

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

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Département transport et équipements des hydrocarbures

Option : transport et distribution des hydrocarbures

Mémoire de Master

Evaluation et amélioration de la Sûreté De Fonctionnement de la nappe
OZ1/OZ2

Présenté par :

BENAMARA Sana

TOUAHRIA Asma

Encadré par :

Pr. BENMOUNAH Amar

Année universitaire : 2015/2016

Remerciement

Le plus grand merci revient au dieu le tout puissant qui lui seul nous a guidé dans le bon sens durant notre vie et qui nous aide à réaliser ce modeste travail.

Remercier, c'est le plaisir de se souvenir de tous ceux qui, par leurs encouragements, leurs disponibilités, leurs amitiés et leurs compétences, ont su créer une dynamique et une motivation nous ayant permis de finaliser ce mémoire.

Nous remercions tout d'abord le professeur BENMOUNAH Amar dont la responsabilité, le savoir-faire et le soutien n'ont jamais fait défaut.

Nous adressons aussi nos sincères remerciements aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Nous pensons ensuite à nos enseignants du département de transport et équipements des hydrocarbures.

Et nous exprimons nos grandes reconnaissances à Mr AZZEDINE Hadj M'hamed pour sa compétence et son professionnalisme ainsi sa disponibilité durant toute la période du stage.

Nous voudrions également associer nos meilleurs remerciements à nos parents pour leurs tendresses et encouragements.

Enfin, un grand merci à nos amis pour l'amitié qu'ils nous ont témoigné tout au long de ces années d'étude.

Asma, Sana

Dédicaces

*A cœur vaillant rien d'impossible.
A conscience tranquille tout est accessible.*

*Quand il y a la soif d'apprendre.
Tout vient à point à qui sait attendre.*

*Quand il y a le souci de réaliser un dessein.
Tout devient facile pour arriver à nos fins.*

*Les études sont avant tout.
Notre unique et seul atout.*

*Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis
Jour et nuit, nous mènera vers le bonheur fleuri*

*Aujourd'hui, ici rassemblées auprès des jurys,
Nous prions dieu que cette soutenance*

*Fera signe de persévérance
Et que nous serions enchantées par notre travail*

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents et mon grand père

*Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour toutes les sacrifices que vous n'avez pas cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.
Je prie le bon Dieu de vous bénir, de veiller sur vous, en espérant que vous serez toujours fiers de moi.*

A mes chers frères et sœurs

Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.

A tous les membres de ma famille, petits et grands

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection

A mon aimable binôme Asma et sa famille.

A mon cher ami Mohammed.

A mes ami(e)s et collègues et le groupes MATH11.

En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Sana

Dédicaces

A mes chers parents et ma grande mère

Affables, honorables, aimables : vous représentez pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour toutes les sacrifices que vous n'avez pas cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

Je prie le bon Dieu de vous bénir, de veiller sur vous, en espérant que vous serez toujours fiers de moi.

A mon frère Sofiane et mes chères sœurs Sara, Meriem et Amina

Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.

A tous les membres de ma famille, petits et grands

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection

A mon aimable binôme Sana et sa famille.

A mes ami(e)s et collègues et tout le groupe MATH11.

En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Asma

Sommaire

Introduction	01
--------------------	----

Chapitre I : Introduction OZ1/OZ2

1. Présentation des ouvrages	02
1.1. La ligne OZ1	02
1.2. La ligne OZ2	03
1.3. Le Terminal Départ (la station SP1)	04
1.3.1. Le parc de stockage Haoud El Hamra (HEH)	05
1.3.2. Station basse pression (booster).....	05
1.3.3. Station principale	05
1.4. Stations de pompage	06
1.5. Stations de détente	07
1.6. Postes de coupure et de sectionnement	07
1.7. Le Terminal Arrivé	07
1.8.L'exploitation du Terminal Arrivé	10
1.8.1. Fonctionnement d'un réservoir.....	10
1.8.2. Les lignes de chargement.....	10
1.9. Capacité maximale de stockage	11
1.9.1. Terminal brut	11
1.9.2. Terminal condensat	12
1.10. La capacité maximale des pipes OZ1/OZ2	12
1.10.1. OZ1	12
1.10.2. OZ2	12
2. Pose de problème de la nappe OZ1/OZ2	13
3. Nécessité d'améliorer la capacité de transport des lignes OZ1/OZ2.....	13
4. Les moyens d'augmenter le débit dans les lignes.....	13

Chapitre II : Concepts et outils de la Sûreté De Fonctionnement

1. La Sûreté De Fonctionnement	14
1.1.Analyse préliminaire des risques	14
1.2.Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) et de leur criticité (AMDEC).....	14
1.3.Méthode des arbres de défaillances.....	15
2. La fiabilité	15
2.1. La probabilité	15
2.2.La fonction requise	15
2.3.Conditions d'utilisation	15
2.4.Période de temps	15
2.5.La variable aléatoire	15
3. Les paramètres de fiabilité	16
3.1. Fonction de fiabilité	16
3.2.Fonction de répartition	16

