...).

La performabilité des systèmes est une notion composite qui intègre les paramètres de fiabilité avec la notion de performance. La notion de performabilité est essentielle pour les systèmes dégradables, qui sont des systèmes sûrs fonctionnant en mode opérationnel avec une performance optimisée lorsqu'il n'y a pas des pannes, mais pouvant montrer une dégradation de leur performance en présence de dysfonctionnements ou de pannes de leurs composants, tout en continuant à fonctionner dans un mode dégradé. L'analyse de la performance d'un système est habituellement considérée comme la qualité de service que ce système fournit en mode opérationnel.^[6]

III.2. Différence entre fiabilité et performabilité :

L'étude de la fiabilité ne prend pas en compte les capacités et le fonctionnement du système étudié. Elle considère comme paramètres d'entrées que les taux de défaillance et taux de réparation des éléments qui composent le système. Ce qui constitue un inconvénient majeur car l'impact de deux éléments ayant les mêmes taux de défaillance et de réparation peut s'avérer différent d'un système à un autre, contrairement à l'analyse de performabilité qui non seulement prend en compte les aspects de fiabilité mais aussi les mesures de performance (les capacités en débit des éléments du système), elles donnent une analyse plus fine du comportement des systèmes considérés.

III.3. Modèle de performabilité :

La complexité des systèmes de transport par canalisation demande une vérification rigoureuse de leurs paramètres de performabilité, c'est-à-dire de fiabilité et de régime de fonctionnement, d'une part pour s'assurer que ces systèmes sont fiables (évaluation des états de pannes et d'arrêts), et d'autre part pour vérifier que leur performance est en adéquation avec la spécification de leurs exigences (le débit exigé par les consommateurs). Le modèle de performabilité donné pour ces systèmes est un modèle qui permet de coupler les deux sous modèles.

- Le modèle de fiabilité (processus de structure d'état).
- Le modèle de débit.

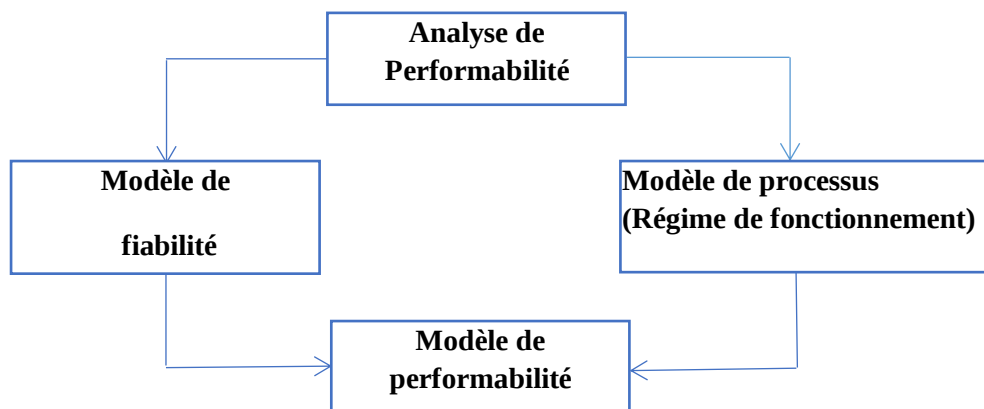


Figure III. 1: Modèle de performabilité.

III.3.2. Modèle de fiabilité :

Il représente le comportement du système (bon fonctionnement, panne, arrêt) sur la base des taux de défaillance et de réparation.

On modélise les états de défaillance possibles avec le graphe de Markov du système global.

III.3.2. Modèle de processus :

Il est obtenu à partir du calcul hydraulique de l'oléoduc et représente les débits de chaque état possible de fonctionnement. ^[7]

III.3.2.1. Calcul hydraulique d'un oléoduc :

III.3.2.1.1. Dimensionnement de la canalisation :

1. Diamètre et l'épaisseur du pipeline :

Le diamètre et l'épaisseur d'une canalisation sont déterminés en fonction du débit, la pression du produit transporté (viscosité, densité), et la puissance de pompage nécessaire tout en respectant le budget d'investissement qui doit être déterminé dans une étude technico-économique.

- **L'épaisseur moyenne d'une conduite :**

Elle est déterminée par la formule suivante :

$$\delta_{\text{moy}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\delta_i \times l_i)}{L_T} \quad (\text{III. 1})$$

δ_{moy} : Epaisseur moyenne de la conduite en (mm).

δ_i : Epaisseur d'un tronçon i en (mm).

L_i : Longueur d'un tronçon i en (mm).

L_T : Longueur totale en (mm).

- **Le diamètre intérieur d'une conduite**

Il est déterminé par la formule suivante :

$$D_{\text{int}} = D_{\text{ext}} - 2 \times \delta_{\text{moy}} \quad (\text{III. 2})$$

D_{int} : Diamètre intérieur pondéré la conduite en (mm).

D_{ext} : Diamètre extérieur la conduite en (mm).

δ_{moy} : Epaisseur moyenne de la conduite en (mm).

2. Pression maximale admissible de service (PMS) :

La pression maximale admissible de service (PMS) d'une canalisation peut être définie comme une pression maximale dans les conditions d'exploitation normale que le pipeline peut supporter sans provoquer aucune déformation de métal de la canalisation. Selon la norme Algérienne.

La pression maximale admissible de service est définie avec la formule suivante :

$$P_{\text{ms}} = \frac{2 \times [\sigma] \times \delta_{\text{moy}}}{D_{\text{ext}}} \quad (\text{III. 3})$$

P_{ms} : Pression maximale admissible de la canalisation exprimée en (MPa).

δ_{moy} : Epaisseur moyenne de la canalisation en (mm).

D_{ext} : Diamètre extérieur nominal en (mm).

σ : Contrainte admissible (la plus grande contrainte que l'on peut créer dans le métal sans causer des accidents).

On définit la contrainte admissible en tenant compte des coefficients de sécurité à partir de la contrainte d'élasticité ou de rupture.

$$[\sigma] = K_e \times \sigma_e \quad (\text{III.4})$$

$$[\sigma] = K_r \times \sigma_r$$

K_e , K_r : coefficients de sécurité.

σ_e : limite d'élasticité.

σ_r : limite de rupture.

Les valeurs de limite élasticité et de rupture sont données par l'usine de fabrication des tubes.

- **Spécification API :**

Spécification A.P.I	Grade	Limite d'élasticité Kgf/mm ²	Limite de rupture Kgf/mm ²
5L	A	21	34
5L	B	25	42
5LX	X42	29	42
5LX	X46	32	45
5LX	X52	37	47
5LX	X56	39	52
5LX	X60	41	55
5LX	X65	46	56
5LX	X70	49	60

Tableau III. 1: Les limites d'élasticité et de rupture de l'acier.

Les coefficients de sécurité sont fixes dans les règlements de sécurité, le règlement pour les hydrocarbures liquides définit 3 zones d'utilisation :

- **Zone I :** Comprend les emplacements qui se trouve dans les agglomérations urbaines, ou bien près des locaux isolés à usage des habitations occupant du personnel à poste fixe ou fréquent par le publique.
- **Zone II :** Comprend les emplacements situés dans les zones rurales, les pâturages, les terrains d'agriculture, les forêts et les approches d'agglomérations.
- **Zone III :** Comprend les terrains inhabitées, Sahara et autres régions désertique et les parties du tracé qui sont situées à plus 1km des habitants.

On distingue les coefficients de sécurité comme suit :

Zone	Liquide		Gaz	
	Ke	Kr	Ke	Kr
I	0,675	0,47	0,6	0,36
II	0,75	0,59	0,72	0,55
III	0,82	0,65		

Tableau III. 2: les coefficients de sécurité.

-La pression maximale admissible de service (PMS) est fixée comme étant la pression normale d'exploitation majorée d'une tolérance de 10%.

$$P_{ms} = 1,1 \times P_s \quad (\text{III. 5})$$

P_s : Pression de service en (MPa).

III.3.2.1.2. Formules du calcul hydraulique :

Dans cette partie on va présenter les formules principales pour étudier l'écoulement dans les conduites ainsi que l'évaluation des paramètres qui leurs caractérisent.

1. Débit et vitesse d'écoulement :

Il est donné d'habitude en million de tonnes par an (MTA). En définissant le débit en m³/h ou m³/s, on suppose que le pipeline fonctionne 350 jours /an et le reste (15 jours) consacré à la maintenance.

$$Q_s = \frac{Q_a}{350 \times 24 \times 3600} \quad (\text{III. 6})$$

Q_a : débit annuel.

Et on a :

$$Q = S \times \omega \quad (\text{III. 6. a})$$

$$S = \frac{\pi \times D_{int}^2}{4} \quad (\text{III. 6. b})$$

$$\omega = \frac{4 \times Q}{\pi \times D_{int}^2} \quad (\text{III. 6. c})$$

Q : le débit de fonctionnement en (m³/s).

ω : La vitesse moyenne de fluide en (m/s).

S : section interne de conduit en (m²).

D_{int} : Diamètre intérieur de la conduite en (m).

2. Régime d'écoulement d'un fluide :

Le régime d'écoulement d'un fluide est défini comme étant la façon de déplacement des particules d'un fluide dans une conduite.

On distingue deux régimes d'écoulement :

- **Régime laminaire :**

Quand l'écoulement se fait par filet parallèle c'est-à-dire que les lignes de courant sont toutes parallèles à l'axe de la conduite. On parle alors d'écoulement stratifié. Il se produit dans les canalisations ou la vitesse d'écoulement est faible.

- **Régime turbulent :**

Apparaît lorsqu'il y a formation de tourbillons dans le liquide pour des vitesses d'écoulement élevées. Cet écoulement chaotique apparaît au centre de la conduite alors que sur le périphérique on distingue une couche limite laminaire.

On distingue trois zones de régime turbulent :

- Régime turbulent hydrauliquement lisse.
- Régime turbulent frottement mixte.
- Régime turbulent tube rugueux (régime quadratique).

- **Nombre de Reynolds (Re) :**

Il représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses, il caractérise le régime d'écoulement d'un fluide et selon sa valeur on distingue le type d'écoulement, on le définit de la manière suivante :

$$Re = \frac{\omega \times D_{int}}{\nu} \quad (III. 7)$$

Re : Nombre de Reynolds.

ω : La vitesse moyenne de fluide en (m/s).

D_{int} : Diamètre intérieur de la conduite en (m).

ν : Viscosité cinématique du produit en (m²/s).

- **Les nombres de Reynolds critique :**

Les nombres de Reynolds critiques représentent des seuils caractéristiques au-delà desquels un changement significatif dans le régime d'écoulement d'un fluide se produit. Ils sont des indicateurs de transition entre différents types d'écoulements.

$$Re_{cr1} = \frac{59,5}{\varepsilon^7} \quad (III. 8)$$

$$Re_{cr2} = \frac{665 - 765 \times \log(\varepsilon)}{\varepsilon} \quad (III. 9)$$

Avec :

$$\varepsilon = \frac{2 \times e}{D_{int}} \quad (III. 10)$$

Si $Re < 2320$: l'écoulement est laminaire.

Si $Re_{cr1} > Re > 2320$: l'écoulement est turbulent hydrauliquement lisse.

Si $Re_{cr1} < Re < Re_{cr2}$: l'écoulement est turbulent frottement mixte.

Si $Re > Re_{cr2}$: l'écoulement est turbulent tube rugueux (régime quadratique).

3. Les pertes de charge :

3.1 Perte de charge locale (singulière H_s) :

C'est la perte de pression locale au niveau des différents équipements telle que les vannes, les clapets, les rétrécissements de la conduite, on la détermine par la formule suivante :

$$H_s = \sum \xi \frac{\omega^2}{2g} \quad (III. 11)$$

H_s : Les Pertes de charge locale en (m).

ξ : Le Coefficient de perte de charge.

ω : La vitesse moyenne de fluide en (m/s).

3.2 Perte de charge linéaire (H_L) :

C'est la perte de pression due au frottement du liquide avec les parois intérieures de la canalisation durant un écoulement, la formule du calcul des pertes de charge est comme suite :

$$H_L = \frac{\lambda \times L \times \omega^2}{2 \times g \times D_{int}} \quad (III. 12. a)$$

$$H_L = \frac{8 \times \lambda \times L \times Q^2}{g \times \pi^2 \times D_{int}^5} \quad (III. 12. b)$$

H_L : les pertes de charge du frottement en (m).

λ : Coefficient de perte de charge.

L : Longueur du tronçon en (m).

Q : Débit de la ligne en (m³/s).

D_{int} : Diamètre intérieur de la conduite en (m).

g : Accélération de la pesanteur (9,81 m/s²).

Les pertes de charge locales pour les grandes longueurs de conduite peuvent être estimées comme suit :

$$H_s = (0,01 \text{ à } 0,02) \times H_L \quad (\text{III. 13})$$

❖ **Coefficient de perte de charge λ :**

λ est un coefficient sans dimension appelé coefficient de perte de charge linéaire.

Le calcul des pertes de charge repose entièrement sur la détermination de ce coefficient.

		0	2320	R_{ecr1}	R_{ecr2}
Régime	Laminaire	Turbulent			
		Tube lisse	Frottement mixte	Quadratique (tube rugueux)	
Formule	Formule de Stocks	Formule de Blasius	Formule d'Altchoulle	Formule d'Altchoulle	
Lambda	$\lambda = \frac{64}{Re}$	$\lambda = 0.3164 * Re^{-0.25}$	$\lambda = 0.11 \left(\frac{\epsilon}{2} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25}$	$\lambda = 0.11 \left(\frac{\epsilon}{2} \right)^{0.25}$	

Tableau III. 3: Régimes d'écoulements et Coefficient de perte de charge λ .

3.3 Perte de charge totale :

Donc les pertes de charge totales (H_{tot}) sont :

$$H_{tot} = 1,02 \times H_L \quad (\text{III. 14. a})$$

$$H_{tot} = \frac{0,084\lambda \times L \times Q^2}{D_{int}^5} \quad (\text{III. 14. b})$$

4. Caractéristique d'une conduite :

On appelle la caractéristique hydraulique d'une conduite la dépendance qui existe entre le débit qui passe par la conduite et les pertes de charge correspondantes.

On peut écrire : $H_{ref} = 1,02 \times H_L + \Delta Z + H_{asp} \quad (\text{III. 15. a})$

$$H_{ref} = H_T + \Delta Z + H_{asp} \quad (\text{III. 15. b})$$

H_{ref} : Charge de refoulement totale en (m).

H_{asp} : Hauteur finale à l'arrivée en (m).

ΔZ : Différence des hauteurs en (m).

H_T : les Pertes de charges totales en (m)

❖ **Pression hydrostatique :**

Elle design la force exercée par un liquide, on l'a représenté par la formule suivante :

$$P = \rho \times g \times H \quad (\text{III. 16})$$

H : Hauteur manométrique (m).

g : Accélération de la pesanteur en (m/s²).

ρ : Masse volumique de liquide pompé en (kg/m³).

❖ **Courbe caractéristique du réseau :**

La courbe caractéristique du réseau est la représentation graphique de la hauteur manométrique totale (H) nécessaire à l'installation en fonction du débit.

$$H = f(Q)$$

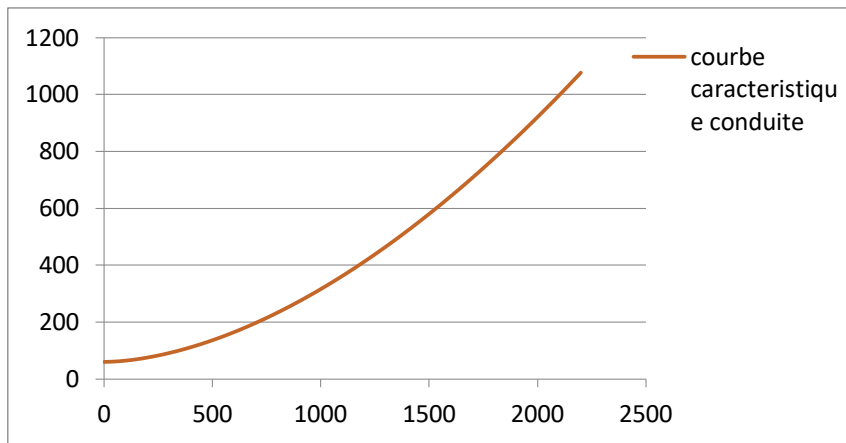


Figure III. 2: Courbe caractéristique du réseau.

5. Pente hydraulique (i) :

Elle représente la perte de charge par unité de longueur de la conduite.

La pente hydraulique est donnée par la formule suivante :

$$i = tg\alpha = \frac{H_T}{L_T} = \frac{8,16 \times \lambda \times Q^2}{\pi^2 \times g \times D_{int}^5} \quad (\text{III. 17})$$

i : Pente hydraulique.

α : Angle d'inclinaison de la pente par rapporte à l'horizontal en (°).

Donc :

$$H_{ref} = i \times L_T + \Delta Z + H_{asp} \quad (\text{III. 18})$$

6. Caractéristique d'une station pompage :

6.1 Caractéristique d'une pompe centrifuge :

La pompe centrifuge est un dispositif crucial dans de nombreux secteurs industriels, commerciaux et résidentiels pour déplacer les fluides. Fonctionnant grâce à la force centrifuge produite par la rotation d'une roue ou d'un rotor, ses principales caractéristiques :

- Sa vitesse de rotation.
- Sa courbe caractéristique, hauteur d'élévation-débit : $H=(Q)$.
- Son rendement.
- Sa puissance absorbée.
- Sa capacité d'aspiration requise exprimée par son NPSH requis en fonction du débit et de diamètre de la roue.

6.2 Courbe caractéristique de la pompe :

Cette courbe est établie sur un banc d'essai pour un prototype de pompe puis fournie à l'exploitant pour une adaptation au réseau, la courbe est établie selon la loi suivante :

$$H_p = a - bQ^2 \quad (\text{III. 19})$$

Avec :

H_p : Hauteur manométrique totale de la pompe en (m).

a, b : Constantes qui caractérisent la pompe.

Q : Débit développé par la pompe en (m^3/h).

La caractéristique de la pompe est représentée dans la figure ci-dessous :

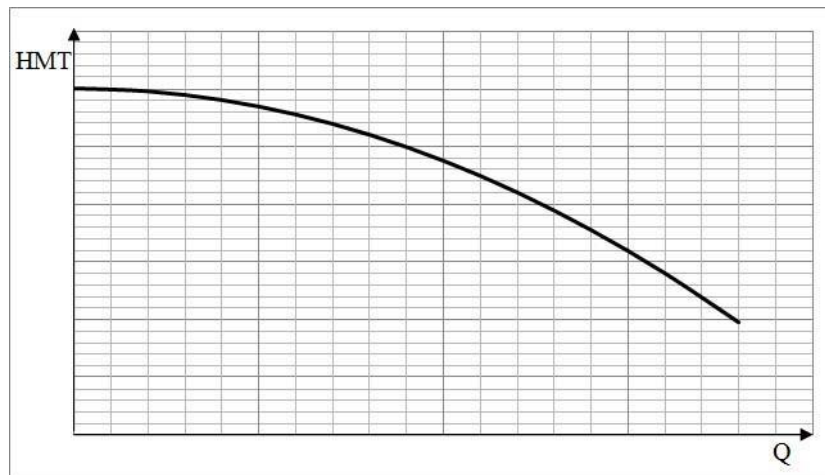


Figure III. 3: Courbe caractéristique de la pompe.

6.3 Rendement de la pompe (η_p) :

Le rendement est une grandeur sans dimension caractérisant le rapport entre l'efficacité énergétique d'un système et son efficacité théorique maximale.

$$\eta_p = \eta_{max} \times [1 - (1 - (\frac{Q_p}{Q_{nom}}) \times (\frac{n_{nom}}{n_p}))^2] \quad (III. 20)$$

η_p : Rendement de la pompe qui correspond au débit et la hauteur manométrique de la pompe.

Q_p : Le débit de la pompe en (m³/s).

n_p : La vitesse de rotation de la pompe en (tour/min).

Q_{nom} : Le débit nominal de la pompe en (m³/s).

n_{nom} : La vitesse de rotation maximale de la pompe en (tour/min).

η_{max} : Le rendement maximal de la pompe qui correspond au débit et hauteur nominal.

6.4 Puissance absorbée par la pompe (puissance exigée) :

C'est la puissance hydraulique communiquée au liquide lors de son passage à travers la pompe, cette puissance est donnée par la formule suivante :

$$N_{exg} = \frac{Q \times \rho \times g \times H}{\eta_p} \quad (III. 21. a)$$

Avec :

N_{exg} : Puissance transmise au fluide par la pompe en (Watt).

Q : Débit en (m³/s).

ρ : Masse volumique de liquide pompé en (kg/m³).

g : Accélération de la pesanteur en (m/s²).

H : Hauteur manométrique de la pompe en (m).

η_p : Rendement de la pompe.

La puissance du moteur d'entraînement est déterminée par la formule suivante :

$$N = 1.1 \div 1,2 N_{exg} \quad (III. 21. b)$$

6.5 Le NPSH :

NPSH est l'abréviation de l'expression anglaise « Net-Positive-Suction-Head », encore appelée « hauteur d'aspiration nette positive » ou « hauteur totale de pression de retenue ». Le NPSH est rattaché au phénomène de cavitation. De même que la hauteur d'élévation, le débit et la puissance absorbée, il représente pour une pompe une des données les plus importantes.

On distingue le NPSH de l'installation (NPSHa OU NPSHdisponible) et le NPSH de la pompe (NPSHr ou NPSHnécessaire). En comparant simplement les deux valeurs NPSHdisp et NPSHnécess, il est possible de déterminer si la pompe choisie pour l'installation concernée est adaptée ou non.

Pour que la pompe fonctionne sans cavité on doit avoir : $NPSH_{disp} > NPSH_{nécess}$.

Cette condition doit être remplie sur la totalité du domaine de fonctionnement admissible de la pompe.

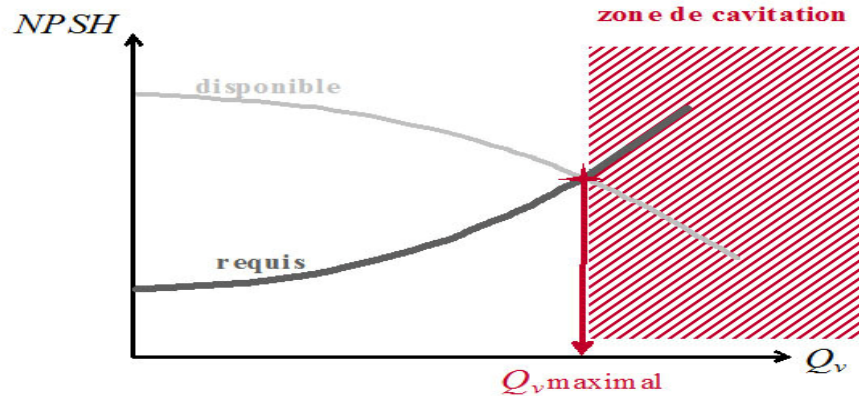


Figure III. 4: Le NPSH requis et disponible d'une pompe.

6.6 Assemblage des pompes :

Assemblage en série (pompes identiques) :

L'assemblage en série des pompes est une technique utilisée dans divers domaines pour augmenter la pression d'un fluide. Dans ce type d'arrangement, plusieurs pompes sont placées les unes après les autres, de sorte que le fluide passe à travers chacune d'entre elles avant de sortir. Cela permet d'augmenter la pression du système.

$$H_p = \sum_{i=1}^n (a - b \times Q^2) \quad (\text{III. 22})$$

Avec :

n : le nombre des pompes en parallèle.