3.3.La fonction de densité	17
3.4.Taux de défaillance	17
3.5.MTTF	18
3.6.MTBF	18
4. Les lois de distribution	19
4.1. La loi exponentielle.....	19
4.2.La loi normale (Laplace-Gauss).....	20
4.3.La loi log-normal (ou de Galton).....	21
4.4.La loi de Weibull.....	22
5. Etude statistique sur la base des données d'exploitation.....	23
5.1.La suite statistique	23
5.2.L'histogramme	24
6. Estimation par intervalle de confiance	24
7. Les tests d'ajustement	24
8. Fiabilité des systèmes	25
8.1. Système en série	25
8.2. Système en parallèle	26
9. Caractéristiques de maintenabilité	27
9.1. La maintenabilité	27
9.2. La maintenance	27
9.2.1. Les types de maintenance	27
9.3. Le taux de réparation	27
9.4. MTTR (mean time to repair).....	28
10. La disponibilité	28
11. La redondance	29
11.1. La redondance active	29
11.1.1. La redondance active totale.....	29
11.1.2. La redondance active partielle	30
11.2. La redondance passive	30
11.3. Disponibilité d'un système avec redondance	31
12. La sécurité	31
12.1. Notion de sécurité	32
12.2. La sécurité fonctionnelle	32

Chapitre III : Détermination de la charge maximale de fonctionnement de l'OZ1/OZ2

1. Caractéristiques du produit	33
2. Caractéristiques de la ligne	33
2.1. La ligne OZ1	33
2.2. La ligne OZ2	33
3. Le régime de fonctionnement	34
3.1. Nombre de Reynolds	34
3.2. Coefficient de perte de charge λ	35
3.2.1. Pertes de charge linéaires	35

3.3. La pente hydraulique	36
3.4. Bilan de charge	36
4. Détermination de la charge maximale	36
4.1. Cas de l'OZ1	36
4.2. Cas de l'OZ2	39

Chapitre IV : Etude statistique sur la fiabilité des turbopompes de l'OZ2

1. Historique de pannes des turbopompes	42
2. Estimation des paramètres de fiabilité	44
2.1. Taux de défaillance	44
2.1.1. Analyse statistique de l'échantillon	44
2.1.2. La suite statistique	45
2.1.3. Test khi-deux	46
2.1.4. Estimation de λ par intervalle de confiance	47
2.2. Taux de réparation	48
2.2.1. Analyse statistique de l'échantillon	48
2.2.2. La suite statistique	48
2.2.3. Test khi-deux	49
2.2.4. Estimation de μ par intervalle de confiance	50
3. Résultats de calcul	50

Chapitre V : Application au calcul de la fiabilité, maintenabilité, disponibilité

1. Les graphes de Markov	57
1.1. Application au calcul de la disponibilité des turbopompes	58
1.1.1. Les états de système	59
1.1.2. Les équations d'état de système	59
1.1.3. Application numérique	60
2. Arbre de défaillance	61
2.1. Définition de l'arbre de défaillance	61
2.2. Concept de base	61
2.2.1. Événement Redouté (ER).....	61
2.2.2. Evènements intermédiaires	62
2.2.3. Evènement élémentaires	62
2.2.4. Les portes logiques	63
2.2.5. Représentation des évènements	64
2.3. Exploitation de l'arbre de défaillance	66
2.3.1. Exploitation qualitative	66
2.3.2. Exploitation quantitative	66
2.4. Construction de l'arbre	66
2.5. Etablissement de l'arbre de défaillance pour une station de pompage	67
2.5.1. Calcul de la probabilité d'occurrence de l'ER	68
3. Diagramme de fiabilité	73
3.1. Définition	73

3.2.Objectifs	73
3.3.Construction du diagramme.....	73

Chapitre VI : conclusion et recommandations

1. conclusion	75
2. Recommandations	75
2.1.Amélioration de la fiabilité des tronçons de canalisation	75
2.2.Amélioration de la disponibilité des turbopompes	76
2.3. Amélioration de la maintenance	79
2.4. Organiser une bonne gestion des stocks.....	79

Liste des tables

- Tableau (I.01) Les caractéristiques de la ligne OZ1
- Tableau (I.02) La localisation des points d'injection
- Tableau (I.03) Les caractéristiques de la ligne OZ2
- Tableau (I.04) Les caractéristiques du parc de stockage HEH
- Tableau (I.05) Les principaux équipements de la station de détente
- Tableau (I.06) L'implantation des stations de pompage
- Tableau (I.07) Les caractéristiques des postes de chargement
- Tableau (I.08) Les caractéristiques des postes de chargement en haute de mer
- Tableau (I.09) Les caractéristiques du parc de stockage de brut
- Tableau (I.10) Les caractéristiques du parc de stockage de condensat
- Tableau (I.11) Les caractéristiques des différents régimes de l'OZ1/2
- Tableau (III.01) coefficient de perte de charge λ
- Tableau (III.02) caractéristiques des stations de l'OZ1
- Tableau (III.03) caractéristiques des stations de l'OZ2
- Tableau (IV.01) Heures de marche de la TP 103
- Tableau (IV.02) Heures de marche de la TP 104
- Tableau (IV.03) Heures de marche de la TP 105
- Tableau (IV.04) Heures de marche de la TP 106
- Tableau (V.01) les portes logique
- Tableau (V.02) les symboles de représentation des évènements
- Tableau (V.03) les symboles de transfert

Liste des figures

Figure (I.01) Le profil en long de l'OZ1

Figure (I.02) Le profil en long de l'OZ2

Figure (II.01) La fonction de fiabilité $R(t)$ et la fonction de répartition $F(t)$

Figure (II.02) La fonction de densité de probabilité $f(t)$

Figure (II.03) Taux de défaillance en fonction du temps

Figure (II.04) La fonction de densité de probabilité de la loi exponentielle

Figure (II.05) La fonction de répartition de la loi exponentielle

Figure (II.06) Le taux de défaillance de la loi exponentielle $\lambda(t)$

Figure (II.07) La fonction de densité de probabilité $f(t)$

Figure (II.08) La fonction de répartition de la loi normale $F(t)$

Figure (II.09) La fonction de densité de probabilité de la loi log-normale

Figure (II.10) La fonction de densité de probabilité de la loi Weibull

Figure (II.11) Système en série

Figure (II.12) Système en parallèle

Figure (II.13) Système en redondance active totale

Figure (II.14) Système en redondance active partielle

Figure (II.15) Système en redondance passive

Figure (IV.01) Histogramme des temps de bon fonctionnement SP01

Figure (IV.02) Histogramme de temps de réparation SP01

Figure (IV.03) Histogramme des temps de bon fonctionnement SP02

Figure (IV.04) Histogramme de temps de réparation SP02

Figure (IV.05) Histogramme des temps de bon fonctionnement SP03

Figure (IV.06) Histogramme de temps de réparation SP03

Figure (IV.07) Histogramme des temps de bon fonctionnement SP04

Figure (IV.08) Histogramme de temps de réparation SP04

Figure (IV.09) Histogramme des temps de bon fonctionnement SP05

Figure (IV.10) Histogramme de temps de réparation SP05

Figure (IV.11) Histogramme des temps de bon fonctionnement SP06

Figure (IV.12) Histogramme de temps de réparation SP06

Figure (V.01) Graphe d'état d'un système réparable

Figure (V.02) Graphe d'état de la disponibilité

Figure (V.03) schéma simplifié de la ligne

Figure (VI.01) Graphe d'état de la disponibilité

Figure (VI.02) Graphe d'état de la disponibilité

Introduction :

Depuis ces dernières années, le panorama des énergies fossiles en général, et du pétrole en particulier, est en pleine évolution. Ainsi l'approvisionnement en pétrole est devenu un sujet crucial, du fait de son importance dans le développement industriel ce qui a engendré une augmentation de la consommation de pétrole et par conséquent une augmentation de la demande sur cette matière première.

En effet, pour faire face à cette demande accrue les pays producteurs procèdent à l'augmentation de leurs capacités d'exportation afin de satisfaire l'insuffisance de ce type d'hydrocarbure.

Un long chemin reste encore à parcourir avant que le pétrole ne se présente aux pays importateurs, c'est son transport des zones de production et de traitement aux sites d'exportation, ce dernier peut s'effectuer à travers plusieurs moyens.

Le transport par canalisation (oléoducs) constitue la façon la plus sécuritaire et écologique d'acheminement du pétrole brut sur des longues distances. Ce mode de transport contribue sensiblement à la réduction à la fois des coûts, des délais de livraison, du trafic routier et assure aussi des transports massifs d'hydrocarbures.

L'oléoduc comporte un certain nombre de stations de pompage dont la fonction principale est la fourniture de l'énergie de pression nécessaire au produit pour vaincre les pertes de charges créées lors de son transport.

Cependant ces ouvrages subissent des différents types d'altérations qui affectent l'exploitation et influent sur la continuité ainsi les quantités transportées, vu de la criticité de ces fluctuations, la sûreté de fonctionnement est devenue le défi majeur des sociétés concernées.

La sûreté de fonctionnement d'un système est la propriété qui permet à ses utilisateurs de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur délivre.

C'est dans cette optique que se place notre étude qui consiste à évaluer la sûreté de fonctionnement de la nappe OZ1/OZ2, ces derniers font partie des oléoducs algériens géré par TRC (Activité Transport par Canalisation / SONATRACH) qui transporte le pétrole brut de Haoud El Hamra vers Arzew, en analysant la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité des turbopompes, des stations de pompage et de la ligne même afin d'en suggérer des méthodes servant à l'amélioration des performances de l'OZ2.

Chapitre I

Introduction OZ1/OZ2

1. Représentation des ouvrages :

1.1. La ligne OZ1 :

Cette ligne relie le Terminal Départ de HEH au Terminal Arrivée d'ARZEW, a pour but d'évacuer du pétrole brut. Cette dernière contient 6 stations de pompage dont les stations 01, 03 et 05 permettent le fonctionnement de la ligne alors que les autres 02, 04 et 06 sont considérées comme phase future.

Une particularité de la ligne réside dans l'existence des points d'injection provenant de la production des champs suivant :

Haoud Berkaoui, Guellala, Oued Noumer, Hassi R'mel.