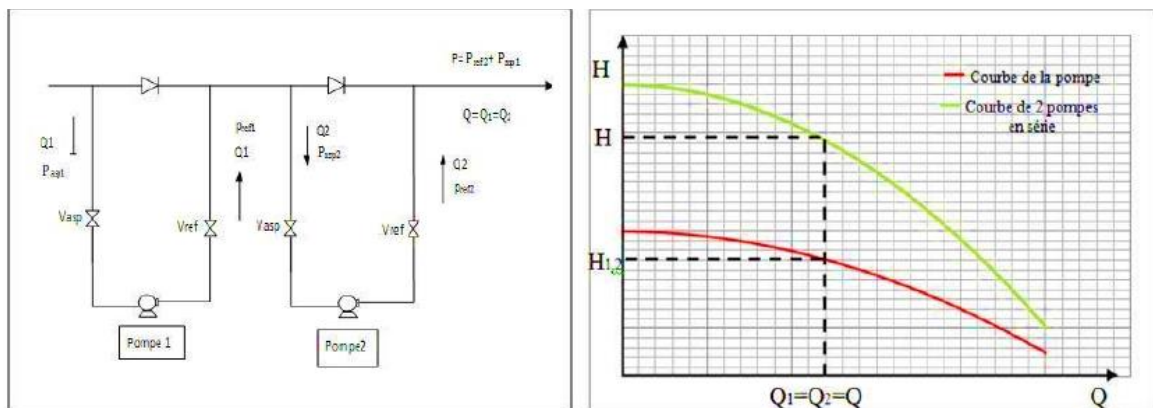


Figure III. 5: Assemblage des pompes en série.

Assemblage en parallèle (pompes identiques) :

L'assemblage en parallèle des pompes est une technique couramment utilisée pour augmenter le débit d'un système de pompage. Dans ce type d'arrangement, plusieurs pompes sont placées côte à côte, et chacune est connectée à la source de fluide et à la sortie du système. Lorsque les pompes fonctionnent ensemble, elles combinent leur débit pour fournir un débit total plus élevé.

$$H_p = a - b \times \left(\frac{Q}{n}\right)^2 \quad (\text{III. 23})$$

n : le nombre des pompes en parallèle.

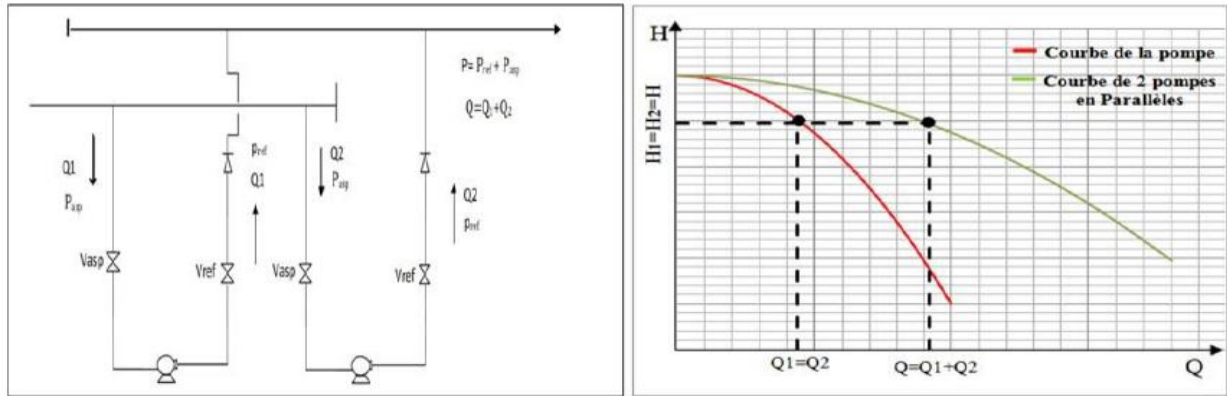


Figure III. 6: Assemblage des pompes en parallèle.

6.7 La charge refoulement de station (la charge disponible) :

Représente la charge totale fournie par la station de pompage

$$H_{ref} = H_{al} + nH_{PP} + H_{pb} \quad (\text{III. 24})$$

H_{al} : La charge manométrique absorbé par les pompes boosters et elle représente aussi la charge d'aspiration de la station exprimée en (m).

H_{pb} : Charges des pompes boosters en (m).

H_{pp} : Charge de pompe principale en (m).

n : Le nombre des pompes principales.

7. Point de fonctionnement :

Il correspond au point d'intersection entre la courbe caractéristique de la pompe et celle du système, c'est un point d'équilibre où l'énergie reçue par le fluide à travers la roue est consommée par la conduite.

$$H_{exigée} = H_{disponible}$$

$$H_T + \Delta Z + H_{asp} = H_{al} + nH_{PP} + H_{pb} \quad (\text{III. 25})$$

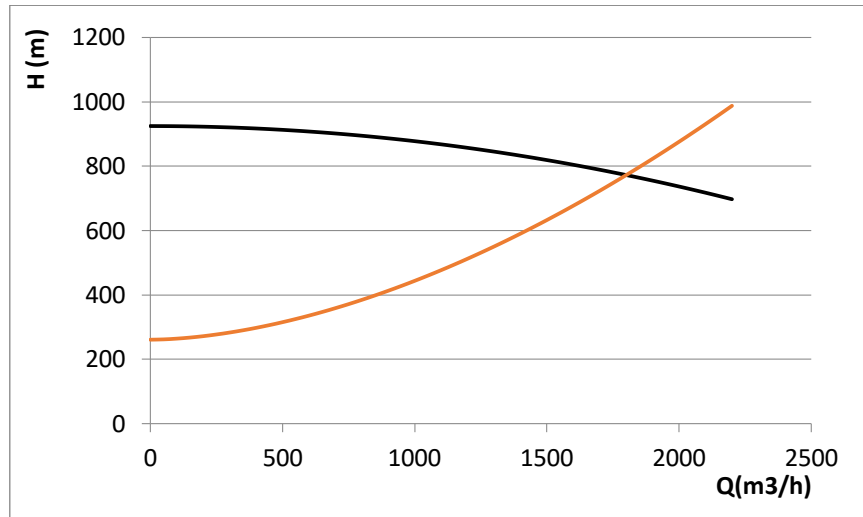


Figure III. 7: Point de fonctionnement.

8. Méthode de régulation sur un pipeline :

- Réduction du temps de pompage.
- Le vannage.
- Régulation par rognage de roue de la pompe.
- Régulation par construction d'une looping.
- Régulation par variation de la vitesse de rotation de la pompe.
- Régulation du nombre de pompe dans la station.

8.1 La variation de vitesse de rotation :

Cette méthode consiste à faire varier la vitesse de rotation, à cet effet on cherche une vitesse n_2 .

$$\frac{Q_x}{Q} = \frac{n_x}{n} \quad ; \quad \frac{H_x}{H} = \left(\frac{n_x}{n}\right)^2 \quad ; \quad \frac{N_x}{N} = \left(\frac{n_x}{n}\right)^3 \quad (III. 26)$$

Q, H, N : débit, charge et puissance correspond à la vitesse de rotation n .

Q_x, H_x, N_x : débit, charge et puissance correspond à la vitesse de rotation n_x .

La détermination de la vitesse de rotation n_x est obtenue par la relation suivante :

$$n_x = n_{nom} \times \sqrt{\frac{H'_{pp} + b \times Q_{pp}^2}{a}} \quad (III. 27)$$

Connaissant n_x le nombre de tours, il est possible de tracer la caractéristique de la pompe pour cette vitesse de rotation.

$$H'_{pp} = a_x - b \times Q^2 \quad \text{avec} \quad a_x = a \left(\frac{n_x}{n} \right)^2 \quad (\text{III. 28})$$

Sachant que :

$$H'_{pp} = \frac{H_{ref} - H_{pb} - H_{al}}{n} \quad (\text{III. 29})$$

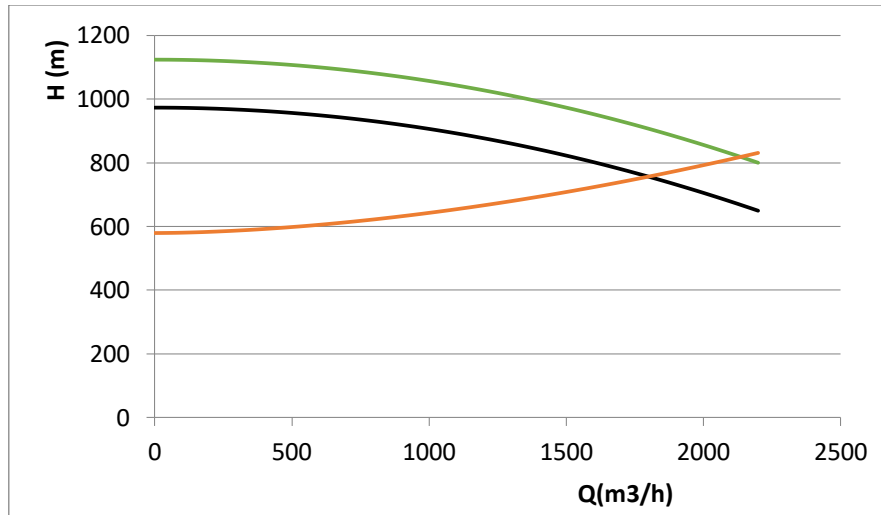


Figure III. 8: point de fonctionnement avant et après la régulation de vitesse.

8.2 Méthode de régulation du nombre de pompe :

Cette méthode est la plus simple, elle consiste à diminuer ou augmenter le nombre de pompe à mettre en fonctionnement selon le besoin.

Conclusion :

Dans cette étude, la notion de performabilité passe l'établissement du modèle de processus d'un système de transport par canalisation (l'ouvrage déjà décrit) dans le but d'établir une évaluation de la productivité de cet ouvrage.

Chapitre IV

**Evaluation de fiabilité, maintenabilité et disponibilité du
système de transport par canalisation OB1**

Introduction :

L'évaluation de la fiabilité ou de la disponibilité des systèmes réparables est rendue difficile à cause de la dépendance introduite entre les éléments par la conjugaison de la possibilité de réparation propre à chaque élément isolé et de l'impossibilité pour le système d'être remis en service après défaillance.

Bien entendu, la majorité des systèmes seront remis en service après défaillance et dans ce cas, on peut également s'intéresser à la densité de défaillance dans le processus de renouvellement du système en fonction du temps. Nous montrerons la relation qui existe entre cette densité de défaillance et le taux de défaillance du système.

Les méthodes analytiques font appel à une modélisation par les processus stochastiques. Le système dont on désire évaluer la fiabilité et la disponibilité est constitué de n éléments réparables possédant un certain nombre d'états.

IV.1. Modélisation et Evaluation de la fiabilité et disponibilité du système :

IV.1.1. Evaluation de la disponibilité et de la fiabilité d'un système SP de configuration (1+1) :

IV.1.1.1. Par graphe de Markov (cas identique) :

- **Disponibilité :**

En 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 sont régis par une loi exponentielle.

λ : Taux de défaillance = $0.00007052h^{-1}$

μ : Taux de réparation = $0.025188917h^{-1}$

A : Élément en BEF

A : Élément en panne

A_a : Élément à l'arrêt en BEF

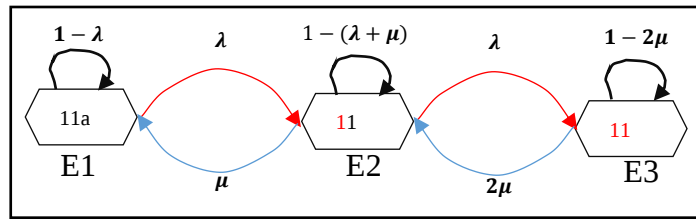


Figure IV. 1: Graphe des états de la disponibilité de configuration (1+1) cas identique

- 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

—→ λ : Si le système passe d'un état de fonctionnement à un état de panne (partiel ou total) ce taux de transition sera un taux de panne.

←— μ : si le système passe d'un état de panne (partiel ou total) à un état de fonctionnement le taux de transition est un taux de réparation.

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

a/ Interprétation du graphe :

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

$$\begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda & 0 \\ \mu & 1-(\lambda+\mu) & \lambda \\ 0 & 2\mu & 1-2\mu \end{bmatrix}$$

Chaque état est défini par une équation différentielle représentant la probabilité pour que le système occupe l'état, alors le système d'équations différentielles correspondant est le suivant :

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = (1-\lambda)P_1(t) + \mu P_2(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda P_1(t) + (1-(\lambda+\mu))P_2(t) + 2\mu P_3(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda P_2(t)(1-2\mu)P_3(t) \end{cases}$$

b/ La résolution de ce système d'équations :

Comme on a système d'équation linéaire donc pour les conditions initiales 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 MARKOV PROCESSUS donne les probabilités suivantes :

$$P_1 = 0,9972 \quad ; \quad P_2 = 0,0028 \quad ; \quad P_3 = 3,90805E-06$$

c/ La disponibilité du système :

$$A_S = P_1 + P_2 = 1 - P_3$$

$$A_S = 0,999996092$$

- **Fiabilité :**

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

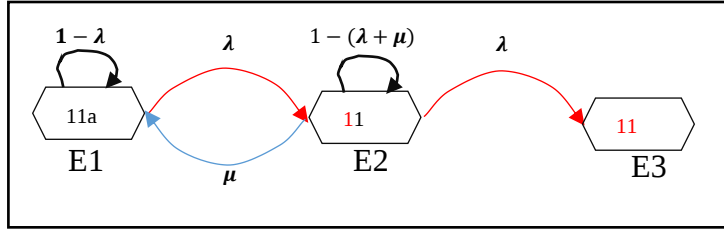


Figure IV. 2: Graphe des états de la fiabilité de configuration (1+1) cas identique.

a/ **Interprétation du graphe :**

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

$$\begin{bmatrix} 1 - \lambda & \lambda & 0 \\ \mu & (1 - (\lambda + \mu)) & \lambda \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Remarque : dans toutes les matrice de fiabilité que ce soit dans le cas identique au non identique, il faut mettre les (1) en avant pour que le logiciel MARKOV PROCESSUS puisse faire la résolution de système.

$$\begin{bmatrix} 1 - \lambda & \lambda & 0 \\ \mu & (1 - (\lambda + \mu)) & \lambda \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Le système d'équations différentielles correspondant est le suivant :

$$\begin{cases} \frac{dP'_1(t)}{dt} = (1 - \lambda)P'_1(t) + \mu P'_2(t) + P'_3(t) \\ \frac{dP'_2(t)}{dt} = \lambda P'_1(t) + (1 - (\lambda + \mu))P'_2(t) \\ \frac{dP'_3(t)}{dt} = \lambda P'_2(t) \end{cases}$$

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 :

$$P'_1 = 0,9972198 \quad ; \quad P'_2 = 2,78E-03 \quad ; \quad P'_3 = 1,96332E-07$$

c/ La fiabilité du système :

$$R(t) = e^{-\lambda t} = R_s = P'_1 + P'_2 = 1 - P'_3 = 0,9999998$$

$$\lambda = P'_3 = 1,96332E-07 \text{ h}^{-1}$$

IV.1.1.2. Calcul de la disponibilité par le modèle de YACIN (1+1) :

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 :

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

En considérant les mêmes hypothèses de cas de Markov identique :

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

λ : Taux de défaillance $0,00007052 \text{ h}^{-1}$

μ : Taux de réparation $= 0,025188917 \text{ h}^{-1}$

γ : Modèle de Yacin $= 2.799643986 \times 10^{-3}$

m : Nombre d'éléments principaux $= 1$

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

A.N :

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

$$s_0 = m^k \frac{\gamma^k}{k!} = 1^0 \frac{(2.799643986 \times 10^{-3})^0}{0!} = 1$$

$$s_1 = m^k \frac{\gamma^k}{k!} = 1^1 \frac{(2.799643986 \times 10^{-3})^1}{1!} = 0,002799644$$

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

$$S_2 = m^l \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s) = 1^1 \frac{(2.799643986 \times 10^{-3})^2}{2!} (1-0) = 3,919E-06$$

Donc :

$$\pi_0 = \frac{1}{S_0 + S_1 + S_2} = \frac{1}{1 + 0,002799644 + 3,919E-06} = 0,997204275$$

a/ Les probabilités des différents états :

$$P_1 = S_0 \pi_0 = 0,997204275$$

$$P_2 = S_1 \pi_0 = 0,002791817$$

$$P_3 = S_2 \pi_0 = 3,90805E-06$$

c/ La disponibilité du système :

$$A_s = P_1 + P_2 = 0,999996092$$

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

IV.1.1.3. Par graphe de Markov cas (Non identiques) :

En 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.

λ_1 : Taux de défaillance 1 = 0,00007052h⁻¹

λ_2 : Taux de défaillance 2 = 0,00007052h⁻¹

μ_1 : Taux de réparation 1 = 0,025188917 h⁻¹

μ_2 : Taux de réparation 2 = 0,025188917 h⁻¹

λ_{SA} : Taux de défaillance de système auxiliaire = 0,00001 h⁻¹

μ_{SA} : Taux de réparation de système auxiliaire = 0,125h⁻¹

- **Disponibilité :**

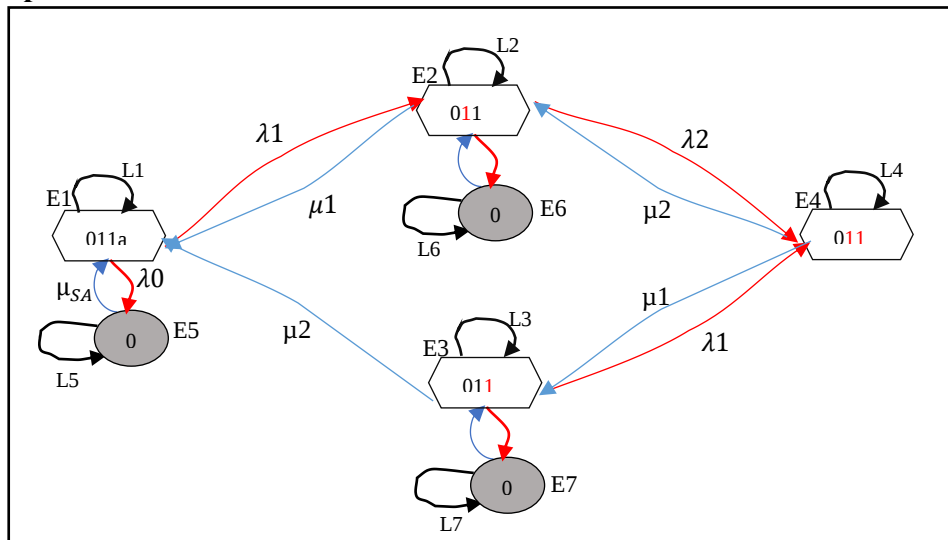


Figure IV. 3 : Graphe des états de la disponibilité de configuration (1+1) cas non identique.

a/ Interprétation du graphe :

Avec :

$$L1=1-(\lambda_1 + \lambda_{SA}) \quad ; \quad L2=1-(\lambda_2 + \lambda_{SA} + \mu_1) \quad ; \quad L3=1-(\lambda_1 + \lambda_{SA} + \mu_2)$$

$$L4=1-(\mu_2 + \mu_1) \quad ; \quad L5=1-\mu_{SA} \quad ; L6=1-\mu_{SA} \quad ; \quad L7=1-\mu_{SA}$$

La matrice de transition est donnée par la matrice (7×7) suivant :

$$\begin{bmatrix} L1 & \lambda_1 & 0 & 0 & \lambda_{SA} & 0 & 0 \\ \mu_1 & L2 & 0 & \lambda_2 & 0 & \lambda_{SA} & 0 \\ \mu_2 & 0 & L3 & \lambda_1 & 0 & 0 & \lambda_{SA} \\ 0 & \mu_2 & \mu_1 & L4 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{SA} & 0 & 0 & 0 & L5 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{SA} & 0 & 0 & 0 & L6 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{SA} & 0 & 0 & 0 & L7 \end{bmatrix}$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1(t)}{dt} = (1 - \lambda_1)P_1(t) + \mu_1P_2(t) + \mu_2P_3(t) + \mu_{SA}P_5(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_1P_1(t) + (1 - (\lambda_2 + \mu_1))P_2(t) + \mu_2P_4(t) + \mu_{SA}P_6(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = (1 - (\lambda_1 + \mu_2))P_3(t) + \mu_1P_4(t) + \mu_{SA}P_7(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_2P_2(t) + (1 - \lambda_1)P_3(t) + (1 - (\mu_1 + \mu_2))P_4(t) \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \lambda_{SA}P_1(t) + (1 - \lambda_{SA})P_5(t) \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = \lambda_{SA}P_2(t) + (1 - \lambda_{SA})P_6(t) \\ \frac{dP_7(t)}{dt} = \lambda_{SA}P_3(t) + (1 - \lambda_{SA})P_7(t) \end{array} \right.$$

b/ La résolution de ce système d'équations :

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

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

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

$$P_1=0,997091972 \quad ; \quad P_2=0,0028 \quad ; \quad P_3=3,89682E-06 \quad ; \quad P_4=3,90773E-06$$

$$P_5=0,0001 \quad ; \quad P_6=2,23E-07 \quad ; \quad P_7=3,12E-10$$

c/ La disponibilité du système :

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

$$A_S = P_1 + P_2 + P_3 = 1 - (P_4 + P_5 + P_6 + P_7)$$

$$A_S = 0,999895869$$

- Fiabilité :**

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

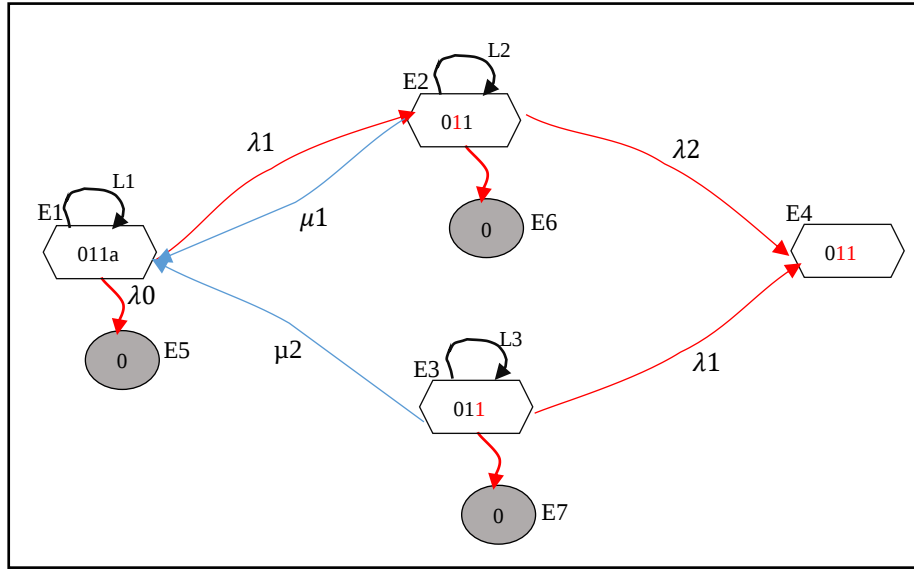


Figure IV. 4: Graphe des états de la fiabilité de configuration (1+1) cas non identique.

a/ Interprétation du graphe :

Avec :

$$L1 = 1 - (\lambda_1 + \lambda_{SA}) ; \quad L2 = 1 - (\lambda_2 + \lambda_{SA} + \mu_1) ; \quad L3 = 1 - (\lambda_1 + \lambda_{SA} + \mu_2)$$

La matrice de transition est donnée par la matrice (7×7) suivant :

$$\begin{bmatrix} L1 & \lambda_1 & 0 & 0 & \lambda_{SA} & 0 & 0 \\ \mu_1 & L2 & 0 & \lambda_2 & 0 & \lambda_{SA} & 0 \\ \mu_2 & 0 & L3 & \lambda_1 & 0 & 0 & \lambda_{SA} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Le système d'équations différentielles correspondant est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1(t)}{dt} = (1 - \lambda_1)P_1(t) + \mu_1P_2(t) + \mu_2P_3(t) + P_4(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_1P_1(t) + (1 - (\lambda_2 + \mu_1))P_2(t) + P_5(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = (1 - (\lambda_1 + \mu_2))P_3(t) + P_6(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_2P_2(t) + (1 - \lambda_1)P_3(t) + P_7(t) \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \lambda_0P_1(t) \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = \lambda_0P_2(t) \\ \frac{dP_7(t)}{dt} = \lambda_0P_3(t) \end{array} \right.$$

b/ La résolution de ce système d'équations :

Suivant les démarches précédentes et pour les conditions initiales suivantes :

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

On trouve :

$$P'_1 = 0,9968 \quad ; \quad P'_2 = 0,0032 \quad ; \quad P'_3 = 1,25697E-06$$

$$P'_4 = 2,24094E-07 \quad ; \quad P'_5 = 9,96812E-06$$

$$P'_6 = 3,1763E-08 \quad ; \quad P'_7 = 1,25697E-11$$

c/ La fiabilité du système :

$$R(t) = e^{-\lambda t} = R_S = P'_1 + P'_2 + P'_3 = 1 - (P'_4 + P'_5 + P'_6 + P'_7) = 0,9999786$$

$$\lambda = (P'_4 + P'_5 + P'_6 + P'_7) = 1,0224E-05 \text{ h}^{-1}$$

d/ maintenabilité du système :

$$\mu = \frac{AS * \lambda}{(1 - AS)} = 0,098173655 \text{ h}^{-1}$$

IV.1.2. Evaluation de la disponibilité et de la fiabilité du Système

TP de configuration (3+2) :

Nous considérons que nous avons 3 éléments principaux et 2 éléments en réserve.