Ces points d'injection sont raccordés à l'OZ1, en cas d'arrêt de ce dernier ils sont transférés vers l'OZ2.

Les tableaux ci-contre montrent les différentes caractéristiques de la ligne et la localisation des points d'injections.

Longueur (Km)	801.478	Nombre de postes de coupure	5
Diamètre (pouce)	28	Nombre de postes de sectionnement	22
Epaisseur des tubes (mm)	6.35 – 7.14 – 7.92 – 8.76 – 9.52 – 11.91 – 12.70	Pression maximale de service « design » (bar)	63
Nuance d'acier	X52	Pression maximale de service actuelle (bars)	63
Rugosité des tubes (mm)	0.0457	Capacité design (MTA)	11
Type d'enrobage extérieur	Braie de houille	Capacité actuelle (MTA)	07
Nombre de stations de pompage	6	Date de mise en service	07 novembre 1965
Nombre de stations de détente	1	Constructeur	CJB / BECHTEL

Tableau (I.01) Les caractéristiques de la ligne OZ1

Les champs d'injections	PK / Altitude (m)		Localisation Commune / wilaya
	OZ1	OZ2	
Haoud Berkaoui	74.700 / 210	47.500 / 210	Ouargla / Ouargla
Guellala	77.300 / 210	77.200 / 210	
Oued Noumer	206.100 / 440	207.100 / 440	Alatteuf / Ghardaia
Hassi R'mel	296.400 / 756	297.000 / 756	Hassi R'mel / Laghouat

Tableau (I.02) La localisation des points d'injection

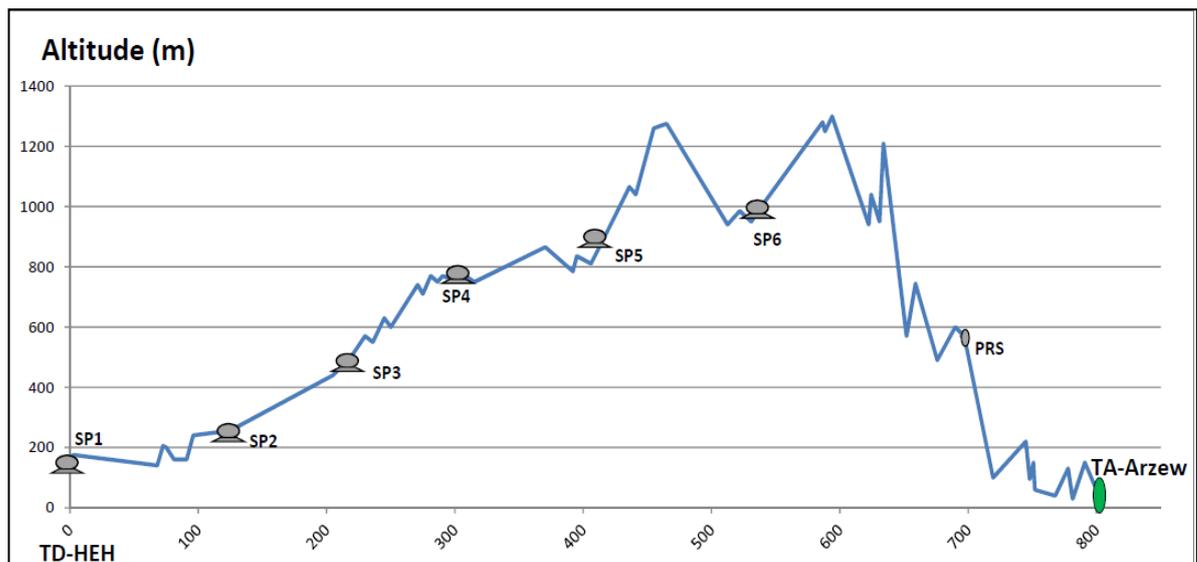


Figure (I.01) Le profil en long de l'OZ1

1.2. La ligne OZ2 :

L'oléoduc OZ2 se trouve dans le même couloir que les pipelines d'ARZEW. Ce dernier contient toute une installation (6 stations de pompage, postes de coupures et postes de sectionnements) qui sert à réussir les différentes phases de transport, il a le même point départ et d'arrivée que l'OZ1 (TD de HEH, TA d'Arzew).

Le tableau ci-contre montre les caractéristiques de la ligne :

Longueur (Km)	821	Nombre de postes de coupure	5
Diamètre (pouce)	34	Nombre de postes de sectionnement	25
Epaisseur des tubes (mm)	7.92 à 17.48	Pression maximale de service « design » (bar)	70
Nuance d'acier	X60	Pression maximale de service actuelle (bars)	70
Rugosité des tubes (mm)	0.0457	Capacité design (MTA)	34
Type d'enrobage extérieur	Polyéthylène	Capacité actuelle (MTA)	34
Nombre de stations de pompage	6	Date de mise en service	18 out 2003
Nombre de stations de détente	1	Constructeur	Stroystransgas Cosider Saipem / Spie-Capag