IV.1.2.1. Par graphe de Markov cas (identiques) :

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

• **Disponibilité :**

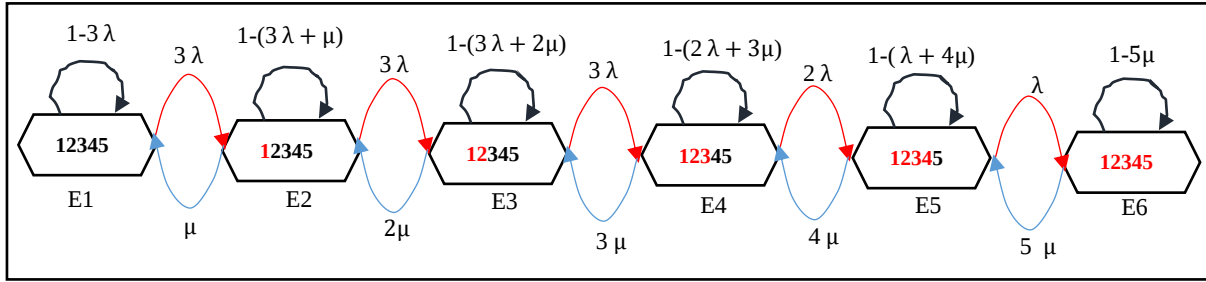


Figure IV. 5: Graph des états de la disponibilité pour la configuration (3+2) cas identique.

La matrice de transition est donnée par la matrice (6*6) suivant :

$$\begin{bmatrix} 1-3\lambda & 3\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1-(3\lambda+\mu) & 3\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu & 1-(3\lambda+2\mu) & 3\lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3\mu & 1-(2\lambda+3\mu) & 2\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4\mu & 1-(\lambda+4\mu) & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5\mu & 1-5\mu \end{bmatrix}$$

Le système d'équations différentielles correspondant est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1(t)}{dt} = (1-3\lambda)P_1(t) + \mu P_2(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = 3\lambda P_1(t) + (1-(3\lambda+\mu))P_2(t) + 2\mu P_3(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = 3\lambda P_2(t) + (1-(2\lambda+2\mu))P_3(t) + 3\mu P_4(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = 3\lambda P_3(t) + (1-(2\lambda+3\mu))P_4(t) + 4\mu P_5(t) \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = 2\lambda P_4(t) + (1-(\lambda+4\mu))P_5(t) + 5\mu P_6(t) \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = \lambda P_5(t) + (1-5\mu)P_6(t) \end{array} \right.$$

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

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

$$P_1(0)=1, P_2(0)=P_3(0)=P_4(0)=P_5(0)=P_6(0)=0$$

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

$$\begin{array}{lll} P_1=0,991664926 & ; & P_2=0,0083 \\ P_4=9,79E-08 & ; & P_5=1,37E-10 \\ & & P_3=3,50E-05 \\ & & P_6=7,68E-14 \end{array}$$

c/ La disponibilité du système :

$$A_S = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 1 - P_6$$

$$A_S = 1$$

• **Fiabilité :**

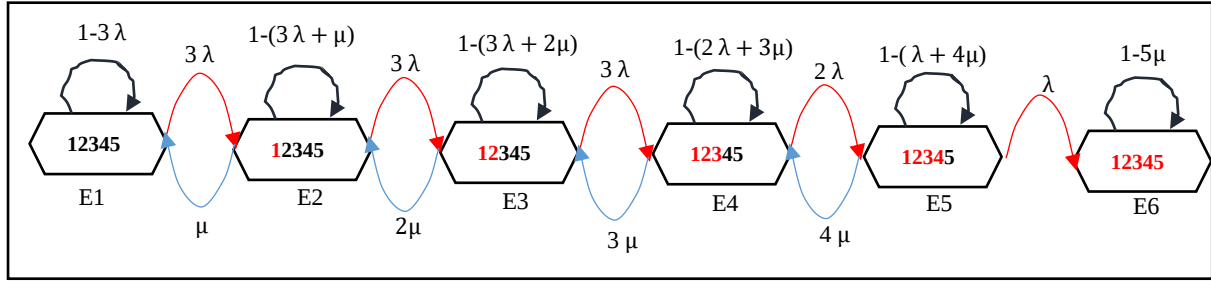


Figure IV. 6: Graphe des états de la fiabilité de configuration (3+1) cas identique.

a/ Interprétation du graphe :

La matrice de transition est donnée par la matrice (6×6) suivant :

$$\begin{bmatrix} 1-3\lambda & 3\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1-(3\lambda+\mu) & 3\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu & 1-(3\lambda+2\mu) & 3\lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3\mu & 1-(2\lambda+3\mu) & 2\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4\mu & 1-(\lambda+4\mu) & \lambda \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Le système d'équations différentielles correspondant est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1(t)}{dt} = (1-3\lambda)P_1(t) + \mu P_2(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = 3\lambda P_1(t) + (1-(3\lambda+\mu))P_2(t) + 2\mu P_3(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = 3\lambda P_2(t) + (1-(2\lambda+2\mu))P_3(t) + 3\mu P_4(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = 3\lambda P_3(t) + (1-(2\lambda+3\mu))P_4(t) + 4\mu P_5(t) \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = 2\lambda P_4(t) + (1-(\lambda+4\mu))P_5(t) + 5\mu P_6(t) \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = P_1(t) \end{array} \right.$$

b/ La résolution de ce système d'équations :

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

$$\begin{array}{lll} P'_1=0,992 & ; & P'_2=0,00833 & ; & P'_3=0,000035 \\ P'_4=9,792E-08 & ; & P'_5=1,3698E-10 & ; & P'_6=9,6595E-15 \end{array}$$

d/ La fiabilité du système :

$$R(t) = e^{-\lambda t} = R_S = 1 - P'_6 = 0.99999998$$

$$\lambda = P'_6 = 9,6595E-15 \text{ h}^{-1}$$

IV.1.2.2. Calcul de la disponibilité par le modèle de YACIN (3+2) :

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

m : Nombre d'éléments principaux = 3

l : Nombre d'éléments en réserves = 2

A. N :

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

$$s_0 = m^k \frac{\gamma^k}{k!} = 3^0 \frac{(2.799643986 \times 10^{-3})^0}{0!} = 1$$

$$s_1 = m^k \frac{\gamma^k}{k!} = 3^1 \frac{(2.799643986 \times 10^{-3})^1}{1!} = 0,008398932$$

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

$$S_2 = m^l \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s) = 3^1 \frac{(2.799643986 \times 10^{-3})^2}{2!} (3-0) = 3,5271E-05$$

$$S_3 = m^l \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s) = 3^1 \frac{(2.799643986 \times 10^{-3})^2}{2!} (3-0)(3-1)$$

$$S_3 = 9,87463E-08$$

$$S_4 = m^l \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s) = 3^1 \frac{(2.799643986 \times 10^{-3})^4}{4!} (3-0)(3-1)(3-2)$$

$$S_4 = 1,38227E-10$$

$$S_5 = m^l \frac{\gamma^k}{k!} \prod_{s=0}^{k-l-1} (m-s) = 3^1 \frac{(2.799643986 \times 10^{-3})^5}{5!} (3-0)(3-1)(3-2)$$

$$S_5 = 7,73974E-14$$

Donc :

$$\pi_0 = \frac{1}{S_0 + S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5}$$

$$\pi_0 = \frac{1}{1 + 0,008398932 + 3,5271E-05 + 9,87463E-08 + 1,38227E-10 + 7,73974E-14}$$

$$\pi_0 = 0,991636241$$

a. Les probabilités :

$$P_1 = S_0 \pi_0 = 0,991636241 \quad ; \quad P_2 = S_1 \pi_0 = 0,008328685 \quad ; \quad P_3 = S_2 \pi_0 = 3,4976E-05$$

$$P_4 = S_3 \pi_0 = 9,79204E-08 \quad ; \quad P_5 = S_4 \pi_0 = 1,37071E-10 \quad ; \quad P_6 = S_4 \pi_0 = 7,67501E-14$$

b. La disponibilité du système turbopompe :

$$A_{sp} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 1 - P_6$$

$$A_{sp} = 1$$

IV.1.2.3. Par graphe de Markov cas (non identiques) :

- Les taux de défaillance différents :

$$\lambda_1 = 0,00007052 \text{ h}^{-1}; \lambda_2 = 0,00007052 \text{ h}^{-1}; \lambda_3 = 0,00007052 \text{ h}^{-1}; \lambda_4 = 0,00007052 \text{ h}^{-1}$$

$$\lambda_5 = 0,00007052 \text{ h}^{-1}; \lambda_{SA} = 0,00001 \text{ h}^{-1}$$

- Les taux de réparation différents :

$$\mu_1 = 0,025188917 \text{ h}^{-1}; \mu_2 = 0,025188917 \text{ h}^{-1}; \mu_3 = 0,025188917 \text{ h}^{-1};$$

$$\mu_4 = 0,025188917 \text{ h}^{-1}; \mu_5 = 0,025188917 \text{ h}^{-1}; \mu_{SA} = 0,125 \text{ h}^{-1}$$

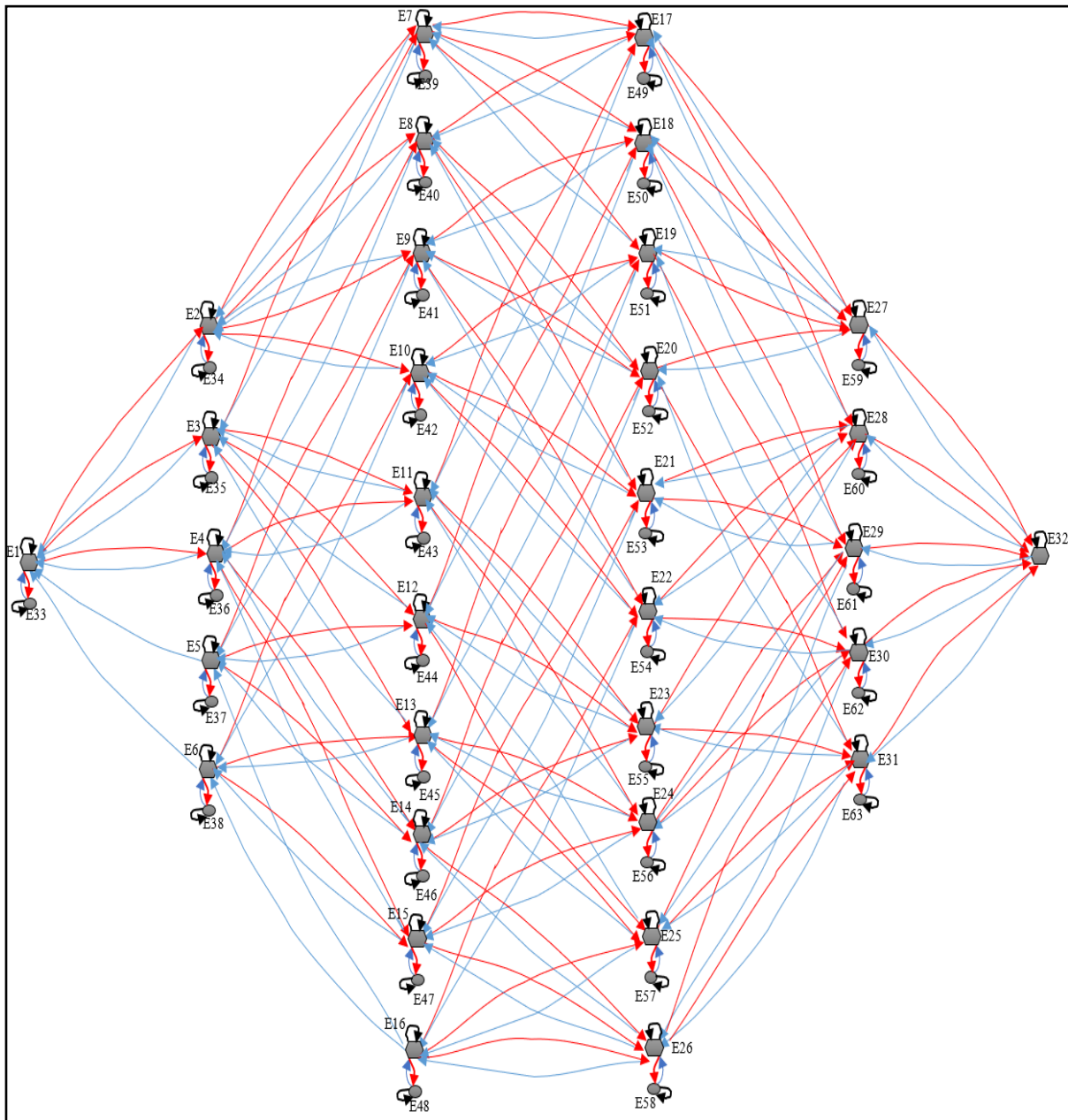


Figure IV. 7: Graphe des états de la disponibilité de la station de pompage de configuration (3+2) cas non identique en tenant compte du système auxiliaire

La matrice de transition est donnée par la matrice (63×63) suivant :

$$\begin{bmatrix} A_1 & \lambda_1 & \lambda_2 \lambda_3 & \lambda_4 & \lambda_5 0 & \dots & \lambda_{SA} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \mu_1 & A_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{SA} & 0 & 0 \\ \mu_2 & 0 & A_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ & \mu_3 & 0 & 0 & A_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{SA} \\ & \mu_4 & 0 & 0 & 0 & A_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \mu_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_6 & 0 & 0 & 0 \\ & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ \mu_{SA} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{SA} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{34} & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & \mu_{SA} & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & A_{63} \end{bmatrix}$$

Avec :

$A_i = 1 - \sum \text{des taux de transition}(\lambda \text{ et } \mu) \text{ qui sort de l'état}$

Equations d'état du système :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1(t)}{dt} = A_1 P_1(t) + \mu_1 P_2(t) + \mu_2 P_3(t) + \mu_3 P_4(t) + \mu_4 P_5(t) + \mu_5 P_6(t) + \mu_{SA} P_{33}(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = A_2 P_2(t) + \lambda_1 P_1(t) + \mu_2 P_7(t) + \mu_3 P_8(t) + \mu_4 P_9(t) + \mu_5 P_{10}(t) + \mu_{SA} P_{34}(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = A_3 P_3(t) + \lambda_2 P_1(t) + \mu_1 P_7(t) + \mu_3 P_{11}(t) + \mu_4 P_{12}(t) + \mu_5 P_{13}(t) + \mu_{SA} P_{35}(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = A_4 P_4(t) + \lambda_3 P_1(t) + \mu_1 P_8(t) + \mu_2 P_{11}(t) + \mu_4 P_{14}(t) + \mu_5 P_{15}(t) + \mu_{SA} P_{36}(t) \\ \vdots \\ \frac{dP_{32}(t)}{dt} = A_{33} P_{33}(t) + \lambda_{SA} P_1(t) \\ \frac{dP_{46}(t)}{dt} = A_{34} P_{34}(t) + \lambda_{SA} P_2(t) \\ \vdots \end{array} \right.$$

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

N. état	Evènement	Probabilité	N.état	Evènement	Probabilité
1	Non défaillant	0,9915	33	Système auxiliaire	0,0001
2	1	0,0028	34	Système auxiliaire	2,21E-07
3	2	0,0028	35	Système auxiliaire	2,21E-07
4	3	0,0028	36	Système auxiliaire	2,21E-07
5	4	1,15927E-05	37	Système auxiliaire	9,27E-10
6	5	1,15927E-05	38	Système auxiliaire	9,27E-10
7	1.2	7,74292E-06	39	Système auxiliaire	6,19E-10
8	1.3	7,74292E-06	40	Système auxiliaire	6,19E-10
9	1.4	3,89306E-06	41	Système auxiliaire	3,11E-10
10	1.5	3,89306E-06	42	Système auxiliaire	3,11E-10
11	2.3	7,74292E-06	43	Système auxiliaire	6,19E-10
12	2.4	3,89306E-06	44	Système auxiliaire	3,11E-10
13	2.5	3,89306E-06	45	Système auxiliaire	3,11E-10
14	3.4	3,89306E-06	46	Système auxiliaire	3,11E-10
15	3.5	3,89306E-06	47	Système auxiliaire	3,11E-10
16	4.5	1,09E-08	48	Système auxiliaire	8,70E-13
17	1.2.3	2,17E-08	49	Système auxiliaire	1,73E-12
18	1.2.4	1,45E-08	50	Système auxiliaire	1,16E-12
19	1.2.5	1,45E-08	51	Système auxiliaire	1,16E-12
20	1.3.4	1,45E-08	52	Système auxiliaire	1,16E-12
21	1.3.5	1,45E-08	53	Système auxiliaire	1,16E-12
22	1.4.5	7,28E-09	54	Système auxiliaire	5,83E-13
23	2.3.4	1,45E-08	55	Système auxiliaire	1,16E-12
24	2.3..5	1,45E-08	56	Système auxiliaire	1,16E-12
25	2.4.5	7,28E-09	57	Système auxiliaire	5,83E-13
26	3.4.5	7,28E-09	58	Système auxiliaire	5,83E-13

27	1.2.3.4	4,56E-11	59	Système auxiliaire	3,65E-15
28	1.2.3.5	4,56E-11	60	Système auxiliaire	3,65E-15
29	1.2.4.5	3,05E-11	61	Système auxiliaire	2,44E-15
30	1.3.4.5	3,05E-11	62	Système auxiliaire	2,44E-15
31	2.3.4.5	3,05E-11	63	Système auxiliaire	2,44E-15
32	1.2.3.4.5	1,02E-13			

Tableau IV. 1: Probabilité des différents états SP issue du modèle de Markov disponibilité c/La disponibilité de la station de compression :

$$A_{sp} = \sum_{i=1}^{i=31} P_i = 1 - \sum_{i=32}^{i=63} P_i$$

$$A_{sp} = 0,99989933$$

- **Fiabilité :**

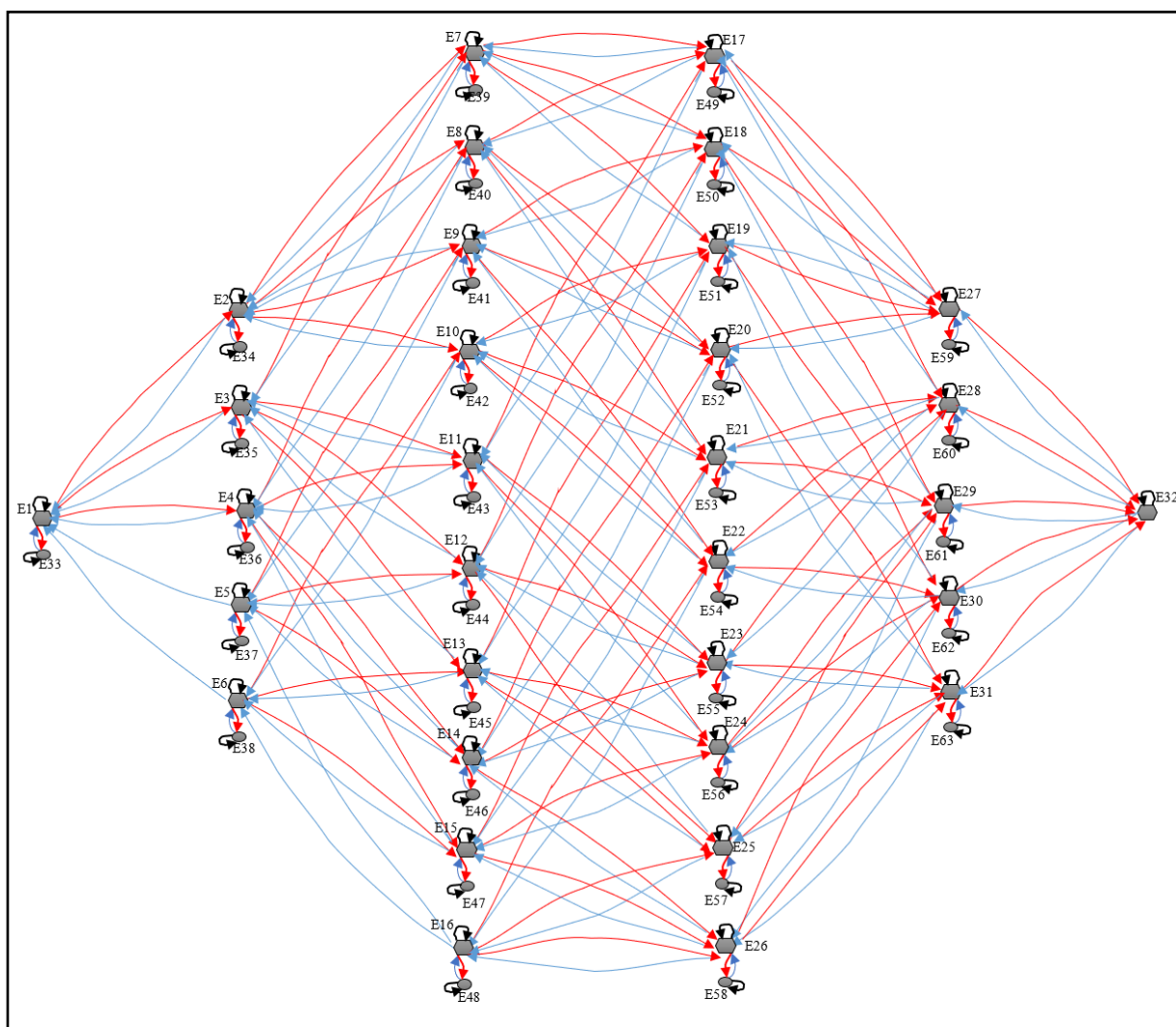


Figure IV. 8: Graphe des états pour la fiabilité de la station de pompage de configuration (3+2) en tenant compte du système auxiliaires cas non identique.

a/ Interprétation du graphe :

La matrice de transition est donnée par la matrice (63×63) suivante

$$\begin{bmatrix} A_1 & \lambda_1 & \lambda_2 \lambda_3 & \lambda_4 & \lambda_5 0 & \dots & \lambda_{SA} 0 & \dots & 0 \\ \mu_1 & A_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{SA} & 0 & 0 \\ \mu_2 & 0 & A_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ & \mu_3 & 0 & 0 & A_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{SA} \\ & \mu_4 & 0 & 0 & 0 & A_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \mu_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_6 & 0 & 0 & 0 \\ & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Avec :