Tableau (I.03) Les caractéristiques de la ligne OZ2

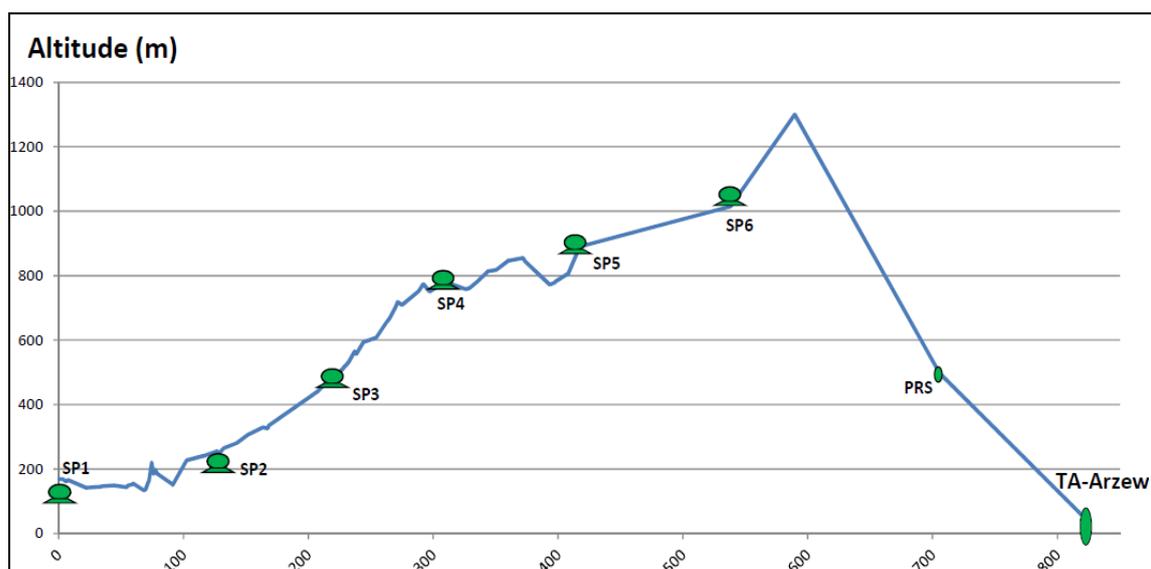


Figure (I.02) Le profil en long de l'OZ2

1.3. Le Terminal Départ (la station SP1) :

Venant des champs de production, le pétrole brut est stocké au niveau du Terminal Départ HEH afin de le transporter vers les sites d'exportation et de raffinage implantés sur le littoral.

Le TD contient un parc de stockage, une station basse pression et une station principale.

1.3.1. Le parc de stockage Haoud El Hamra (HEH) :

Le parc HEH est compartimenté en 03 zones (parc de stockage OB1, OK1 et OZ1) chacune d'eux possède son manifold.

Reference	Nombre de Bacs		Capacité utile (m ³)		Capacité totale (m ³)	
	OZ1	OZ2	OZ1	OZ2	OZ1	OZ2
OZ1	04	04	35000	50000	140000	200000
					340000	
OB1	08		35000		280000	
OK1	07		51200		358400	

Tableau (I.04) Les caractéristiques du parc de stockage HEH

1.3.2. Station basse pression (booster) :

Cette station est destinée à relever la pression d'alimentation de la station principale, elle est aménagée pour pomper le produit venant de l'ensemble de parc de stockage vers la station principale.

La station comprend 06 groupes électropompes, 02 by-pass de recyclage.

1.3.3. Station principale :

Comme toute les stations de pompage de la phase 01, la SP01 est équipée de 06 turbopompes dont 02 sont destinées pour l'OZ1, 03 pour l'OZ2 et une en stand-by.

Cette station est munie d'une batterie de filtres en aval des booster et en amont des pompes principales.

1.4. Stations de pompage :

La ligne contient 06 stations de pompage, ont pour but principale la ré-élévation de débit transis pour assurer l'acheminement de pétrole brut en vainquant les pertes de charge.

La SP1, la SP3 et la SP5 sont des stations principales dites de phase 01, elles permettent un fonctionnement simultané mais indépendant des deux lignes.

Chacune d'eux contient 06 turbopompes, 02 pour l'OZ1, 03 pour l'OZ2 et une en stand-by.

La SP2, la SP4 et la SP6 sont des stations secondaires dites de phase 02, elles sont destinées à l'exploitation normal de l'OZ2, et permettant en cas d'arrêt de l'OZ2 de relever le débit de l'OZ1 à son maximum, chacune d'eux contient 04 turbopompes pour l'OZ2 et 02 pour l'OZ1 en phase future.

Les caractéristiques des principaux équipements sont décrites dans la table (**voir annexe 1**).

Le tableau ci-contre montre la localisation des stations de pompage.

Station	Pk / Altitude (m)		Localisation Commune / wilaya
	OZ1	OZ2	
TD SP1 HEH	0 / 156	0 / 169	Hassi Messaoud / Ouargla
SP2	124.775 / 256	127.600 / 245	Ouargla / Ouargla
SP3	218.075 / 495	220.800 / 497	AlAtteuf / Ghardaia
SP4	305.970 / 777	307.900 / 778	Hassi R'mel / Laghouat
SP5	415.100 / 885	417.200 / 890	Milok / Tadjemoul / Laghouat
SP6	534.900 / 973	538.200 / 1015	Djebil/faidja / Tiaret
TA Arzew	801 / 50	821 / 50	Arzew / Oran

Tableau (I.06) L'implantation des stations de pompage

1.5. La station de détente :

La station de détente de KENENDA est destinée à protéger la partie descendante des deux lignes OZ1, OZ2 contre toute élévation de pression qui aurait tendance à excéder les limites du tube de la ligne.

Elle est située au PK 708.573 à une altitude de 498 m.

Matériels	Principales caractéristiques
Bac de détente	Réservoir à toit fixe. V=24000m ³ , D=42.5m, H=18m.
Pompes de transfert	Une principale centrifuge à moteur électrique. Une de secours centrifuge à moteur diesel. Q=300m ³ /h hauteur de refoulement =300m.c.l
Vannes d'isolement	Une vanne motorisée pour chaque ligne
Réservoir de drainage	équipée d'une pompe immergée D=2.4m, L=6m et V=25m ³ .
Batteries de soupapes	02 soupapes 12'' pour protéger l'OZ1 03 soupapes 10'' pour protéger l'OZ2

Tableau (I.05) Les principaux équipements de la station de détente

1.6. Postes de coupure et sectionnement :

Les postes de coupure sont équipés d'une gare racleur départ et arrivée pour chaque ligne, ils sont situés au niveau des stations (SP2, SP3, SP4, SP5 et SP6).

Le Terminal Arrivé est équipé d'une gare de racleur arrivée (une pour chaque ligne)

Les postes de sectionnement sont constitués de robinets à passage intégral, ils sont répartis le long des deux lignes et concentrés au nord.

1.7. Le Terminal Arrivé :

Le Terminal Arrivé d'Arzew c'est le dernier maillon de la chaîne de transport du pétrole brut pour les deux ouvrages OZ1 et OZ2, son rôle est la réception du produit dans un parc de stockage puis le chargement vers les navires citerne et l'expédition vers la raffinerie d'Arzew.

Le TA d'Arzew comporte :

➤ **Un parc de stockage :**

Il est équipé de 18 bacs à toit flottant, ils sont munis des accessoires suivants :

- Système d'extinction à mousse incendie.
- Une tuyauterie de 28" pour le remplissage et le vidange.
- 02 tuyauteries de 12" et 10" pour le transfert.
- Une vanne de 24" de pied de bac.
- Une vanne de 4" pour la vidange d'eau de pluie de toit.
- 03 vannes de 6" pour le drainage du bac
- Chaque réservoir est muni d'une jauge automatique intelligente conçue pour indiquer :
 - La hauteur du produit.
 - Le débit horaire en m³/h.
 - L'alarme haut et très haut niveau.
 - L'alarme bas et très bas niveau.
 - Le temps de remplissage et vidange.
- Les manifolds des réservoirs de stockage :

Le manifold est destiné pour assurer tous les mouvements de produit c'est-à-dire :

- Réception par oléoducs OZ1/OZ2
- Remplissage et vidange sélective des groupes de réservoirs.
- Transfert d'un groupe de réservoirs à un autre.

Chaque réservoir est muni de son propre manifold.

➤ **Une section faisant la continuité de la ligne principale ou sont installés les équipements suivants :**

Pour l'OZ2 :

- une gare racleur arrivée 34'' avec son by-passe de réception.
- Deux vannes de ligne motorisées
- Une vanne d'entrée terminal.

Le TA est raccordé au parc de stockage par un collecteur 34", de l'amont vers l'aval le collecteur comprend :

- Une batterie de soupape haute pression (03 soupapes 10") en amont de la vanne de ligne.
- Une batterie de soupape basse pression (03 soupapes 10") en aval de la vanne d'entrée TA.
- Un échantillonneur instantané automatique.
- Un compteur ultrason 34".
- Un bac de purge à toit fixe de 6000 m³.
- 02 pompes de transfert.
- Un puisard de drainage m³ équipé par une pompe de drainage.
- Un réseau de récupération des égouttures et de drainage ayant la possibilité de réinjection soit dans une capacité mobile, soit sur le bac de purge.
- un réseau anti-incendie.
- un réseau de récupération des eaux huileuse.
- Un séparateur API.

Pour l'OZ1 :

L'installation est complétée d'une manière similaire à l'OZ2 avec un diamètre de 28" :

- Bac de purge à toit fixe de 4000 m³.
- Une gare racleur et tuyauterie de 28".
- Des pompes de transfert de type centrifuge.
- Une batterie de soupape haute pression.
- Une batterie de soupape basse pression.
- Un compteur ultrason 28".

➤ **Une station de pompage SPM :**

Cette station est conçue pour le chargement simultané des deux pétroliers amarrés aux deux bouées, à un débit maximum de 20000 m³/h à partir des 18 réservoirs situés dans le parc de stockage du terminal OZ1 / OZ2.

Les principales installations de la station de pompage comprennent :

- 05 électropompes montées verticalement, équipées des filtres d'aspiration et des vannes motorisées de refoulement et d'aspiration.
- 02 unités de comptage.