$A_i = 1 - \sum \text{des taux de transition}(\lambda \text{ et } \mu) \text{ qui sort de l'état}$

Equations d'état du système :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1(t)}{dt} = A_1 P_1(t) + \mu_1 P_2(t) + \mu_2 P_3(t) + \mu_3 P_4(t) + \mu_4 P_5(t) + \mu_5 P_6(t) + P_{33}(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = A_2 P_2(t) + \lambda_1 P_1(t) + \mu_2 P_7(t) + \mu_3 P_8(t) + \mu_4 P_9(t) + \mu_5 P_{10}(t) + P_{34}(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = A_3 P_3(t) + \lambda_2 P_1(t) + \mu_1 P_7(t) + \mu_3 P_{11}(t) + \mu_4 P_{12}(t) + \mu_5 P_{13}(t) + P_{35}(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = A_4 P_4(t) + \lambda_3 P_1(t) + \mu_1 P_8(t) + \mu_2 P_{11}(t) + \mu_4 P_{14}(t) + \mu_5 P_{15}(t) + P_{36}(t) \\ \vdots \\ \frac{dP_{32}(t)}{dt} = \lambda_{SA} P_1(t) \\ \frac{dP_{46}(t)}{dt} = \lambda_{SA} P_2(t) \\ \vdots \end{array} \right.$$

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

N. état	Evènement	Probabilité	N.état	Evènement	Probabilité
1	Non défaillant	0,9912	33	Système auxiliaire	9,91222E-06
2	1	0,0032	34	Système auxiliaire	3,16E-08
3	2	0,0028	35	Système auxiliaire	2,77E-08
4	3	0,0028	36	Système auxiliaire	2,77E-08
5	4	1,32265E-05	37	Système auxiliaire	1,32E-10
6	5	1,21364E-05	38	Système auxiliaire	1,21E-10
7	1.2	8,28742E-06	39	Système auxiliaire	8,29E-11
8	1.3	8,28644E-06	40	Système auxiliaire	8,29E-11
9	1.4	4,44013E-06	41	Système auxiliaire	4,44E-11
10	1 .5	4,43784E-06	42	Système auxiliaire	4,44E-11
11	2.3	7,74199E-06	43	Système auxiliaire	7,74E-11
12	2.4	3,89634E-06	44	Système auxiliaire	3,90E-11
13	2.5	3,89405E-06	45	Système auxiliaire	3,89E-11
14	3.4	3,89536E-06	46	Système auxiliaire	3,90E-11
15	3.5	3,89384E-06	47	Système auxiliaire	3,89E-11
16	4.5	1,22E-08	48	Système auxiliaire	1,22E-13
17	1.2.3	2,27E-08	49	Système auxiliaire	2,27E-13
18	1.2.4	1,55E-08	50	Système auxiliaire	1,55E-13
19	1.2.5	1,55E-08	51	Système auxiliaire	1,55E-13
20	1.3.4	1,55E-08	52	Système auxiliaire	1,55E-13
21	1.3.5	1,55E-08	53	Système auxiliaire	1,55E-13
22	1.4.5	8,30E-09	54	Système auxiliaire	8,30E-14
23	2.3.4	1,45E-08	55	Système auxiliaire	1,45E-13
24	2.3..5	1,45E-08	56	Système auxiliaire	1,45E-13
25	2.4.5	7,29E-09	57	Système auxiliaire	7,29E-14
26	3.4.5	7,29E-09	58	Système auxiliaire	7,29E-14

27	1.2.3.4	4,84E-11	59	Système auxiliaire	4,84E-16
28	1.2.3.5	4,77E-11	60	Système auxiliaire	4,77E-16
29	1.2.4.5	3,26E-11	61	Système auxiliaire	3,26E-16
30	1.3.4.5	3,26E-11	62	Système auxiliaire	3,26E-16
31	2.3.4.5	3,05E-11	63	Système auxiliaire	3,05E-16
32	1.2.3.4.5	1,38E-14			

Tableau IV. 2: Probabilité des différents états de la SP issue du modèle de Markov fiabilité.

• **Fiabilité :**

$$R(t) = e^{-\lambda t} = R_S = \sum_{i=1}^{i=31} P_i = 1 - \sum_{i=32}^{i=63} P_i$$

$$R_S = 0.99999$$

$$\lambda = \sum_{i=32}^{i=63} P_i = 9,99989E-06 \text{ h}^{-1}$$

$$\mu = \frac{A_S * \lambda}{(1 - A_S)} = 0,099323406 \text{ h}^{-1}$$

IV.1.3. Evaluation de la disponibilité, la fiabilité et de la maintenabilité de système global :

IV.1.3.1. Par le graphe de Markov :

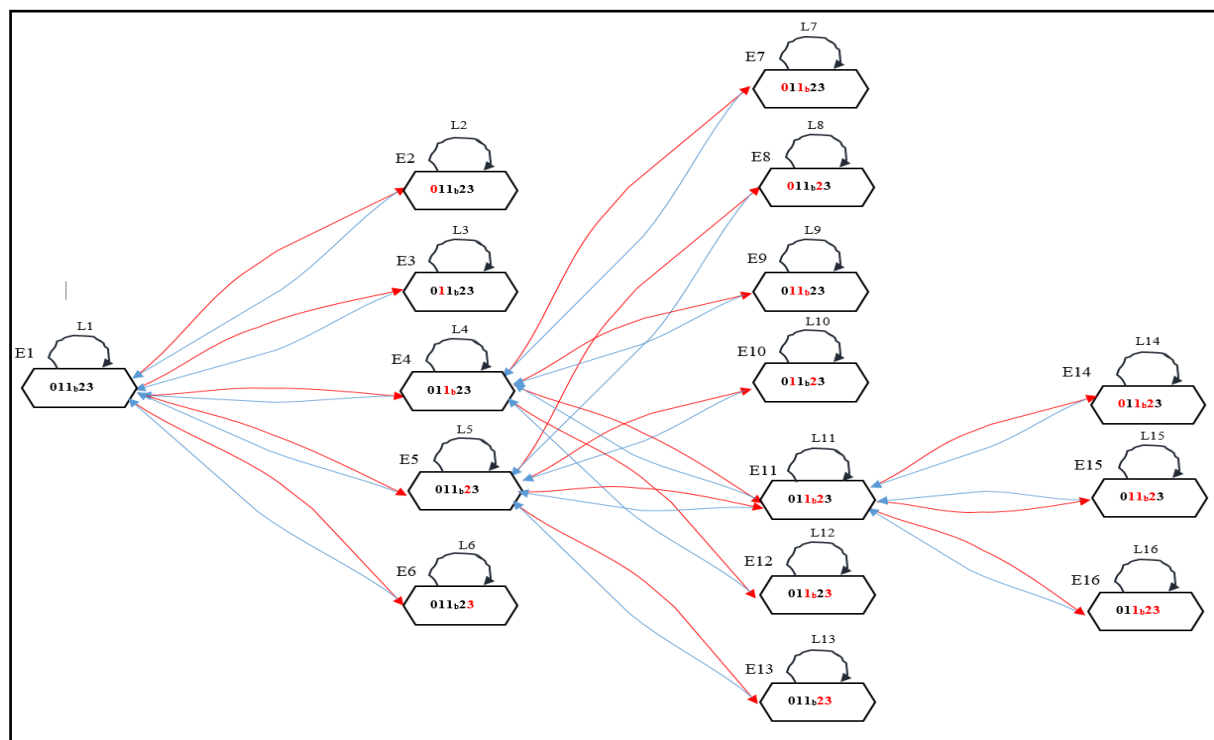


Figure IV. 9 : Graphe des états de la disponibilité de l'oléoduc OB1.

Sur la base des calculs précédents nous avons obtenu les différents paramètres de fiabilité des stations de pompage :

- Les différents taux de défaillance :
 $\lambda_{sp1b}=1,0224E-05 \text{ h}^{-1}$; $\lambda_{sp1}=9,99989E-06 \text{ h}^{-1}$; $\lambda_{sp2}=9,99989E-06 \text{ h}^{-1}$;
 $\lambda_{sp3}=9,99989E-06 \text{ h}^{-1}$; $\lambda_c=2,56444E-05 \text{ h}^{-1}$
- Les différents taux de réparation :
 $\mu_{sp1}=0,099323406 \text{ h}^{-1}$; $\mu_{sp2}=0,099323406 \text{ h}^{-1}$; $\mu_{sp3}=0,099323406 \text{ h}^{-1}$;
 $\mu_{sp1b}=0,098173655 \text{ h}^{-1}$; $\mu_c=0,013888889 \text{ h}^{-1}$

Remarque : le zéro (0) dans le graphe est l'un indice de la canalisation.

• Disponibilité

a/ Interprétation du graphe :

Les taux de transition sont donnés par la matrice (16×16) suivant :

L1	λ_c	λ_{sp1}	λ_{sp1b}	λ_{sp2}	λ_{sp3}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
μ_c	L2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
μ_{sp1}	0	L3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
μ_{sp1b}	0	0	L4	0	0	λ_c	0	λ_{sp1}	0	λ_{sp2}	λ_{sp3}	0	0	0	0
μ_{sp2}	0	0	0	L5	0	0	λ_c	0	λ_{sp1}	λ_{sp1b}	0	λ_{sp3}	0	0	0
μ_{sp3}	0	0	0	0	L6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	μ_c	0	0	L7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	μ_c	0	0	L8	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	μ_{sp1}	0	0	0	0	L9	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	μ_{sp1}	0	0	0	0	L10	0	0	0	0	0	0
0	0	0	μ_{sp2}	μ_{sp1b}	0	0	0	0	0	L11	0	0	λ_c	λ_{sp1}	λ_{sp3}
0	0	0	μ_{sp3}	0	0	0	0	0	0	0	L12	0	0	0	0
0	0	0	0	μ_{sp3}	0	0	0	0	0	0	0	L13	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	μ_c	0	0	L14	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	μ_{sp1}	0	0	0	L15	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	μ_{sp3}	0	0	0	0	L16

Avec:

$$\begin{aligned}
 L1 &= 1 - (\lambda_c + \lambda_{sp1} + \lambda_{sp1b} + \lambda_{sp2} + \lambda_{sp3}) & ; & & L2 &= 1 - \mu_c \\
 L3 &= 1 - \mu_{sp1} & ; & & L4 &= 1 - (\mu_{sp1b} + \lambda_c + \lambda_{sp1} + \lambda_{sp2} + \lambda_{sp3}) \\
 L5 &= 1 - (\mu_{sp2} + \lambda_c + \lambda_{sp1} + \lambda_{sp1b} + \lambda_{sp3}) & ; & & L6 &= 1 - \mu_{sp3} \\
 L7 &= 1 - \mu_c & ; & & L8 &= 1 - \mu_c \\
 L9 &= 1 - \mu_{sp1} & ; & & L10 &= 1 - \mu_{sp1} \\
 L11 &= 1 - (\mu_{sp1b} + \mu_{sp2} + \lambda_c + \lambda_{sp1} + \lambda_{sp3}) & ; & & L12 &= 1 - \mu_{sp3} \\
 L13 &= 1 - \mu_{sp3} & ; & & L14 &= 1 - \mu_c \\
 L15 &= 1 - \mu_{sp1} & ; & & L16 &= 1 - \mu_{sp3}
 \end{aligned}$$

Equations d'état du système :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1(t)}{dt} = L1P_1(t) + \mu c P_2(t) + \mu_{sp1} P_3(t) + \mu_{sp1b} P_4(t) + \mu_{sp2} P_5(t) + \mu_{sp3} P_6(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = L2P_2(t) + \lambda c P_1(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = L3P_3(t) + \lambda_{sp1} P_1(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = L4P_4(t) + \lambda_{p1b} P_1(t) + \mu c P_7(t) + \mu_{sp1} P_9(t) + \mu_{sp2} P_{11}(t) + \mu_{sp3} P_{12}(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{dP_{16}(t)}{dt} = L16P_{16}(t) + \lambda_{sp3} P_{11}(t) \end{array} \right.$$

b/ La résolution de ce système d'équations :

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

N.état	Evènement	Probabilité	N.état	Evènement	Probabilité
1	non défaillant	0,997799571	9	Sp1 ;sp1b	1,05E-08
2	canalisation	0,0018	10	Sp1 ;sp2	1,01E-08
3	Sp1	0,0001	11	Sp1b ;sp2	1,05E-08
4	Sp1b	0,0001	12	Sp1-b ;sp3	1,05E-08
5	Sp2	0,0001	13	Sp2 ;sp3	1,01E-08
6	Sp3	0,0001	14	Sp2 ;sp1b ;canalisation	1,93E-11
7	Sp1b ;canal	1,92E-07	15	Sp1 ;sp1b ;sp2	1,05E-12
8	Sp2 ;canal	1,85E-07	16	Sp1b ;sp2 ;sp3	1,05E-12

Tableau IV. 3: Probabilité des différents états de l'OB1 issue du modèle de Markov disponibilité.

c/ La disponibilité de l'oléoduc OB1:

$$A_{Sg} = P_1 + P_4 + P_5 + P_{11}$$

$$A_{Sg} = 0,997999581$$

- **Fiabilité :**

La fiabilité de l'oléoduc OB1 est obtenue en rendant le graphe de Markov disponibilité absorbant

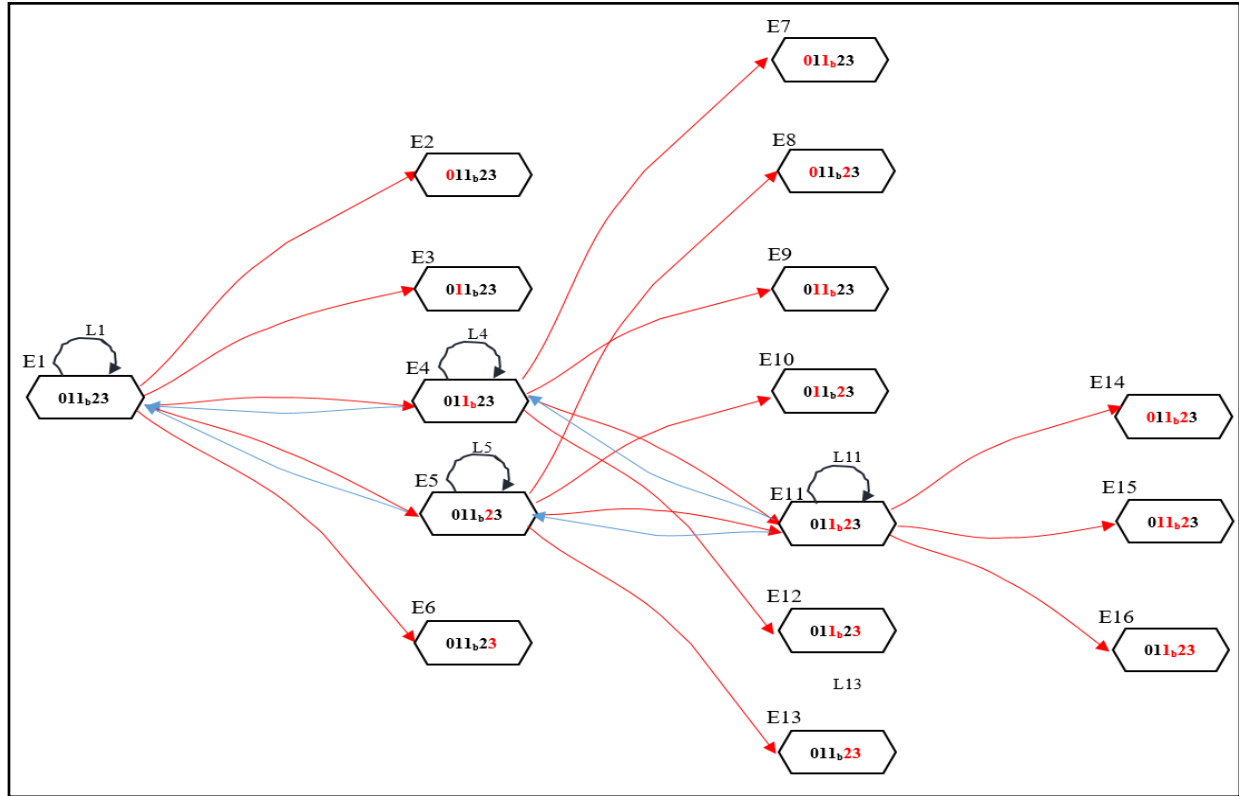


Figure IV. 10: Graphe des états de la fiabilité de l'oléoduc OB1.

a/ Interprétation du graphe :

Les taux de transition sont donnés par la matrice (16×16) suivante :

L1	λ_c	λ_{sp1}	λ_{sp1b}	λ_{sp2}	λ_{sp3}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	L2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	L3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
μ_{sp1b}	0	0	L4	0	0	λ_c	0	λ_{sp1}	0	λ_{sp2}	λ_{sp3}	0	0	0	0
μ_{sp2}	0	0	0	L5	0	0	λ_c	0	λ_{sp1}	λ_{sp1b}	0	λ_{sp3}	0	0	0
0	0	0	0	0	L6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	L7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	L8	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	L9	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	L10	0	0	0	0	0	0
0	0	0	μ_{sp2}	μ_{sp1b}	0	0	0	0	0	L11	0	0	λ_c	λ_{sp1}	λ_{sp3}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	L12	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	L13	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	L14	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	L15	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	L16

Avec:

$$\begin{aligned}
 L1 &= 1 - (\lambda c + \lambda sp1 + \lambda sp1b + \lambda sp2 + \lambda sp3) & ; L2 &= 1 - \mu c \\
 L3 &= 1 - \mu sp1 & ; L4 &= 1 - (\mu sp1b + \lambda c + \lambda sp1 + \lambda sp2 + \lambda sp3) \\
 L5 &= 1 - (\mu sp2 + \lambda c + \lambda sp1 + \lambda sp1b + \lambda sp3) & ; L6 &= 1 - \mu sp3 \\
 L7 &= 1 - \mu c & ; L8 &= 1 - \mu c \\
 L9 &= 1 - \mu sp1 & ; L10 &= 1 - \mu sp1 \\
 L11 &= 1 - (\mu sp1b + \mu sp2 + \lambda c + \lambda sp1 + \lambda sp3) & ; L12 &= 1 - \mu sp3 \\
 L13 &= 1 - \mu sp3 & ; L14 &= 1 - \mu c \\
 L15 &= 1 - \mu sp1 & ; L16 &= 1 - \mu sp3
 \end{aligned}$$

Equations d'état du système :

$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{dP_1(t)}{dt} &= L1P_1(t) + \mu sp1bP4(t) + \mu sp2P5(t) \\
 \frac{dP_2(t)}{dt} &= L2P2(t) + \lambda cP1(t) \\
 \frac{dP_3(t)}{dt} &= L3P3(t) + \lambda sp1P1(t) \\
 \frac{dP_4(t)}{dt} &= L4P4(t) + \lambda p1bP1(t) + \mu sp2P11(t) \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 \frac{dP_{16}(t)}{dt} &= L16P16(t) + \lambda sp3P11(t)
 \end{aligned} \right.$$

b/ Résolution du système d'équations :

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

N.état	Evènement	Probabilité	N.état	Evènement	Probabilité
1	Non défaillant	0,9997	9	Sp1 ; sp1b	2,05E-09
2	canalisation	4,56334E-05	10	Sp1 ; sp2	1,01E-09
3	Sp1	1,99962E-05	11	Sp1b ; sp2	1,05E-08
4	Sp1b	0,0001	12	Sp1b ; sp3	1,04E-09
5	Sp2	0,0001	13	Sp2 ; sp3	1,01E-09
6	Sp3	9,99913E-06	14	Sp2 ; sp1b ; canalisation	2,69E-13
7	Sp1b ; canal	3,68E-09	15	Sp1 ; sp1b ; sp2	1,05E-13
8	Sp2 ; canal	3,62E-09	16	Sp1b ; sp2 ; sp3	1,05E-13

Tableau IV. 4: Probabilité des différents états de l'OB1 issue du modèle de Markov fiabilité.

c/ La fiabilité de l'oléoduc OB1 :

$$R(t) = e^{-\lambda t} = R_S = \sum P(1,4,5,11) = 1 - \sum P(2,3,6,7,8,9,10,12,13,14,15,16)$$

$$R_S = 0.99990$$

$$\lambda_{sg} = \sum P(2,3,6,7,8,9,10,12,13,14,15,16)$$

$$\lambda_{sg} = 7,56412E - 05 \text{ h}^{-1}$$

d/ la maintenabilité de l'oléoduc OB1

$$\mu_{sg} = \frac{A_{sg} \cdot \lambda_{sg}}{(1 - A_{sg})} = 0,037737047 \text{ h}^{-1}$$

IV.1.3.2. Par la Modèle analytique :

D'après la formule (II.58) ;(II.62) respectivement dans le chapitre II on a :

$$\lambda_{sg} = 5,21626E - 05 \text{ h}^{-1}$$

$$A_{sg} = 0,997996051$$

Et on a :

$$\mu_{sg} = \frac{A_{sg} \cdot \lambda_{sg}}{(1 - A_{sg})}$$

$$\mu_{sg} = 0,025977757 \text{ h}^{-1}$$

IV.1.4 Comparaison entre les deux approches de modélisation :

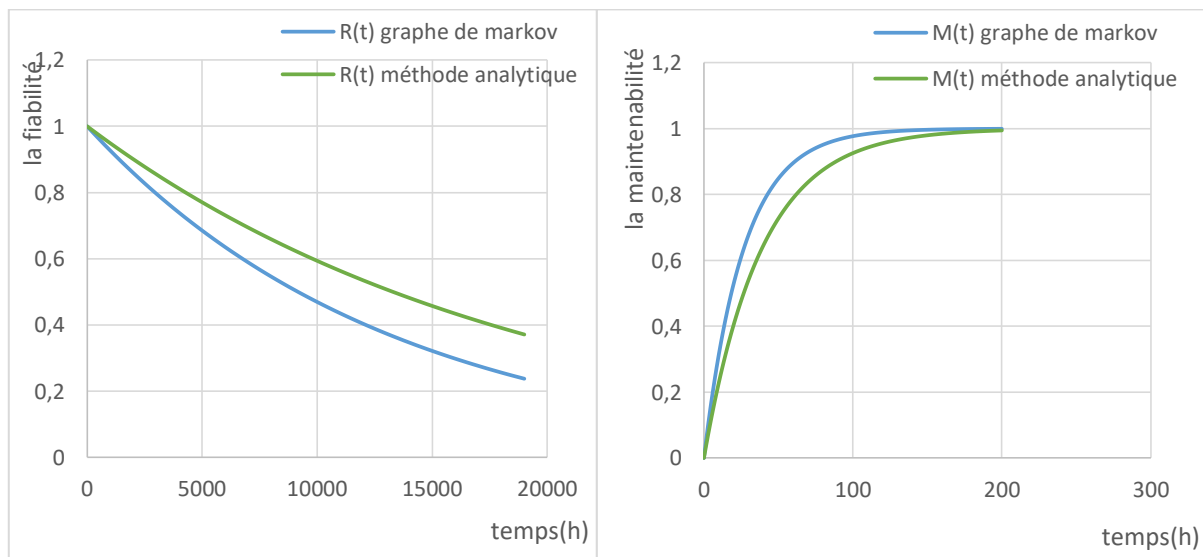


Figure IV. 11 : Fiabilité et maintenabilité résultant des approches de modélisation par les graphes de Markov et la méthode analytique.

Interprétation :

Nous remarquons des écarts entre l'approche analytique et les graphes de Markov pour la modélisation de la fiabilité, de la maintenabilité et de la disponibilité de l'oléoduc OB1. Ceci s'explique par les hypothèses plus réalistes prises en considération lors de la modélisation par les graphes de Markov tenant compte des différences entre les pompes d'une même station ou des différences entre les stations tout court. Comme elle permet également de prendre en considération le niveau de qualification et des moyens matériels des équipes de maintenance.