- 02 systèmes d'échantillonnage.
- 02 flexibles sous-marins de 24" de diamètre.
- 02 flexibles flottants de chargement.
- 02 bouées amarrées.

1.8. L'exploitation du Terminal Arrivé :

1.8.1. Fonctionnement d'un réservoir :

Dans le Terminal Arrivé d'Arzew les réservoirs passent par 03 étapes :

- Remplissage : c'est la réception de produits des deux ouvrages.
- Immobilisation : il consiste à la décantation statique, purge de fond, échantillonnage et mesurage.
- Attente : c'est la programmation pour un chargement ou la mise en poste des navires citernes.
- La vidange : il se fait pendant le chargement du navire ou le transvasement vers la raffinerie ou vers un autre bac

1.8.2. Les lignes de chargement :

Chaque réservoir est connecté aux 03 lignes de chargement de 40'' de diamètre, qui alimentent les postes de chargement des navires citernes à savoir :

- N°01 alimente les postes de chargement (P1, P2 et P3) plus le port de BETHIOUA par une interconnexion de 24''.
- N°02 alimente les postes de chargement (B3, P1, P2 et P3).
- N°03 alimente les postes de chargement (B2, P1, P2 et P3).

En plus ces trois lignes de chargement ont été raccordées à la tuyauterie d'aspiration de la station de pompage SPM.

Désignation des postes	Capacité de chargement (tonne)	Débit de chargement max (m ³ /h)
P1	50000	4000
P2	90000	5000
P3	180000	6500
B2	150000	6000
B3	250000	6500

Tableau (I.07) Les caractéristiques des postes de chargement

Désignation des postes	Capacité de chargement (tonne)	Débit de chargement max (m ³ /h)
SPM1	300000	10000
SPM2	300000	10000

Tableau (I.08) Les caractéristiques des postes de chargement en haute de mer

1.9. Capacité maximale de stockage :

La capacité maximale de stockage et les caractéristiques du parc des terminaux d'Arzew sont regroupées dans les tableaux ci-dessous

1.9.1. Terminal brut :

Référence	Design (m ³)	Utile (m ³)	Hauteur (m)	Diamètre (m)	Date
801	46000	37500	14.50	61.80	1965
802	46000	37500	14.50	61.80	1965
803	46000	37500	14.50	61.80	1965
804	46000	37500	14.50	61.80	1965
805	46000	37500	14.50	61.80	1965
806	46000	37500	14.50	61.80	1965
807	46000	37500	14.50	61.80	1965
808	50000	40500	15.50	61.70	1966
809	50000	40500	15.50	61.70	1966
810	50000	40500	15.50	61.70	1966
811	50000	42000	16.50	60.00	1966
812	50000	42000	16.50	60.00	1966
813	50000	42000	16.50	60.90	1969
814	50000	42000	16.50	60.90	1969
815	56056	45800	15.50	67.02	2008
816	56056	45800	15.50	67.02	2008
817	56056	45800	15.50	67.02	2008
818	56056	45800	15.00	67.02	2008
857	56056	42000	15.00	67.02	2009
858	56056	42000	15.00	67.02	2009
Totale	826200	819.200			

Tableau (I.09) Les caractéristiques du parc de stockage de brut

1.9.2. terminal condensat :

Référence	Désigne (m3)	Utile (m3)	Lieu	Hauteur (M)	Hauteur d'exp (m)	Diamètre (m)	Date
851	39390	29542	TA	15,45	14	57,01	1971
852	39390	30852	TA	15,45	14	57,01	1971
853	39390	30828	TA	15,45	14	57,01	1971
854	60300	48000	TA	19,2	15.5	67,04	1978
855	60300	46258	TA	19,2	15	67,04	1978
856	60300	48022	TA	19,2	15	67,04	1978
859	60300	47994	TA	19,2	15.5	67,04	1978
Total	359 370	281 6					

Tableau (I.10) Les caractéristiques du parc de stockage de condensat**1.10. La capacité maximale des pipes OZ1/2 :****1.10.1. OZ1 :**

C'est un ancien pipes, d'après le design ce dernier est conçu pour transporter 11MTA mais après la dernière inspection faite en 2010 sa capacité est dégradée, actuellement il fonctionne à 07 MTA.

1.10.2. OZ2 :

Il est prévu pour fonctionner en trois régimes :

21MTA, 28MTA et 34 MTA comme un maximum.

La ligne		OZ1			OZ2		
Régime	MTA	7	11	18	21	28	34
	m ³ /h	1100	1700	2783	3247	4329	5257
Nombre de stations en service		03 SP1 – SP3 – SP5	03 SP1 – SP3 – SP5	06 (phase futur)	03 SP1 – SP3 – SP5	06	06
Nombre de turbopompes en service dans chaque station		01	01	02	02	02	03

Tableau (I.11) Les caractéristiques des différents régimes de l'OZ 1/2

2. Pose de problème de la nappe OZ1 et OZ2 :

Les oléoducs OZ1 et OZ2 sont affectés par pas mal d'anomalies qui interrompent leur fonctionnement ainsi la complexité et la diversité de leurs installations font augmenter les contraintes d'exploitation de plus en plus. L'indisponibilité d'une des deux lignes est le problème fondamental qui les empêche d'accomplir leurs missions.