Conclusion :

Les graphes de Markov sont très efficaces 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 compliqué de modéliser des systèmes complexes avec des redondances ou le nombre d'élément est important ce qui se traduit par une explosion combinatoire d'où l'association de cette démarche a une approche systémique facilitant par la même l'aspect modélisation.

Chapitre V

Evaluation de la performabilité de l'oléoduc OB1

Introduction :

Après la modélisation de la fiabilité, maintenabilité et disponibilité du système OB1 par les graphes de Markov dans le chapitre précédent, une analyse des exigences de performabilité de ce système est donnée dans ce chapitre.

V.1. Evaluation de la performabilité de l'oléoduc OB1 :

V.1.1. Modèle de fiabilité :

Les états de défaillance de l'oléoduc OB1 ont été modélisés par les graphes de Markov (dans le chapitre précédent).

V.1.2. Modèle processus (régime de fonctionnement) :

Le modèle de processus permettra de déterminer les débits véhiculés par l'oléoduc OB1 pour les différents états de défaillance obtenus dans le modèle de fiabilité.

IV.1.3.2. Calcul hydraulique :

Les tableaux suivants présentent les résultats de calcul hydraulique de l'OB1, en suivant l'organigramme et les différentes équations citées dans le chapitre III :

V.1.2.1.1 Données des tronçons entre les stations de pompage :

Le tableau suivant représente les données de base pour déterminer les différents paramètres nécessaires dans notre calcul :

Paramètres	Symboles et unités	Tronçons entre stations de pompage			
		SP1-SP1Bis	SP1Bis-SP2	SP2-SP3	SP3-Selatna
Diamètre extérieur	Dext (mm)	609,6	609,6	609,6	609,6
longueur	L _T (m)	189830	160659	135754	46974
Différence d'altitude	ΔZ (m)	-67,34	134,1	248,1	566,8
Viscosité	ν (m ² /s)	0,000003383	0,000003383	0,000003383	0,000003383
Masse volumique	ρ (kg/m ³)	802,3	802,3	802,3	802,3
Rugosité	e (mm)	0,046	0,046	0,046	0,046
Pression d'aspiration	P _{asp} (bar)	10	1	1	1

Tableau V. 1: Données du calcul.

V.1.2.1.2 Calcul de la charge de refoulement exigée et la pente hydraulique pour le débit 1800 m³/h :

Paramètres	Symboles et unités	Formule	Tronçons entre stations de pompage			
			SP1-SP1Bis	SP1Bis-SP2	SP2-SP3	SP3-Selatna
Epaisseur moy	δ_{moy} (m/s)	(III.1)	7,31	7,31	7,31	7,31
Diamètre intérieur	D_{int} (mm)	(III.2)	594,98	594,98	594,98	594,98
Vitesse moyenne	ω_{moy} (m/s)	(III.6.c)	1,798354841	1,798354841	1,798354841	1,798354841
Rugosité relative	ε	(III.10)	0,000154627	0,000154627	0,000154627	0,000154627
Reynolds	Re	(III.7)	316282,9332	316282,9332	316282,9332	316282,9332
Reynolds critique I	Re_{crl}	(III.8)	1347780,899	1347780,899	1347780,899	1347780,899
Reynolds critique II	Re_{crlII}	(III.9)	18853748,55	18853748,55	18853748,55	18853748,55
Régime d'écoulement	Écoulement tube lisse					
Coefficient de perte de charge	λ	Formule de Blasius	0,013341896	0,013341896	0,013341896	0,013341896
Les pertes de charge totale	H_T (m)	(III.14.b)	715,7015554	605,7203613	511,8229413	177,1024857
La charge d'aspiration	H_{asp} (m)	(III.16)	127,0557138	12,70557138	12,70557138	12,70557138
La charge de refoulement	H_{exg} (m)	(III.15.b)	775,4172692	752,5259327	772,6285127	756,6080571
La pression de refoulement	$P_{\text{ref exigée}}$ (bar)	(III.16)	61,02970468	59,22802762	60,81021385	59,5493138
La pente hydraulique	i (10 ⁻³)	(III.17)	3,770224	3,770224	3,770224	3,770224

Tableau V. 2: Les résultats numériques du calcul hydraulique.

V.2.1.2.1 Représentation graphique :

a) Les pentes hydrauliques :

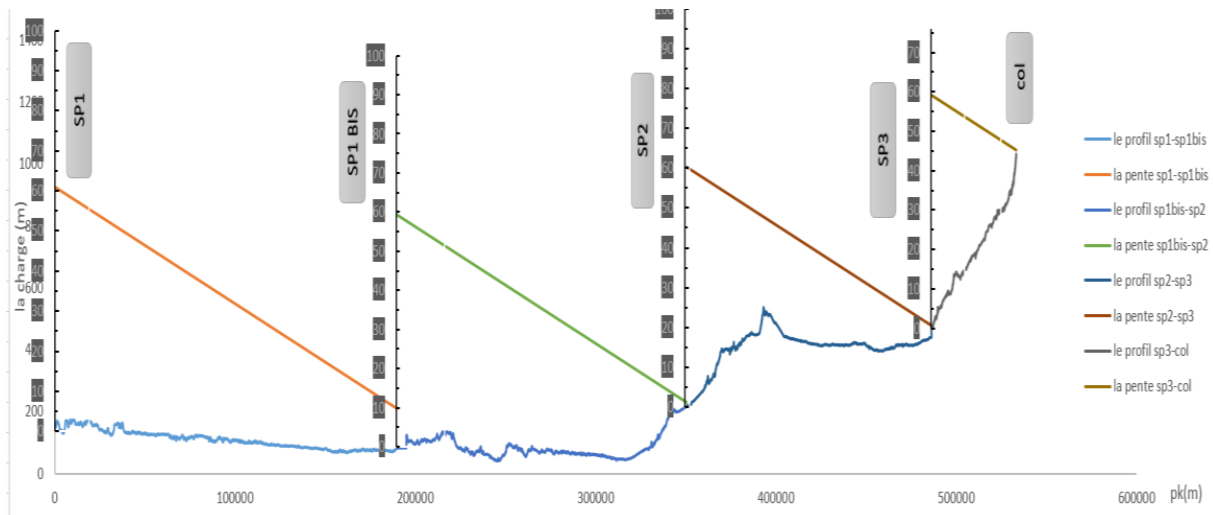


Figure V. 1: Profil au long et les pentes hydrauliques.

b) Les courbes caractéristiques de conduite :

On représente le résultat de calcul de la charge de refoulement exigée en fonction du débit sous forme de courbe caractéristique de conduite :

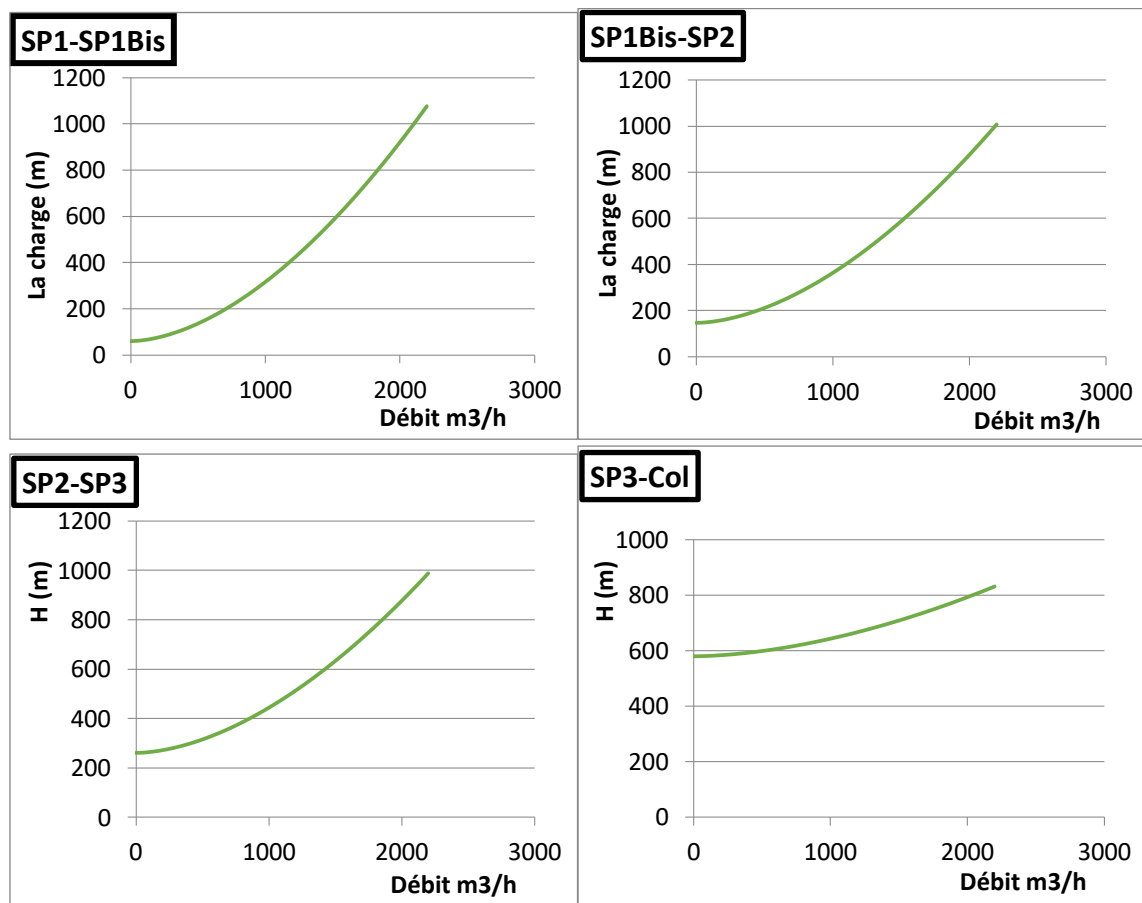


Figure V. 2: Courbe caractéristique des conduites

V.1.2.1.3 Calcul de la charge de refoulement d'une station (H_{ref-st}) :

1. Charge manométrique des pompes principales et booster :

Pour calculer cette charge il faut d'abord déterminer les coefficients 'a' et 'b' caractérisant les courbes des pompes (voir annexe).

2. Modélisation des courbes caractéristiques des pompes :

Sur la base d'un ensemble de points caractérisé par leurs coordonnées (H_p , Q) obtenues par lecture sur le graphe de la caractéristique H , Q de la pompe, une modélisation par régression linéaire a été établie de manière à déterminer les coefficients du modèle de type $H_p = a - bQ^2$.

✓ Statistique de La régression linéaire a été réalisé sous Excel :

Regression Statistics								
Multiple R	0,991806385							
R Square	0,983679905							
Adjusted R Squ	0,980415886							
Standard Error	2,834128549							
Observations	7							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	1	2420,69572	2420,7	301,371	1,162E-05			
Residual	5	40,16142315	8,03228					
Total	6	2460,857143						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	294,4837607	1,687084252	174,552	1,2E-10	290,14697	298,8205489	290,146973	298,8205489
X Variable 1	-1,02782E-05	5,92058E-07	-17,36	1,2E-05	-1,18E-05	-8,75622E-06	-1,18E-05	-8,7562E-06

Tableau V. 3: Détermination des coefficients (a, b) par la méthode de la régression linéaire. On a pu obtenir les coefficients indiqués sur le tableau :

Pompes	Coefficients	Les stations de pompages			
		SP1	SP1Bis	SP2	SP3
Principale	a	294,4837	1105,7214	311,8182	1014,6300
	b	$-1,02781 \cdot 10^{-5}$	- 4,7439	$-1,3 \cdot 10^{-5}$	$-5,343910^{-4}$
Booster	a	37,9316	/	96,5883	96,5883
	b	$-8,1729 \cdot 10^{-6}$	/	$-3,2397 \cdot 10^{-5}$	$-3,2397 \cdot 10^{-5}$

Tableau V. 4: Coefficients des modèles mathématiques des caractéristiques des pompes.

De la modélisation des courbes caractéristiques H, Q des pompes centrifuges, nous pouvons maintenant calculer la hauteur manométrique des pompes principales et boosters ainsi que celles des stations de pompage en usant des formules :

- ❖ Série (III.22).
- ❖ Parallèle (III.23).

Pompe	/	SP1	SP1Bis	SP2	SP3
Pompe principale	Nombre	3	1	3	3
	Assemblage	Série	Parallèle	Série	Parallèle
	Hpp	261,183041	953,441	269,6983	
	nHpp	783,549123	953,441	809,0949	823,83
Pompe booster	Nombre	2	/	2	2
	Assemblage	Parallèle	/	Parallèle	Parallèle
	Hpb	31,2896	/	70,6684	70,6684

Tableau V. 5: Charge manométrique des pompes principales et booster.

- Maintenant on peut calculer la charge de refoulement d'une station à partir de la formule (III.24) :

Symboles et unités	Les stations de pompages			
	SP1	SP1Bis	SP2	SP3
Hal	12.70557138	127.0557138	12.70557138	12.70557138
Href-st (m)	827,5443	1080,4967	892,4688	907,2039

Tableau V. 6: la charge refoulement des stations.

3. Représentation graphique :

On représente les résultats de calcul de la charge de refoulement-station en fonction de débit sous forme des courbes caractéristiques suivantes :

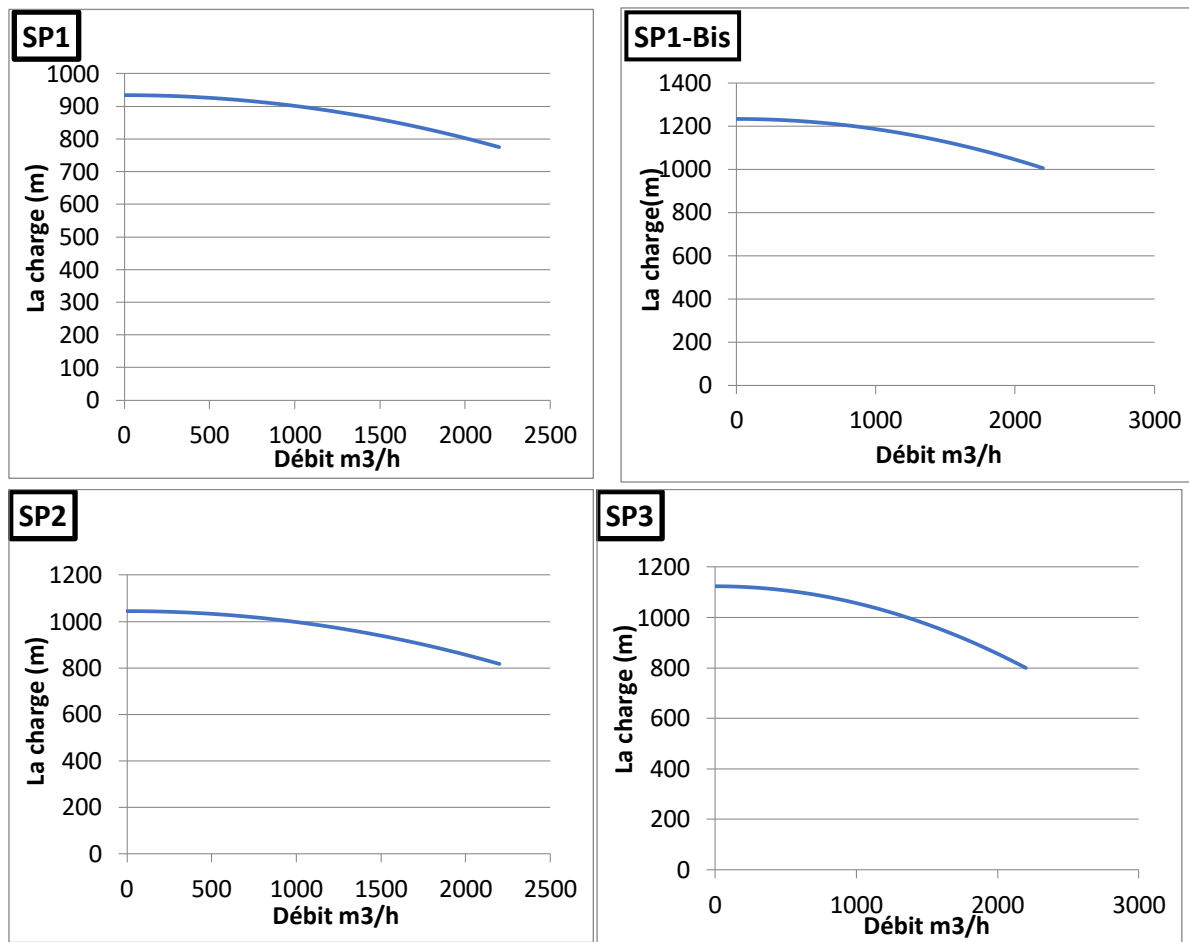


Figure V. 3: les courbes caractéristiques la charge de refoulement-station

V.1.2.1.4 Le point de fonctionnement :

D'après les résultats obtenus dans les calculs de la charge de refoulement exigé (caractéristique conduite) et celle de la charge de refoulement-station (caractéristique station) et la formule (III.25).

On obtient des courbes les points de fonctionnement suivants :

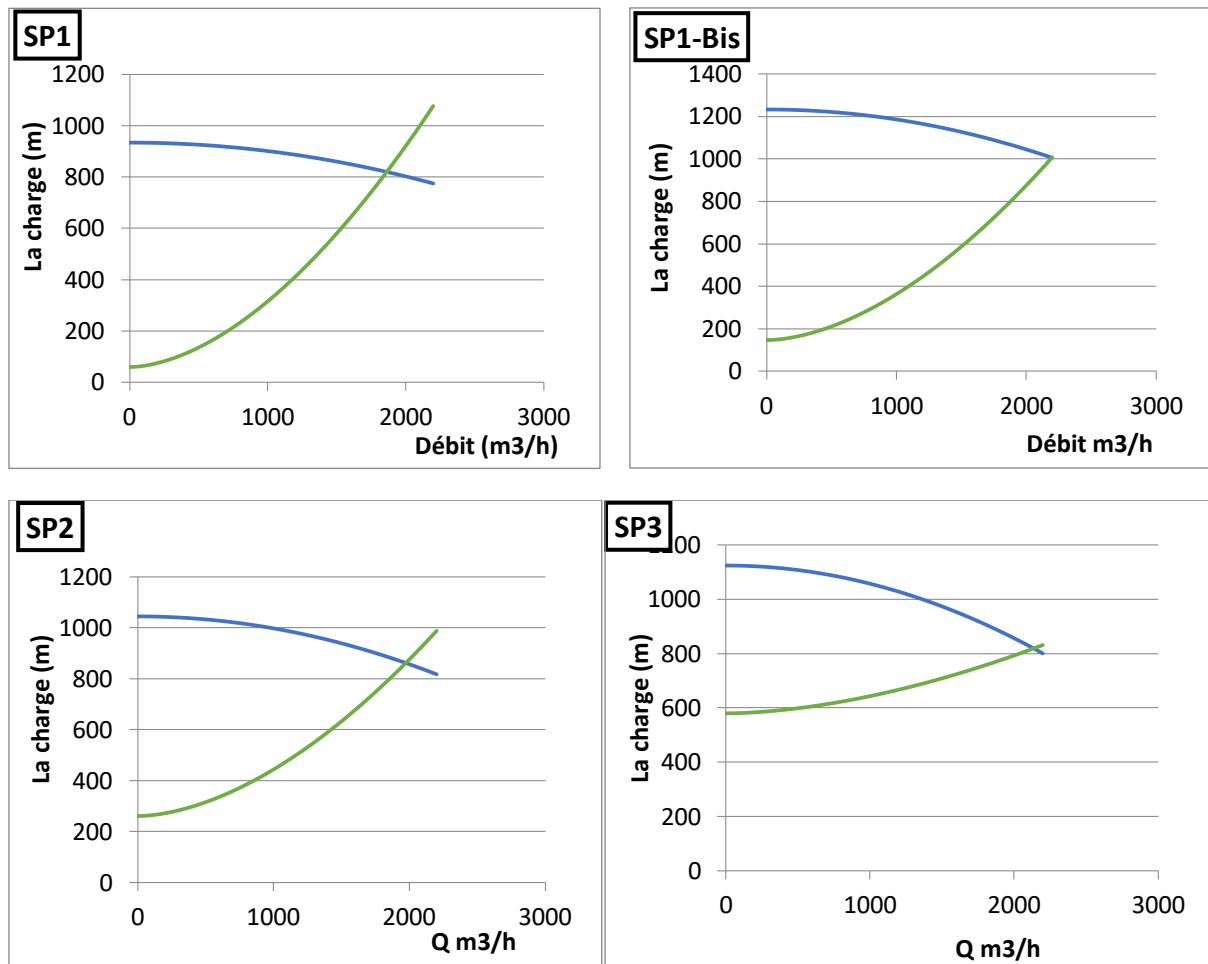


Figure V. 4: Représentation graphique du point de fonctionnement.
Le tableau suivant définit le débit correspond au point d'intersection (graphiquement) :

Les stations de pompages	Débit (m3 /h)
SP1	1850
SP1Bis	2150
SP2	1950
SP3	2100

Tableau V. 7: Débit correspond au point d'intersection.

V.1.2.1.5 Interprétation des résultats :

En analysant les résultats du calcul hydraulique, on peut conclure que la charge de refoulements exigés (pour chaque station) afin d'acheminer le brut jusqu'au Col de Selatna pour un débit de 1800 m³/h est inférieure à la charge disponible. Nous remarquons que dans ces conditions que la charge disponible peut véhiculer des débits supérieurs à 1800 m³/h comme mentionné dans le tableau des points de fonctionnement. Donc on sera dans l'obligation de diminuer cette charge dans notre cas par une méthode de régulation en diminuant la vitesse de rotation.

V.1.2.1.6 Régulation de la vitesse de rotation :

Dans notre système, la méthode de régulation la mieux adaptée pour obtenir la charge exigée pour transporter un débit de 1800 m³/h est de jouer sur la variation de la vitesse de rotation.

Dans ce cas de régulation on définira le nouveau coefficient (ax) (formule (III. 28) des pompes pour avoir des charges refoulées par les stations qui coïncident avec les pressions exigées en modifiant la vitesse de rotation des pompes.

Pour commencer il faut d'abord déterminer la valeur de H'pp correspondante a la charge exigée (formule (III. 29)).

Paramètres	Symbole et unité	Tronçons entre stations de pompage			
		SP1-SP1Bis	SP1Bis-SP2	SP2-SP3	SP3-Selatna
Charge unitaire de pp	H'pp	243,8073526	625,4702188	229,75171	673,23409
Vitesse de rotation nominale	n	2950	3970	2950	3560
Vitesse de rotation réduite	nx	2861,646138	3329,567309	2754,565296	3285,198294
Coefficient	ax	277,1080726	777,7502189	271,8715171	864,0340957

Tableau V. 8: Régulation de la vitesse de rotation des pompes.

Après avoir déterminé les nouvelles vitesses de rotation des pompes principales au niveau des stations de pompage on a obtenu les résultats qui correspondent à la charge de refoulement exigé.

V.1.2.1.7 Nouveau point de fonctionnement après régulation :

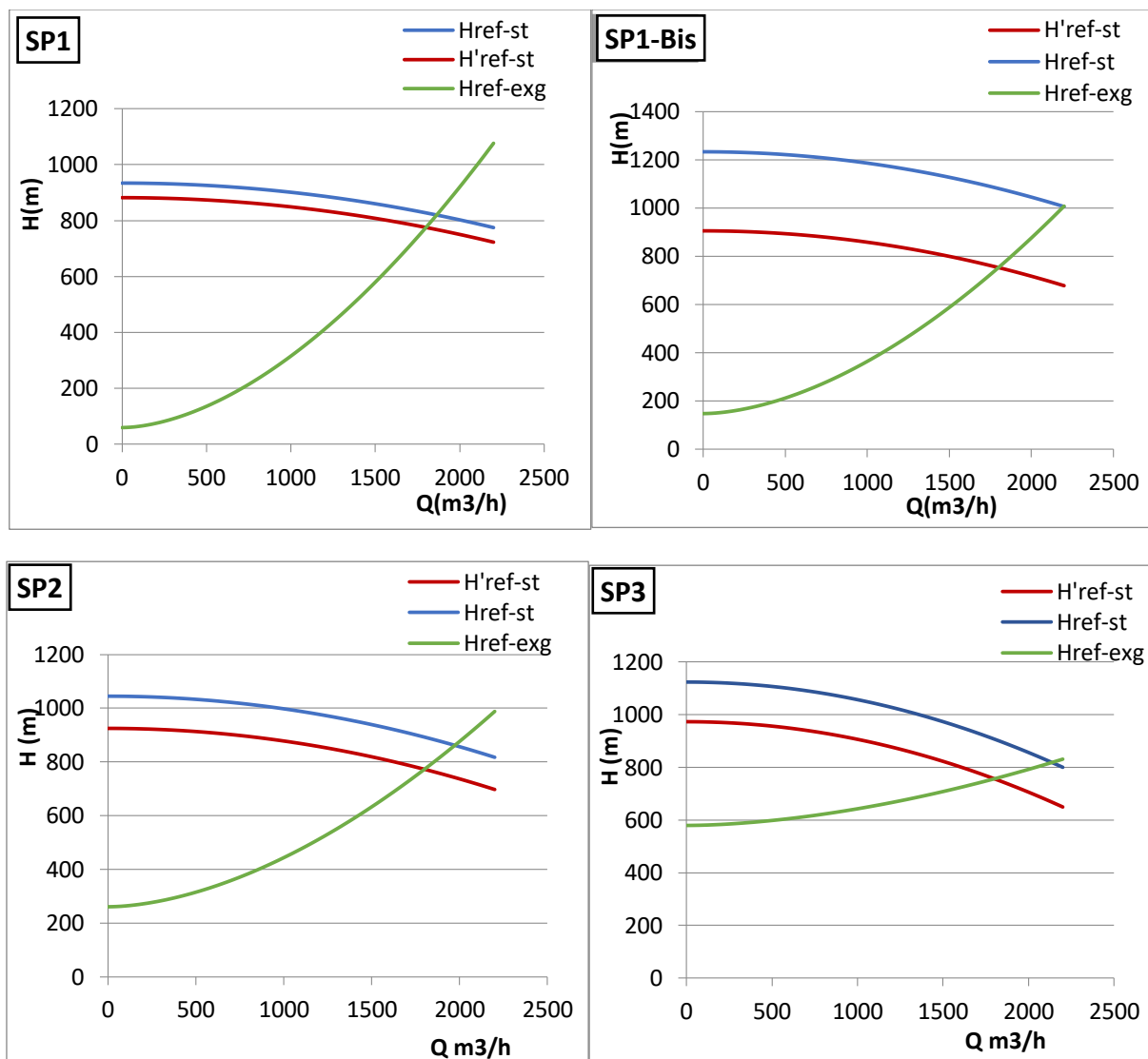


Figure V. 5: Représentation graphique du nouveau point de fonctionnement correspondant au débit 1800 m³/h.

V.1.2.1.8 Calcul des Rendements et puissances :

On termine notre calcul dans cette partie par les résultats du régime de fonctionnement des stations mentionnés dans le tableau :

Paramètres	Symboles et unités	Formule	Les stations de pompages			
			SP1-SP1BIS	SP1BIS-SP2	SP2-SP3	SP3-Col
Rendement max	$\eta_{\max}$		0,88	0,825	0,855	0,8
Rendement de pompe	η_p	(III.20)	0,8754	0,8235	0,8419	0,7792
Puissance absorbée par pompe	$P_a (N_{\text{exg}})$ (KW)	(III.21.a)	1095,9999	2988,7531	1073,9211	1133,2975
Puissance max de moteur ou turbine	$P_m (N)$ (KW)	(III.21.b)	1315,1999	3586,5036	1288,7053	1359,9570

Tableau V. 9: Calcul des rendements et puissances des pompes.

V.1.2.1.9 Détermination des débits des états de défaillance :

Par calcul itératif, on trouve les résultats suivants qui correspondent la charge de refoulement :

$$Q = \sqrt{\frac{(H_{\text{ref}} - \Delta Z - H_{\text{fin}}) \times \pi^2 \times D^5 \times g}{8,16 \times L \times \lambda}} \quad (\text{V. 1})$$

Cas de SP en panne	Débit Q_k (m ³ /h)
SP1	0
SP1-Bis	1251,598
SP2	941,74
SP1-Bis et SP2	807,356
SP3	0

Tableau V. 10: Calcul des débits des états de défaillance.

1. Calcul de la charge de refoulement exigée et disponible pour chaque cas :

Cas de panne	Symboles et unités	Les stations de pompages			
		SP1	SP1-Bis	SP2	SP3
SP1-Bis	Href	775,4172	/	530,5082	672,8288
	Hpp	261,1830	/	291,4538	807,0689
	Hpb	31,2896	/	84,05640	84,05640
	Hdis	827,5443	/	679,6696	903,8309
SP2	Href	288,7444	752,5259	/	636,1794
	Hpp	285,3685	953,441	/	544,5867
	Hpb	30,6593	/	/	89,4934
	Hdis	328,7333	1080,4967	/	646,7857
SPBis-SP2	Href	775,4172	/	/	622,7707
	Hpp	261,1830	/	/	669,1632
	Hpb	31,2896	/	/	75,7300
	Hdis	827,5443	/	/	757,5988

Tableau V. 11: calcul des charges de refoulement.

On peut conclure que la charge de refoulements exigés (pour chaque station) afin d'acheminer le brut jusqu'au Col de Selatna pour chaque débit (chaque cas de panne) est inférieure à la charge disponible.

2. Régulation de la charge de refoulement :

La méthode de régulation la mieux adaptée pour obtenir la charge exigée pour transporter le débit de chaque cas est de jouer sur la variation de la vitesse de rotation et le nombre des pompes.

En utilisant les formules de chapitre III :(III. 27), (III. 28), (III. 29)

Cas de panne	Symboles et unités	Les stations de pompages			
		SP1	SP1-Bis	SP2	SP3
SP1-Bis	H'pp	243,8073	/	216,8731	576,0669
	N.de Pompe principale	3	/	2	2
	N.de Pompe booster	2	/	2	2
	n	2950	/	2950	3560
	nx	2861,3970	/	2573,1374	3128,6077
	ax	277,1080	/	237,2376104	783,6279667
SP2	H'pp	245,3795	625,4702	/	533,9804
	N.de Pompe principale	1	1	/	1
	N.de Pompe booster	1	/	/	2
	n	2950	3970	/	3560
	nx	2742,4001	3329,5673	/	3541,3441
	ax	254,4948	777,7502	/	1004,0237
SPBis-SP2	H'pp	243,8073	/	/	534,3351
	N.de Pompe principale	3	/	/	1
	N.de Pompe booster	2	/	/	1
	n	2950	/	/	3560
	ax	2861,3970	/	/	3315,0386
	ax	277,1080	/	/	879,8019

Tableau V. 12: régulation de la charge de refoulement pour de chaque cas.

3. Nouveau point de fonctionnement avant et après régulation :

a. Cas de sp1-bis en panne :

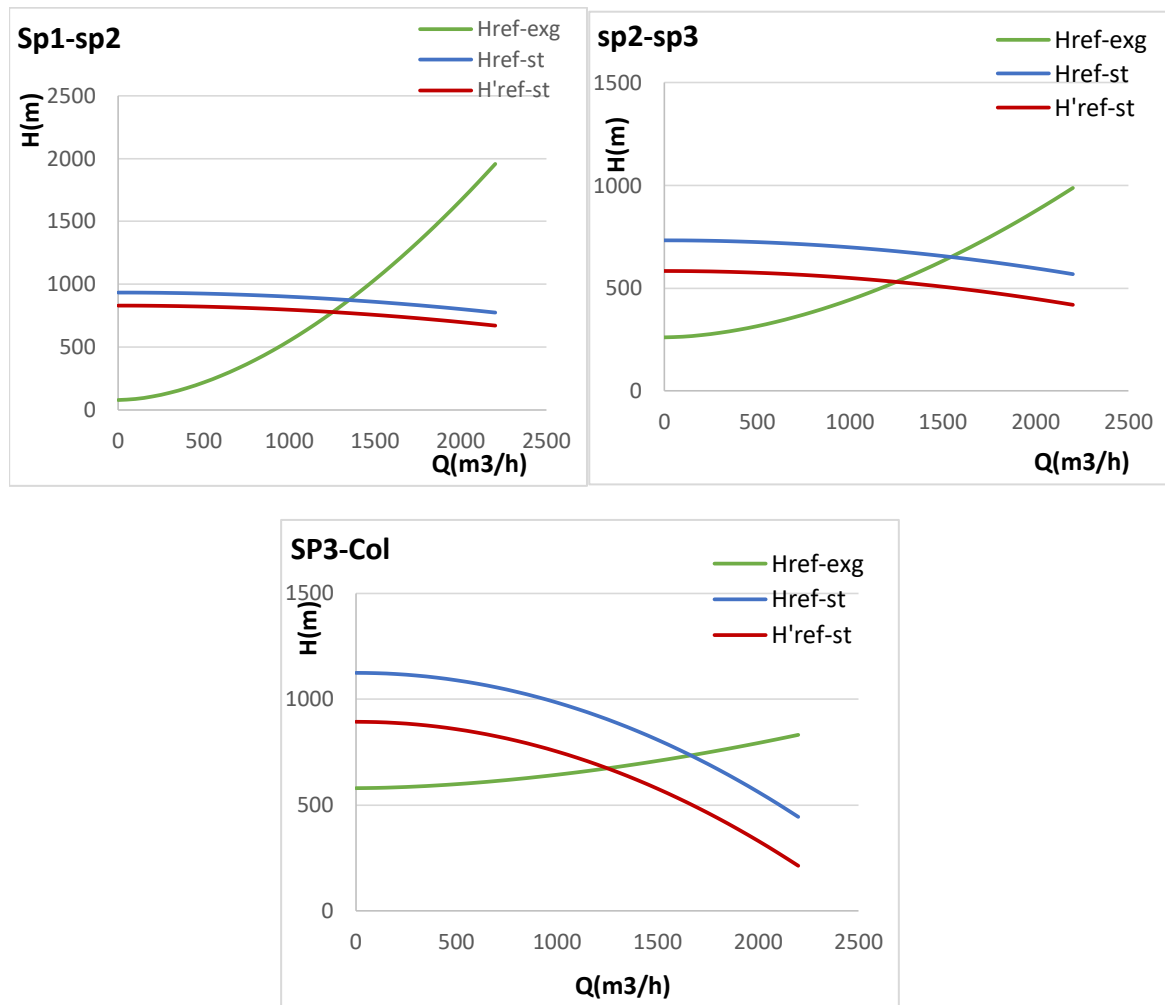


Figure V. 6: Représentation graphique du point de fonctionnement correspondant au débit 1251,598 m^3/h .

b. Cas de sp2 en panne :

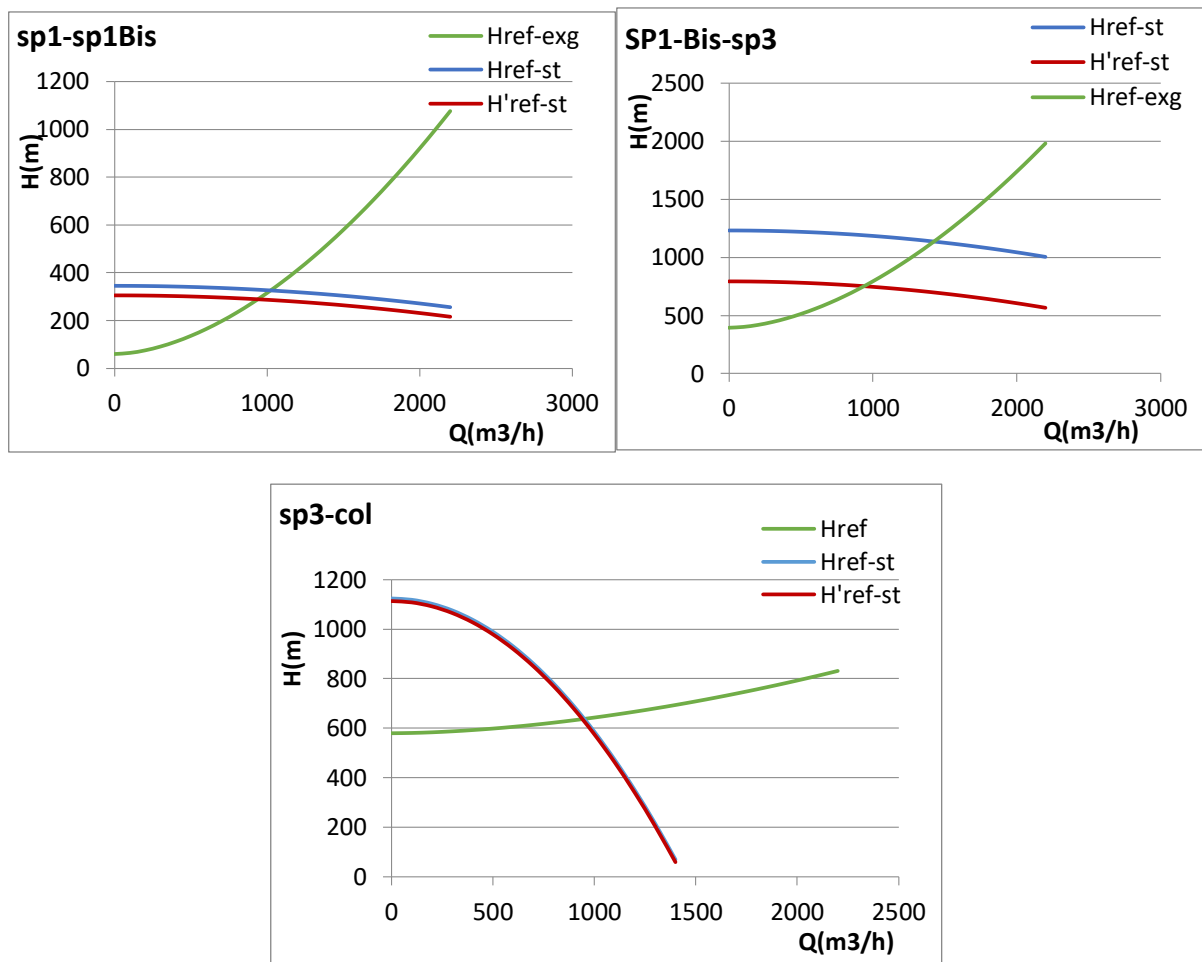


Figure V. 7: Représentation graphique du point de fonctionnement Correspondant au débit 941,74 m³/h.

c. Cas de sp1-bis et sp2 en panne :

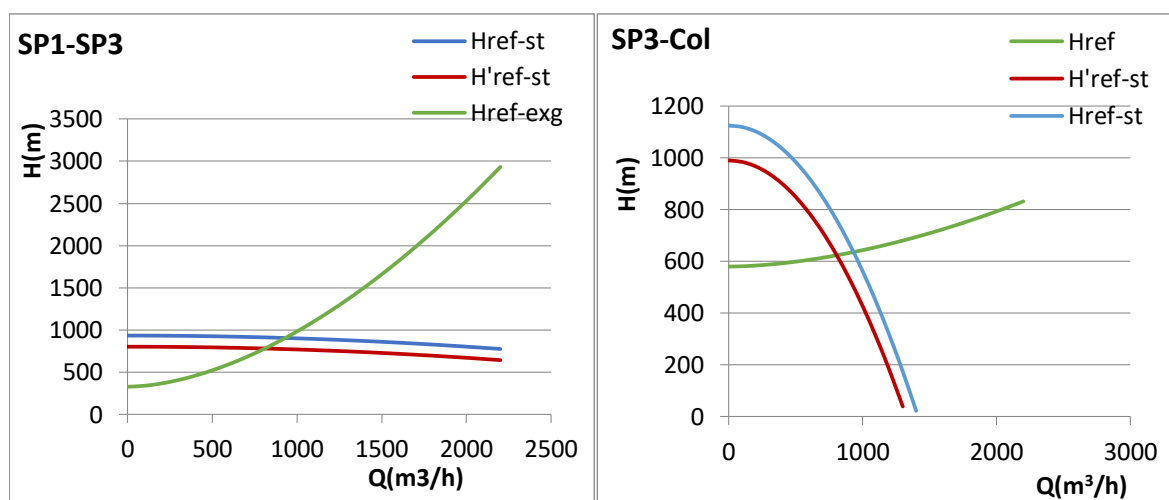


Figure V. 8: Représentation graphique du point de fonctionnement Correspondant au débit 807,356 m³/h.

4. Représentation des pentes hydraulique pour les trois cas de panne :

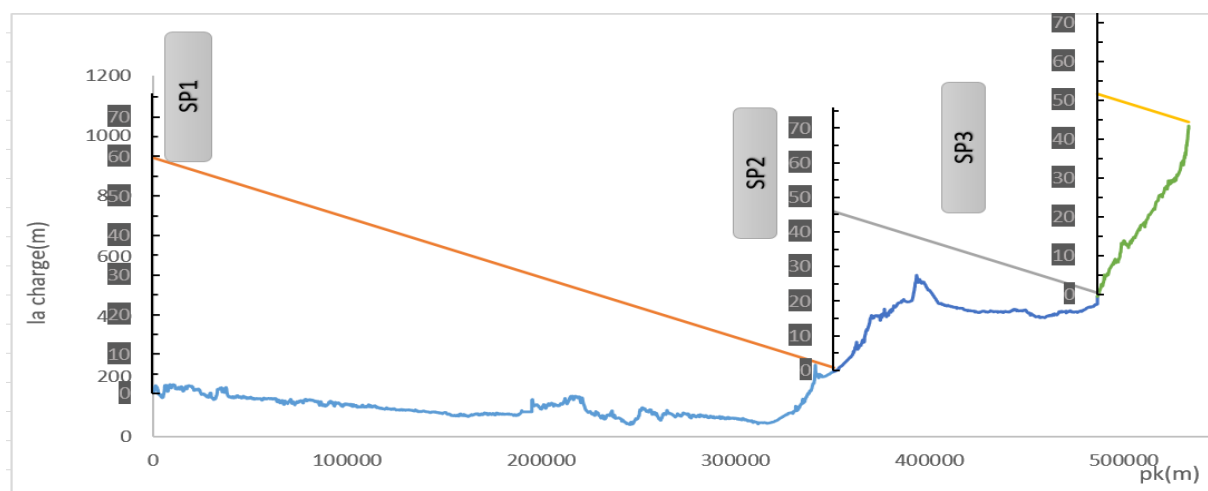


Figure V. 9: les pentes hydrauliques qui correspondent au débit 1251,598 m³/h (sp1-bis).

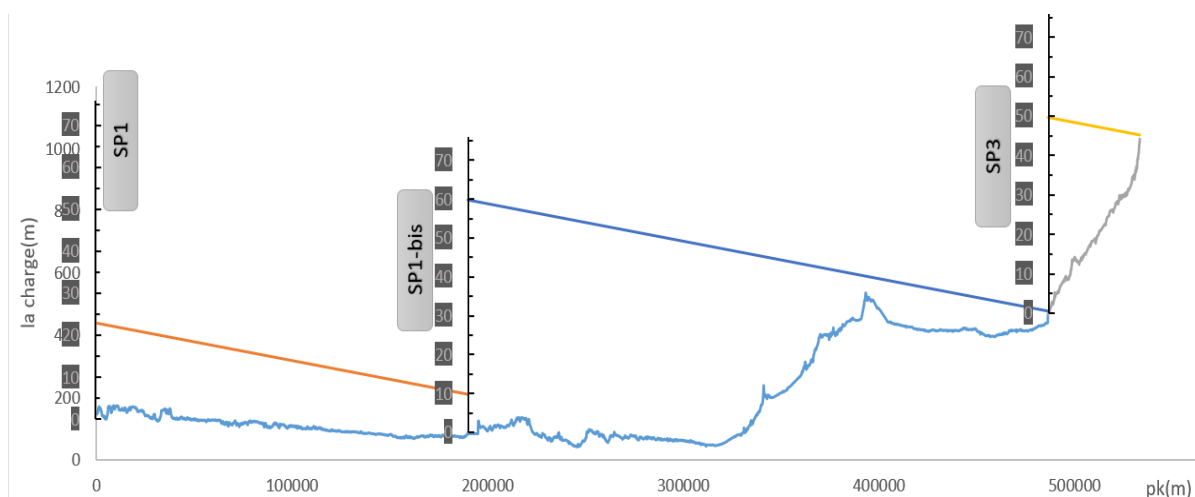


Figure V. 10: les pentes hydrauliques qui correspondent au débit 941,74 m³/h (SP2).

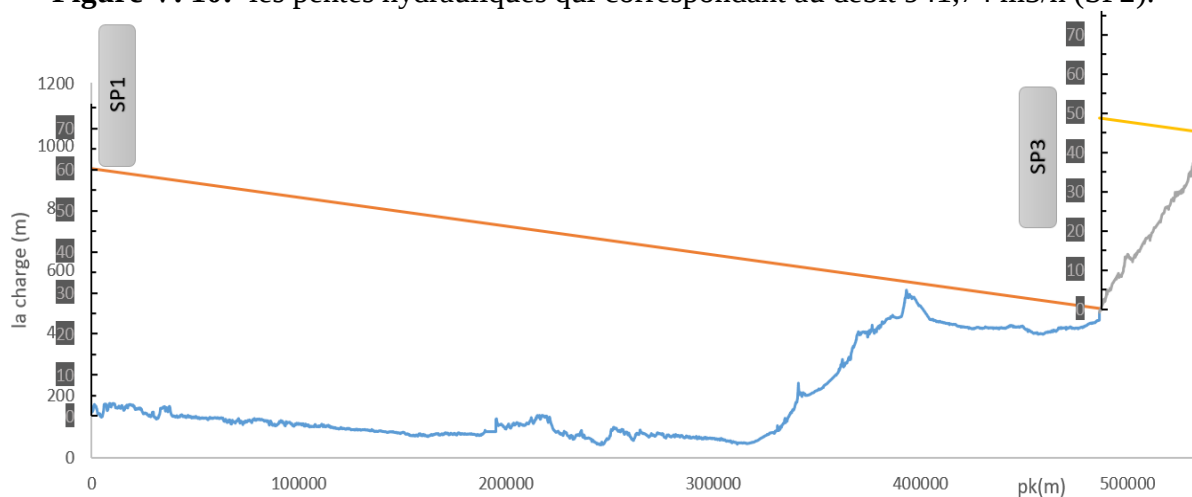


Figure V. 11: les pentes hydrauliques qui correspondent au débit 807,356 m³/h (SP1-Bis et SP2).

V.1.3. Modèle de performabilité :

La performabilité de système de transport OB1 dans cette étude est calculée comme suit :

$$P = \frac{1}{Q_0} \sum_{k=0}^s P_k Q_k \quad (\text{V. 2})$$

P_k : Probabilité de l'état de panne k ;

Q_k : Débit de production associé à l'état de panne k ;

Q_0 : Débit nominal (1800 m³/h).

V.1.3.1. Calcul de la performabilité :

N état	Probabilité	Qi	Qi * Pi
1	0,9978	1800	1796,039228
2	0,0018	0	0
3	0,0001	0	0
4	0,0001	1251,598396	0,12515984
5	0,0001	941,7399052	0,094173991
6	0,0001	0	0
7	1,92E-07	0	0
8	1,85E-07	0	0
9	1,05E-08	0	0
10	1,01E-08	0	0
11	1,05E-08	807,3561946	8,44612E-06
12	1,05E-08	0	0
13	1,01E-08	0	0
14	1,93E-11	0	0
15	1,05E-12	0	0
16	1,05E-12	0	0
			1796,25857

Tableau V. 13: Tableau récapitulatif du système transport OB1.

- La performabilité de l'OB1 est:

$$P = \frac{1796,25857}{1800}$$

$$P = 0,997921428$$

On peut alors dire que le système possède une bonne performance puisque la valeur de la performabilité est de 0,997. Cependant cette valeur reste tributaire des paramètres de fiabilité et dépend de la qualité des données.

V.2. Impact de la dégradation du pipeline sur la performabilité et la disponibilité :

Les éléments qui impact le plus la performabilité et la disponibilité sont généralement les éléments en série en l'occurrence (dans notre cas la canalisation).

Pour pouvoir apprécier l'influence de l'état de la canalisation sur les critères sus-cités. Nous considérerons un accroissement du taux de défaillance de canalisation jusqu'à sa valeur admissible fournie par les codes ne dépassant pas 10^{-3} pour tracer la variation de la disponibilité et la performabilité comme le montre les figures suivantes :

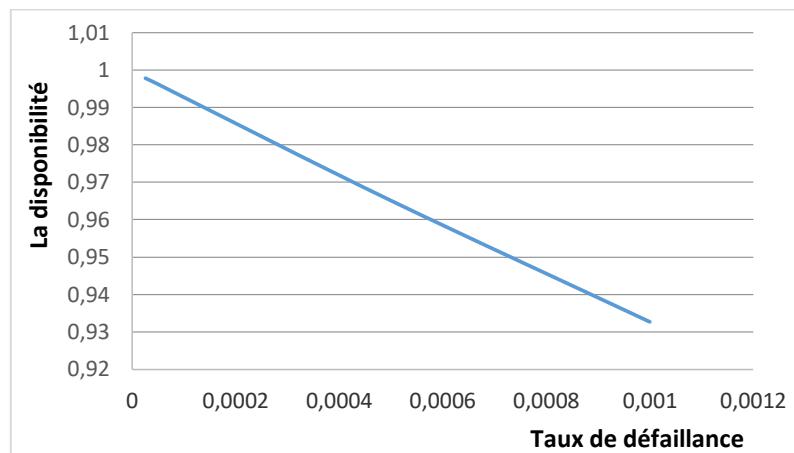


Figure V. 12: la variation de la disponibilité en fonction de la dégradation de canalisation.

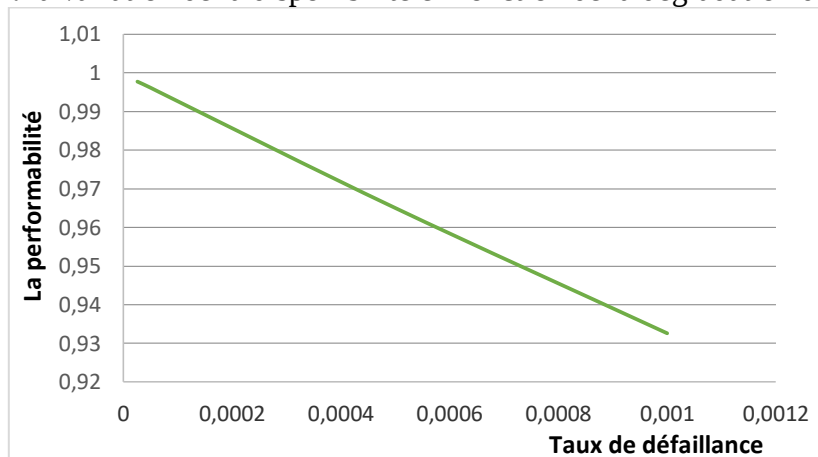


Figure V. 13: la variation de la performabilité en fonction de la dégradation de canalisation.

Conclusion :

La variation des indices des éléments en série a une très grande influence sur la disponibilité et performabilité.

La valeur maximale du taux de défaillance de canalisation ne dépasse pas 10^{-3} .

On constate que la performabilité et la disponibilité d'un l'oléoduc dépend principalement de l'état de la canalisation.

Chapitre VI

**Estimation des paramètres de fiabilité des principaux
éléments de l'oléoduc OB1**

Introduction :

Dans le cadre d'une modélisation de la disponibilité et de la fiabilité d'une station de pompage ; les paramètres de fiabilité doivent faire l'objet d'une estimation avec beaucoup de précision. La connaissance de ces indices permet par comparaison avec les valeurs disponibles dans les bases 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 oléoduc, l'identification des indices de fiabilité des pompes 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 recueillis sur site pour chaque équipement.

VI.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. ^[8]

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

1. Approche objective de l'estimation des indices de fiabilité :

L'approche classique de l'estimation des indices de fiabilité est représentée principalement par l'approche dite fréquentiste, basée sur la loi forte des grands nombres.

Si l'on suppose l'apparition d'une panne comme un événement indépendant, la superposition d'un grand nombre d'événements conduit le plus souvent à des flots poissonniers pour lesquels la durée entre deux événements successifs obéit à une loi exponentielle. Si $t_1, t_2, \dots, t_k$ est un jeu de variables aléatoires représentant les TBF observés d'un équipement donné, le MTBF et le taux de panne peuvent alors être estimés par les relations suivantes :

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

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

k est le nombre total de pannes se produisant durant la période de fonctionnement.

Le même raisonnement peut également être appliqué pour le MTTR :

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

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

τ_i : Durée de la réparation après apparition de la panne i.

μ_i : Taux moyen de réparation.

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 à priori, puis de déduire une probabilité à posteriori corrigée par les informations nouvellement acquises (inférence bayésienne). L'information disponible, susceptible d'être utilisée à 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.

VI.2. L'inférence bayésienne :

VI.2.1. 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.

VI.2.2. 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 prévisionnelle a posteriori.

VI.3. Estimation du taux de défaillance « λ » :**VI.3.2. 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 :

$$\begin{cases} \frac{a^p}{\Gamma(p)} x^{p-1} e^{-ax} & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x \leq 0 \end{cases} \quad (\text{IV.5})$$

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

$$\Gamma(P) = \int_0^{+\infty} x^{p-1} e^{-x} dx$$

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 $\Gamma(\alpha)$:

$$f(\lambda, \alpha, \beta) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \beta^\alpha \lambda^{\alpha-1} \exp(-\lambda\beta) \quad (\text{IV. 6})$$

$$\text{Qui a pour espérance : } s = E[f(\lambda, \alpha, \beta)] = \frac{\alpha}{\beta} \quad (\text{IV. 7})$$

$$\text{Et pour variance : } \sigma^2 = \frac{\alpha}{\beta^2} \quad (\text{IV. 8})$$

α : paramètre d'échelle

β : paramètre de forme.

Il suffit de résoudre ce système de deux équations à deux inconnues pour déterminer les paramètres α et β en fonction de s et σ^2 .

On en déduit :

$$\alpha = \frac{s^2}{\sigma^2} \quad ; \quad \beta = \frac{s}{\sigma^2} \quad (\text{IV. 9})$$

VI.3.2. Distribution a posteriori :

Dans ces conditions, la distribution a posteriori de λ s'exprime :

$$g(\lambda/k, \alpha, \beta) = \frac{1}{\Gamma(k + \alpha)} (t + \beta)^{(k+\alpha)} \lambda^{k+\alpha-1} \exp[-(t + \beta)\lambda] \quad (\text{IV. 10})$$

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

Qui a pour espérance :

$$\hat{s} = E[g(\lambda/k, \alpha, \beta)] = \frac{k + \alpha}{t + \beta} \quad (\text{IV. 11})$$

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 :

VI.3.1. Application numérique :

Les historiques de panne correspondant à ces machines sont mentionnés dans les tableaux suivants, il y a lieu de remarquer que dans ce cas, les machines sont identiques et fonctionnent dans un environnement commun.

Machine	Indisponibilité de pompe		Type d'intervention	Durée de marche en heures
	Début d'intervention	Fin d'intervention		
GEP1	25/02/2009	02/03/2009	Fuite garniture	9346
GEP1	04/03/2011	04/03/2011	Blocage de la pompe	9464

Tableau VI. 1: Les données des pompes GEP1.

Machine	Indisponibilité de pompe		Type d'intervention	Durée de marche en heures
	Début d'intervention	Fin d'intervention		
GEP2	03/05/2009	10/05/2009	Circuit d'évent de la pompe	10105
GEP2	03/04/2011	11/04/2011	Problème d'allumage	17213

Tableau VI. 2: Les données des pompes GEP2.

Machine	Indisponibilité de pompe		Type d'intervention	Durée de marche en heures
	Début d'intervention	Fin d'intervention		
GEP3	03/06/2011	06/06/2011	Fuite du système de refroidissement	20732
GEP3	19/05/2013	19/07/2013	Problème d'allumage	22924

Tableau VI. 3: Les données des pompes GEP3.

Machine	Indisponibilité de pompe		Type d'intervention	Durée de marche en heures
	Début d'intervention	Fin d'intervention		
GEP4	03/05/2010	03/05/2010	L'arrêt de ventilateur	8602
GEP4	19/05/2013	19/07/2013	Blocage de la pompe	8683

Tableau VI. 4: Les données des pompes GEP4.

Machine	Indisponibilité de pompe		Type d'intervention	Durée de marche en heures
	Début d'intervention	Fin d'intervention		
GEP5	05/05/2009	05/05/2009	Fuite garniture	11752
GEP5	06/04/2014	06/04/2014	Transmetteur de pression	17095

Tableau VI. 5: Les données des pompes GEP5.

SP1-Bis :

Machine	Indisponibilité de pompe		Type d'intervention	Durée de marche en heures
	Début d'intervention	Fin d'intervention		
TP01	26/02/2009	03/03/2009	Blocage de la pompe	9346
TP01	03/04/2010	03/04/2010	fuite du système de refroidissement	9464
TP01	05/05/2011	12/05/2011	Fuite garniture	10105
TP01	02/05/2012	10/05/2012	Transmetteur de pression	172113
TP01	01/07/2013	04/07/2013	circuit d'évent de la pompe	20732
TP01	19/04/2014	19/04/2014	Problème d'allumage	22924

Tableau VI. 6: Les données d'intervention corrective pour TP01.

Machine	Indisponibilité de pompe		Type d'intervention	Durée de marche en heures
	Début d'intervention	Fin d'intervention		
TP02	01/05/2009	01/05/2009	Fuite garniture	8602
TP02	03/06/2010	03/06/2010	problème d'allumage	8683
TP02	03/06/2011	12/06/2011	Fuite cyclone	8683
TP02	12/06/2012	20/06/2012	Non allumage turbine	8683
TP02	24/08/2014	29/08/2014	L'arrêt de ventilateur	11752
TP02	19/04/2014	19/04/2014	Aéroréfrigérant	17095

Tableau VI. 7: Les données d'intervention corrective pour TP02.

- Distribution a priori de λ :

Moyenne : $S = 0,00007052$
 Ecart type : $\sigma = 0,000108964$

Détermination des paramètres α et β :

$$\alpha = \frac{s^2}{\sigma^2} = \left(\frac{0,00007052}{0,000108964} \right)^2 \quad \alpha = 0,418847815$$

$$\beta = \frac{s}{\sigma^2} = \frac{0,00007052}{0,000108964^2} \quad \beta = 5939,418824$$

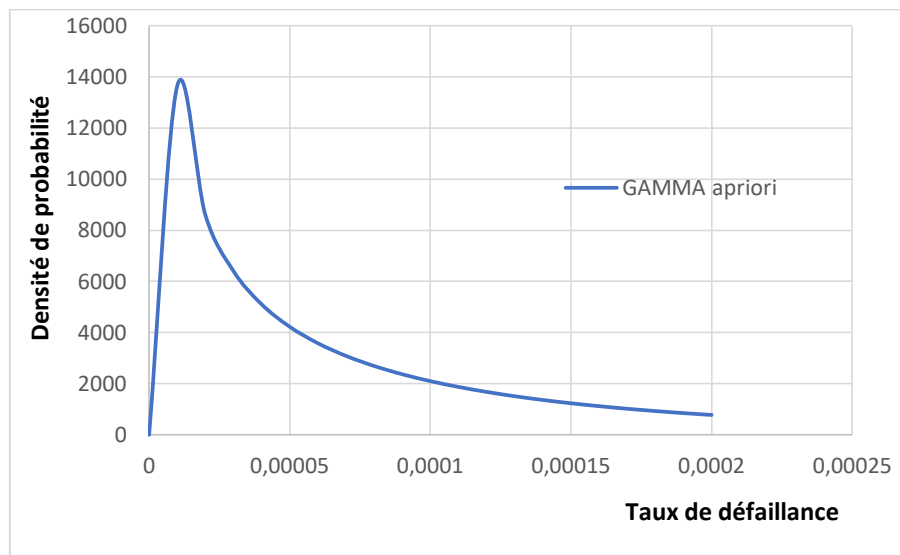


Figure VI. 1: Distribution a priori gamma de λ .

- Distribution a posteriori de λ :

Pour GEP1 :

Nombre de pannes $k = 2$; le temps de marche cumulé $t = 18810$ h

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

Paramètre d'échelle : $k + \alpha = 2 + 0,418847815 = 2,418847815$

Paramètre de forme : $t + \beta = 18810 + 5939,418824 = 24749,418824$

L'espérance correspond à l'estimateur bayésien a postérieur de λ :

$$\hat{s} = E[g(\lambda/k, \alpha, \beta)] = \frac{k + \alpha}{t + \beta} = \frac{2 + 0,418847815}{18810 + 5939,418824} = 9,773351981E-5 \text{ h}^{-1}$$

$$\hat{\lambda}_1 = 9,773351981E-5 \text{ h}^{-1}$$

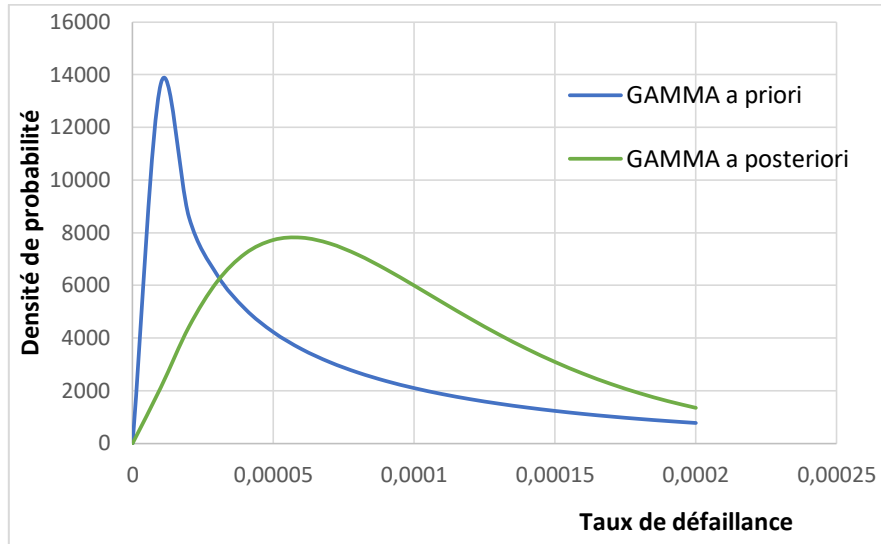


Figure VI. 2: Distribution a posteriori gamma de λ_1 .

Pour GEP2 :

$K=2$; $t=27318$ h

$$\hat{s} = E[g(\lambda/k, \alpha, \beta)] = \frac{k+\alpha}{t+\beta} = \frac{2+0,418847815}{27318+5939,418824} = 7,27311E-5h^{-1}$$

$$\hat{\lambda}_2 = 7,27311E-5h^{-1}$$

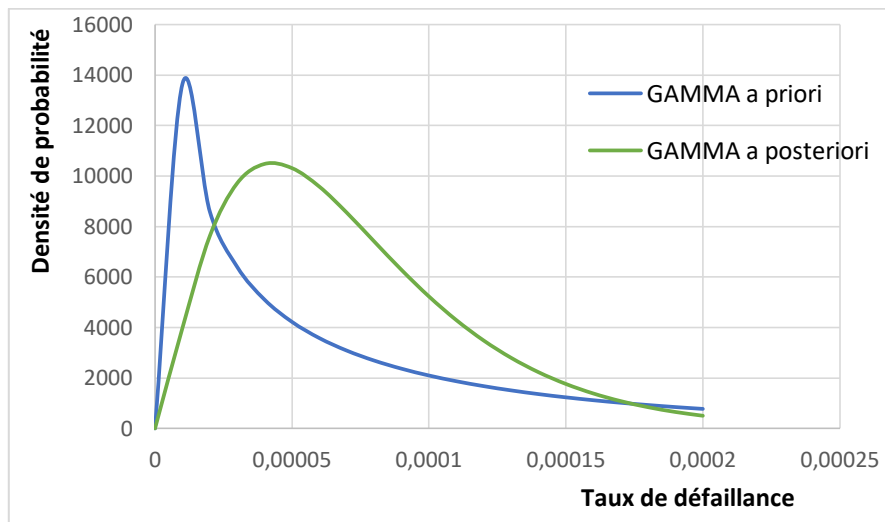


Figure VI. 3: Distribution a posteriori gamma de λ_2 .

Pour GEP3 :

$K=2$; $t=43656$ h

$$\hat{s} = E[g(\lambda/k, \alpha, \beta)] = \frac{k+\alpha}{t+\beta} = \frac{2+0,418847815}{43656+5939,418824} = 4,87716E-5h^{-1}$$

$$\hat{\lambda}_3 = 4,87716E-5h^{-1}$$

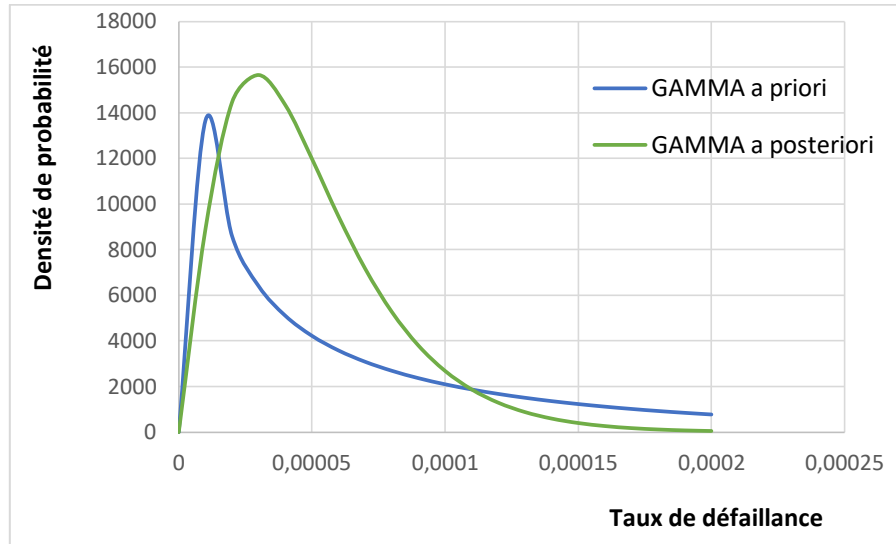


Figure VI. 4: Distribution a posteriori gamma de λ_3 .

Pour GEP4 :

$K=2$; $t = 17285$ h

$$\hat{s} = E[g(\lambda/k, \alpha, \beta)] = \frac{k+\alpha}{t+\beta} = \frac{2+0,418847815}{17285+5939,418824} = 0,000104151 \text{ h}^{-1}$$

$$\hat{\lambda}_4 = 0,000104151 \text{ h}^{-1}$$

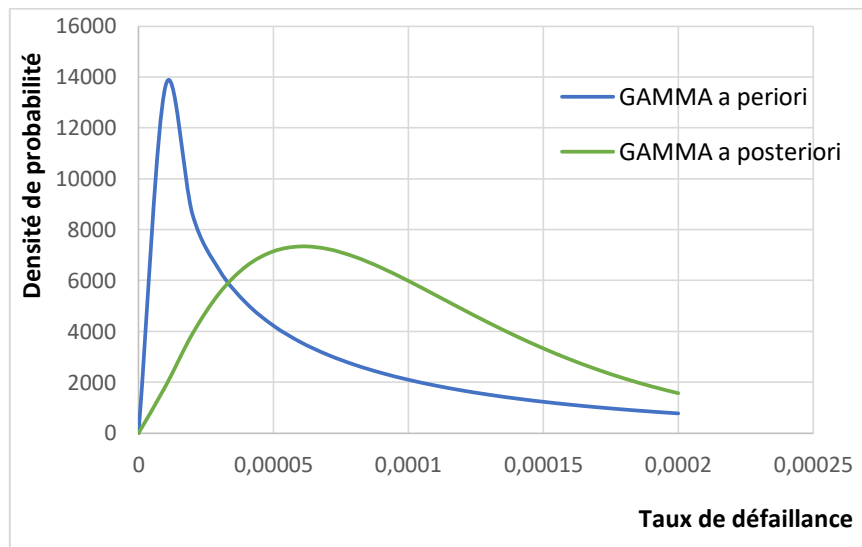


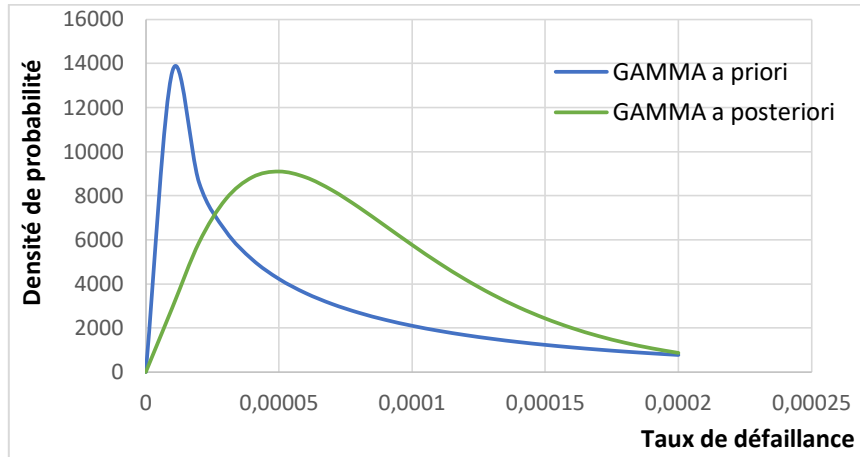
Figure VI. 5: Distribution a posteriori gamma de λ_4 .

Pour GEP5 :

$K=2$; $t = 22847$ h

$$\hat{s} = E[g(\lambda/k, \alpha, \beta)] = \frac{k+\alpha}{t+\beta} = \frac{2+0,418847815}{22847+5939,418824} = 8,40274E-5 \text{ h}^{-1}$$

$$\hat{\lambda}_5 = 8,40274E-5 \text{ h}^{-1}$$

Figure VI. 6: Distribution a posteriori gamma de λ_5 .

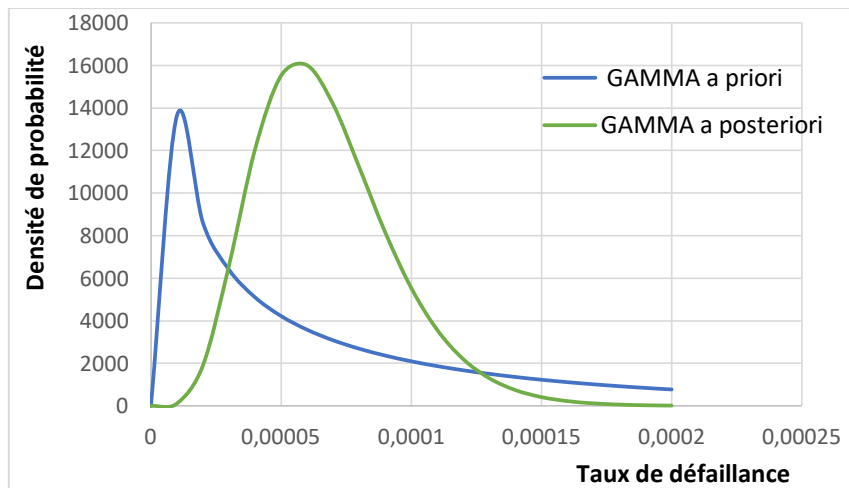
▪ SP1-Bis :

TP1 :

K= 6 ; t = 89784 h

$$\hat{s} = E[g(\lambda/k, \alpha, \beta)] = \frac{k+\alpha}{t+\beta} = \frac{6 + 0,418847815}{89784 + 5939,418824} = 6,70562E - 5h^{-1}$$

$$\hat{\lambda}_1 = 6,70562E - 5h^{-1}$$

Figure VI. 7: Distribution a posteriori gamma de λ_1 .

TP2 :

K= 6 ; t = 63498 h

$$\hat{s} = E[g(\lambda/k, \alpha, \beta)] = \frac{k+\alpha}{t+\beta} = \frac{6 + 0,418847815}{89784 + 5939,418824} = 9,24408E - 5h^{-1}$$

$$\hat{\lambda}_{1-a} = 9,24408E - 5$$

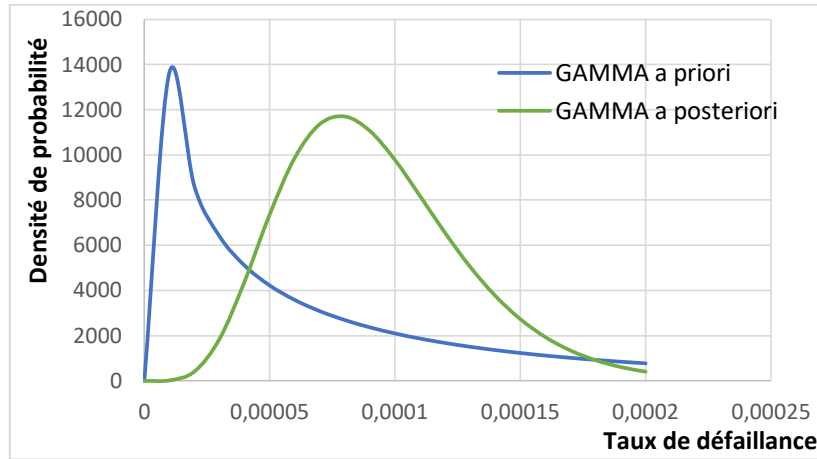


Figure VI. 8: Distribution a posteriori gamma de λ_{1-a} .

- **Analyse des resultats :**

L'analyse de ces graphes montre une convergence rapide de l'estimation par la démarche bayésienne du taux de défaillance même pour un faible niveau d'informations ce qui n'est pas le cas pour la démarche fréquentiste.

VI.4. Estimation des indices de fiabilité du pipe-line :

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. ^[9]

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 de la durée de réparation mais aussi à la durée logistique qui englobe le temps de remplissage, vidange, ...etc.

VI.4.1. Le taux de défaillance :

En raison de la structure en série de l'oléoduc, le taux de défaillance global est calculé comme la somme des taux de défaillance des composants (des tronçons) :

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^N \lambda_i L_i = \lambda L \quad (\text{IV. 11})$$

λ_c : Taux de défaillance global de l'oléoduc [heures⁻¹* Km] ;

λ_i : Taux de défaillance du tronçon i de l'oléoduc [heures]⁻¹ ;

λ : Taux de défaillance générique global de l'oléoduc [heures]⁻¹ ;

N : Nombre des tronçons ;

L_i : Longueur du tronçon i de l'oléoduc [km].

L : Longueur de l'oléoduc [km].

Le taux de défaillance d'un oléoduc en projet 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.4.2. Fréquences génériques de défaillance suivant les causes :

CONCAWE a effectué, en collaboration avec plusieurs exploitants, une étude des accidents survenus sur les oléoducs. 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 oléoducs enfouis ;
- La pression maximale est supérieure à 15 bars.

Causes	%
Défaillance mécanique	24,1
Opérationnel	1,7
Corrosion	20,7
Risques naturels	0,1
Autres causes	53,4

Tableau VI. 8: Causes de défaillances de pipeline en %.

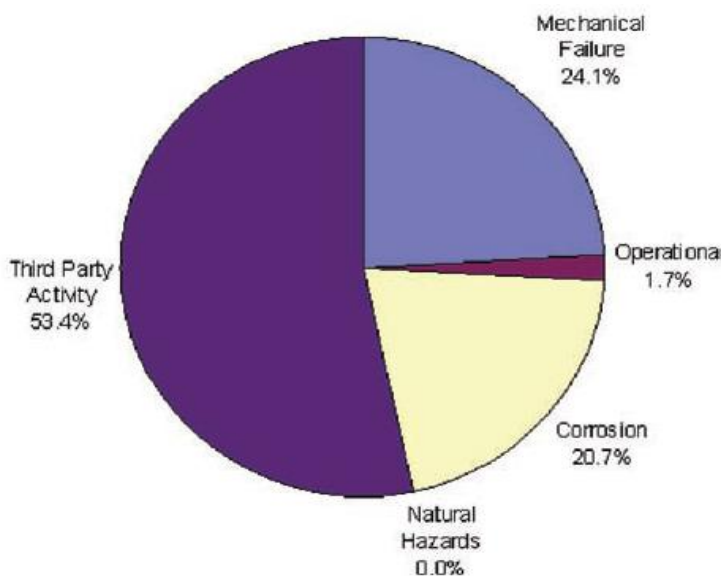


Figure VI. 9: Causes de défaillances d'oléoduc en %.

VI.4.3. Adaptation de données génériques aux particularités de l'ouvrage OB1 :

Pour le cas d'un oléoduc de grande longueur tel que L'OB1, 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 ;

Les données utilisées pour obtenir ces résultats sont recueillies sur une période assez longue (donc insensibles au biais induit par les progrès techniques dans le domaine de la gestion de l'intégrité des canalisations).

L'usage d'une démarche classique basée sur des données génériques brutes (des valeurs ayant des fréquences de dispersions statistiques assez larges et des estimations très variables d'une base de données à une autre), ne tient pas forcément compte des particularités de chaque ouvrage, cela peut se traduire par des sous-estimations ou des surestimations importantes des risques. Il est donc impérativement nécessaire de rectifier ces données pour avoir une bonne estimation des potentiels risques.

Dans cette étude, on opte pour les recommandations de l'UKOPA pour estimer le taux de défaillance de canalisation et comme mentionné dans le chapitre précédant le taux de défaillance global sera égal au taux de défaillance inopiné.

L'adaptation des fréquences d'occurrences est réalisée en accord avec les recommandations de l'UKOPA ; contenues dans le document suivant :

“Code of Practice for Pipelines-Part3: Guide to the Application of Pipeline Risk Assessment to proposed developments in the vicinity of major hazard pipelines containing flammables-Supplement to PD 8010-1. British Standard Institution, 2008”

On ne considère que quatre types de causes susceptibles de générer une défaillance correspondant à une perte de confinement dans un ouvrage particulier :

1. Dégradation du tube par perte de métal (corrosion interne et externe, érosion).
2. Interférences externes (travaux de tiers à proximités de l'ouvrage).
3. Défauts du matériel et vice de construction.
4. Causes diverses.

La probabilité de chaque cause est estimée comme suite :

1. 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-1 selon la classification de la zone).
2. A calculer selon règles UKOPA, est de l'ordre $1.2 \cdot 10^{-5}/\text{km.an}$
3. A calculer selon règles UKOPA, est de l'ordre $1.5 \cdot 10^{-5}/\text{km.an}$
4. A estimer (20% de la valeur de la probabilité totale).

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.

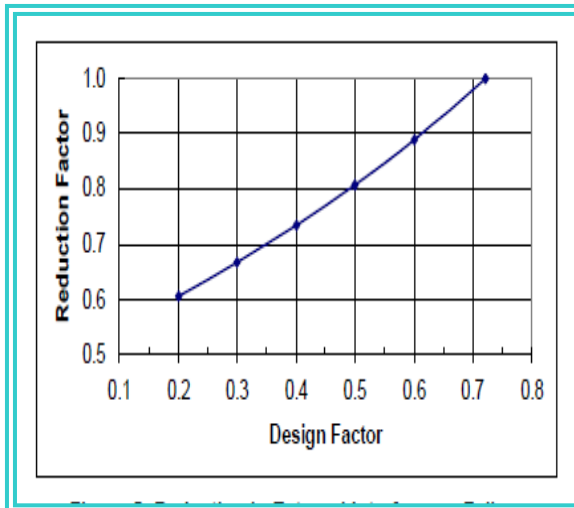


Figure VI. 10: Facteur de réduction en fonction du coefficient de sécurité design.

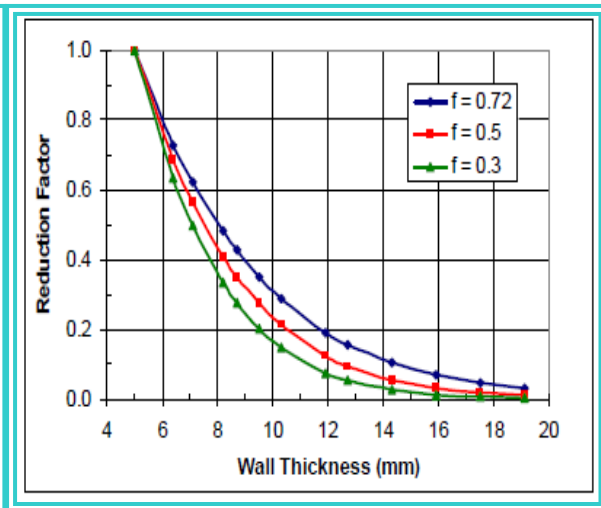


Figure VI. 11: Facteur de réduction en fonction de l'épaisseur.

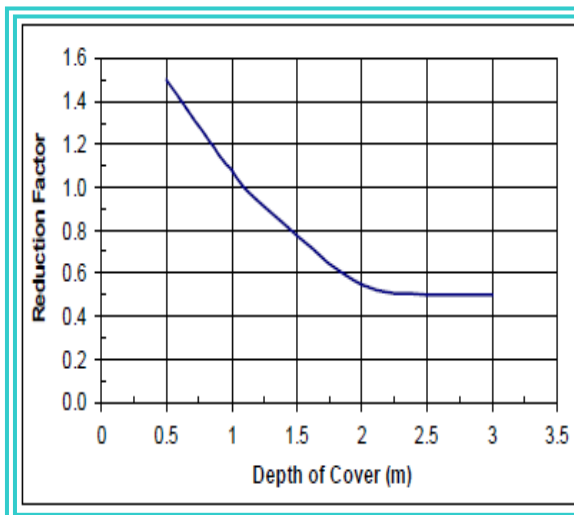


Figure VI. 12: Facteur de réduction en fonction de la profondeur d'enfouissement de la canalisation.

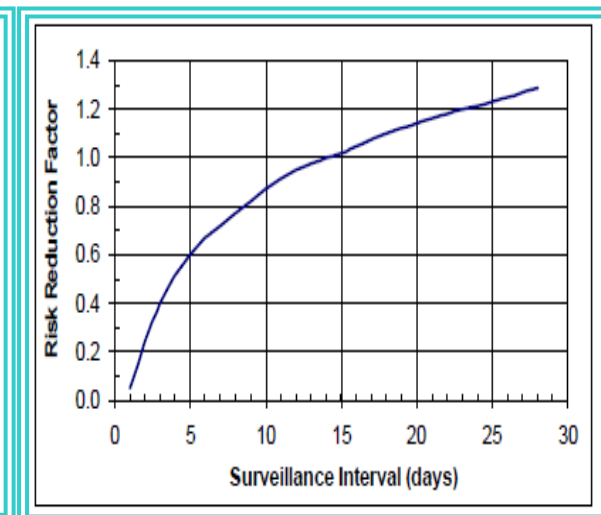


Figure VI. 13: Facteur de réduction en fonction de la fréquence de patrouillage.

Hypothèses

- Le tracé de l'oléoduc objet de l'étude se trouve loin de toute zone urbaine ou agricole et dans un corridor sécurisé (patrouilles fréquentes).

- La probabilité des défaillances dues à des défauts du matériel et de construction.
- Les défaillances provenant des altérations susceptibles d'être provoquées par des phénomènes de dégradation dynamique de la canalisation (corrosion, érosion, fissuration) ces dernières représentent la principale source de défaillance.

Les probabilités de défaillance inopinées de pipeline après correction qui est appliqué par les graphes précédents à ce projet seront de l'ordre de $1,60637\text{E-}05 \text{ h}^{-1}$.

VI.4.4. Comparaison entre la fiabilité de l'OB1 sur la base de valeurs de paramètre de fiabilité fournies par les bases des données internationales et estimées :

- Données du calcul (estimé) [h^{-1}] :

$$\begin{aligned} \lambda_{SA} &= 0,00001 & \lambda_C &= 1,60637\text{E-}05 & \lambda_{sp(1,2,3)} &= 9,9999\text{E-}06 \\ \lambda_{sp1b} &= 1,02808\text{E-}5 & \lambda_{sg} &= 6,60313\text{E-}05 \end{aligned}$$

- Données issues de bases de données internationales [h^{-1}] :

$$\begin{aligned} \lambda_{SA} &= 0,00001 & \lambda_C &= 2,56444\text{E-}5 & \lambda_{sp(1,2,3)} &= 9,99989\text{E-}06 \\ \lambda_{sp1b} &= 1,0224\text{E-}5 & \lambda_{sg} &= 7,56412\text{E-}05 \end{aligned}$$

R(t)	Formule et résultats
	$R(t) = e^{-\lambda_{sg}}$
	$R(t)_{BDI} = e^{-(0,00007564112)}$
	$R(t)_{estimé} = e^{-(0,0000660313)}$

Tableau VI. 9: Fiabilité de l'OB1 selon la BDI et les valeurs estimées.

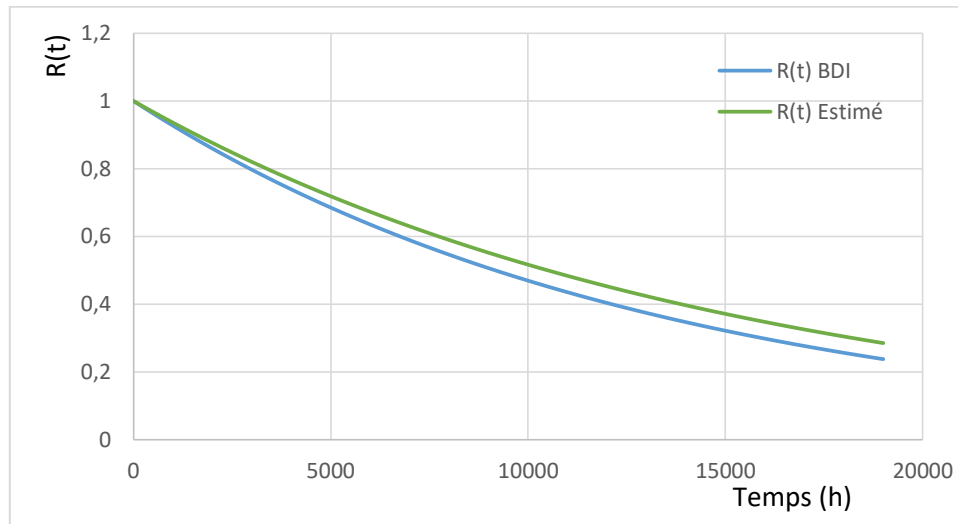


Figure VI. 14: Comparaison de la fiabilité de l'OB1 en considérant des taux de défaillance issus de bases des données internationales et estimées.

- **Analyse des résultats :**

L'analyse de la figure (VI.14), montre que la fiabilité de l'oléoduc est bonne vue qu'elle est supérieure à celle des standards internationaux, ce qui permet de dire que cet oléoduc reste en bon état de fonctionnement, cette conclusion ne peut être émise que pour les données prises dans cette étude.

L'analyse de sensibilité de la fiabilité de l'oléoduc nous permet de mieux voir l'influence de la variation des différents indices de fiabilité sur ce paramètre.

On remarque que la variation des indices de fiabilité des systèmes en parallèle a une influence presque négligeable sur la fiabilité de l'oléoduc, 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 de l'oléoduc dépend principalement de l'état des éléments en série et plus exactement de l'état de la canalisation.

VI.4.5. Comparaison entre la disponibilité et la maintenabilité de l'OB1 sur la base de valeurs de paramètre de fiabilité fournies par les bases des données internationales et estimées :

- **Données du calcul (estimé) [h^{-1}] :**

$$\lambda_{SA} = 0,00001$$

$$\lambda_C = 1,60637E-05$$

$$\lambda_{sp(1,2,3)} = 9,9999E-06$$

$$\lambda_{sp1b} = 1,02808E-5$$

$$\lambda_{sg} = 6,60313E-05$$

$$\mu_{SA} = 0,125$$

$$\mu_C = 0,13888889$$

$$\mu_{sp(1,2,3)} = 0,099299108$$

$$\mu_{sp1b} = 0,22912642$$

$$\mu_{sg} = 0,047113907$$

- Données issues de bases de données internationales [h^{-1}] :

$\lambda_{SA} = 0,00001$

$\lambda_C = 2,56444E-5$

$\lambda_{sp(1,2,3)} = 9,99989E-06$

$\lambda_{sp1-bis} = 1,0224E-5$

$\lambda_{sg} = 7,56412E-05$

$\mu_{SA} = 0,125$

$\mu_C = 0,13888889$

$\mu_{sp(1,2,3)} = 0,099299108$

$\mu_{sp1b} = 0,22912642$

$\mu_{sg} = 0,037737047$

A(t)	$A_{BDI} = 0,997999581$ (calculé à partir de graphe de Markov -chapitre V-)
	$A_{Estimé} = 0,998599803$ (calculé à partir de graphe de Markov)
M(t)	$M(t) = 1 - e^{-\mu_g}$
	$M(t) = 1 - e^{-0,037737047}$

Tableau VI. 10: La disponibilité et la maintenabilité du OB1 selon la BDI et selon les valeurs estimées.

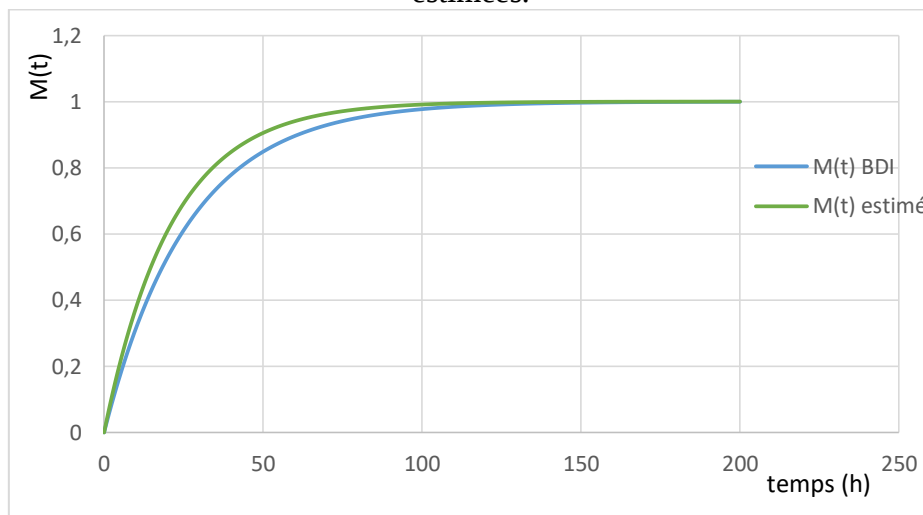


Figure VI. 15: Comparaison de la maintenabilité de l'OB1 en considérant des taux de réparation issus de bases des données internationales et estimées.

- Analyse des résultats :

L'analyse de la figure (VI.14) et le tableau (VI.15), montre que la maintenabilité et la disponibilité de l'oléoduc OB1 est bonne vue quelle est supérieure à celle des standards internationaux.

Cette conclusion ne peut être émise que pour les données prise dans cette étude.

Conclusion :

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.

Conclusion



Conclusion générale

Avoir une estimation régulière de la performance des oléoducs est primordiale, pour pouvoir ensuite les améliorer. C'est l'où se manifeste l'insuffisance de l'étude de fiabilité tout seul à former une image complète sur la productivité d'un oléoduc, parfois on se retrouve devant des systèmes avec des composants assez robustes ayant de fortes redondances mais qui sont faibles en terme de production. C'est pour cela là qu'on opte pour l'adoption de la notion de performabilité pour les systèmes de transport par canalisation. Cette approche, appliquée essentiellement aux systèmes électroniques, permet de combiner la performance du système à sa disponibilité.

L'évaluation de la performabilité de l'OB1 passe dans un premier temps par une décomposition systémique du système global en sous-systèmes plus facilement appréhendable d'un point de vue modélisation par les graphes de Markov. Cette décomposition a pour objective de créer des macroéléments représentant les sous-systèmes stations de pompes comprenant les pompes et les systèmes auxiliaires dont la modélisation par les graphes de Markov permet l'estimation des paramètres de fiabilité de ces derniers. L'objectif recherche par cette démarche est de réduire le nombre éléments et d'éviter par la même une explosion combinatoire préjudiciable à une modélisation par les graphes de Markov du système global à savoir l'oléoduc comprenant des stations de pompes et la canalisation.

Le modèle ainsi obtenu permet de déterminer la probabilité des états correspondant aux différentes situations d'avaries qui pourrait apparaitre sur l'oléoduc.

La deuxième étape dans une évaluation de la performabilité d'un oléoduc est la détermination des débits correspondant aux différentes situations d'avaries qui sont obtenus par calcul hydraulique.

Une bonne estimation de la performabilité dépend principalement de l'état des éléments en série et plus exactement de l'état de la canalisation et des paramètres de fiabilité, ces paramètres représentent souvent une contrainte dans le travail. Le manque récure d'informations sur les équipements nous oriente toujours vers l'usage des bases de données internationales en ce qui concerne les paramètres. L'usage de ces valeurs est à prendre avec précaution car elle ne reflète pas forcément les taux de défaillance et de réparation à l'état réel des équipements. Et cela affecte les résultats obtenus en termes de précision soit en les surestimant ou sous-estimant. L'usage de l'inférence bayésienne pour l'estimation des paramètres de fiabilité peut constituer une solution permettant d'améliorer la qualité de l'estimation pour des équipements robustes caractérisés par un faible retour d'expériences.

Références

[1] Documentation de SONATRACH sur les pipelines en Algérie.

[2] **Boudoukara Zohra** « Méthodologie d'évaluation de maintenance pour les systèmes de production », Mémoire de magistère, ENSET 2008.

[3] Revue statistique appliquée tome 28 N°3 : Jean-Claude Ligeron et Alain Delage.
Fiabilité des systèmes : Alain Pagès et Michel Gondron. Editions Eyrolles 1980 française de statistique 1980.

[4] Livre chaine de Markov écrit par jean Bérard.
Livre chaine de Markov Jean-Jacques Ruch-Marie-Line Chabanol.

[5] **Academia.edu** « chapitre 2 : DIAGRAMMES DE FIABILITE OU DIAGRAMMES DE SUCCES (Reliability block diagram) ».

[6] Taylor & Francis Group, Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers, LLC.2006

[7] Transport des produits pétroliers : **MR : YOUNSI**, cours, Licence 2021 Université de Boumerdes-FHC-Département transport.

[8] [Martz 76, Procaccia 92, Lannoy 94].

[9] **Mourad Bettayeb** Etude de la fiabilité des canalisations de transport d'hydrocarbures corrodées, estimation et analyse de sensibilité