3. Nécessité d'améliorer la capacité de transport des lignes OZ1/OZ2 :

Le transport par canalisation prend une grande importance à l'échelle nationale comme à l'échelle mondiale, qui correspond à une augmentation des quantités des produits transportés et des consommations en énergie.

Cette situation exige aux entreprises de développer davantage leur logistique, voire même de diversifier leurs modes d'exploitation et augmenter les capacités de transport des deux pipes OZ1/OZ2 afin d'assurer un approvisionnement régulier pour faire face à l'accroissement de la demande sur le marché.

4. Les moyens d'augmenter le débit dans les lignes :

Afin d'augmenter le débit de la ligne, on propose :

- Augmenter la capacité de l'OZ1 par :
 - la finition des travaux de réhabilitation.
 - La réalisation de la phase future (installation des turbopompes au niveau des stations paires).
- Installation de looping.
- Améliorer la stratégie de maintenance des équipements.

Chapitre II

Concepts et outils de la Sûreté De Fonctionnement

1. La Sûreté De Fonctionnement :

La sûreté de fonctionnement est la science de défaillance, dont l'objectif est d'atteindre l'idéal de la conception de système: zéro accident, zéro arrêt, zéro défaut (et même zéro maintenance). Elle comprend les composantes suivantes :

La fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité.

La SDF est un domaine d'activité qui propose des moyens pour augmenter la fiabilité et la sûreté des systèmes dans des délais et avec des coûts raisonnables.

L'étude de la SDF utilise un ensemble d'outils et de méthodes qui consistent généralement à analyser les effets des pannes, les dysfonctionnements, les erreurs d'utilisation ... etc de l'entité étudiée, parmi ces outils on cite :

1.1. Analyse préliminaire des risques :

Cette méthode a pour but :

- De déceler les risques et leurs causes, c'est à dire de déterminer les éléments dangereux, les situations dangereuses, les accidents potentiels.
- De déterminer la gravité de leurs conséquences.
- De définir des règles de conception et des procédures permettant d'éliminer ou de maîtriser les situations dangereuses et les accidents potentiels ainsi mis en évidence.

1.2. Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) et de leur criticité (AMDEC) :

Est une méthode inductive d'analyse de système utilisée pour recenser les défaillances des composants dont les conséquences affectent leur fonctionnement, elle est pour but :

- D'évaluer les effets de chaque mode de défaillance des composants d'un système sur ses différentes fonctions.
- D'identifier les modes de défaillance ayant d'importants effets sur la FMDS.

À l'AMDE, on ajoute une évaluation de la criticité de chacun des modes de défaillance, cette évaluation de la criticité impose de définir préalablement un système de jugement, généralement constitué par:

- Des critères (fréquence, gravité, ...).
- Des échelles ou des barèmes de notation.
- Des seuils ou des repères à partir desquels un mode de défaillance sera considéré comme critique.

1.3. Méthode des arbres de défaillances :

Elle permet de rechercher les défaillances uniques et les combinaisons de défaillances qui conduisent à la réalisation d'un événement indésirable ainsi de calculer sa probabilité d'occurrence.

2. La fiabilité :

L'analyse de la fiabilité dans le domaine de la mécanique est un outil très important pour caractériser le comportement des équipements dans les différentes phases de vie, mesurer l'impact des modifications de conception sur l'intégrité de ces derniers et améliorer leurs performances.

Cette étude apporte des réponses à plusieurs interrogations : Quels sont les composants qui provoquent la panne du système mécanique ? Quelles sont les influences des incertitudes sur les données, en particulier sur la performance des équipements ? Comment optimiser l'utilisation du matériel ?

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

2.1. La probabilité :

Se définit par le rapport entre le nombre de cas favorable à la réalisation d'un événement et le nombre de tous les cas possibles.

2.2. La fonction requise :

Accomplir une mission où rendre le service attendu elle implique un seuil d'admissibilité au-delà duquel la fonction n'est pas remplie.

2.3. Conditions d'utilisations :

Sont les conditions d'usage c'est à dire l'environnement et ses variations, les contraintes (mécaniques, physiques et chimiques).

2.4. Période de temps :

C'est une durée de mission dont l'unité "T".

2.5. La variable aléatoire :

On appelle variable aléatoire T une variable telle qu'à chaque valeur de T on puisse associer une probabilité, elle caractérise l'instant de défaillance du dispositif.

3. Les paramètres de fiabilité :

3.1. Fonction de fiabilité :

C'est la probabilité que le système n'ait pas de défaillance avant l'instant t

$$R(t) = P(\text{qu'une entité } E \text{ soit non défaillante sur la durée } [0; t])$$

$$R(t) = P(T > t)$$

3.2. Fonction de répartition :

Est considérée comme la probabilité de défaillance du système entre $[0; t]$, c'est la caractéristique contraire de la fiabilité. Elle est le complément à 1 de la fiabilité.

$$F(t) = P(T \leq t)$$

$$F(t) + R(t) = 1$$

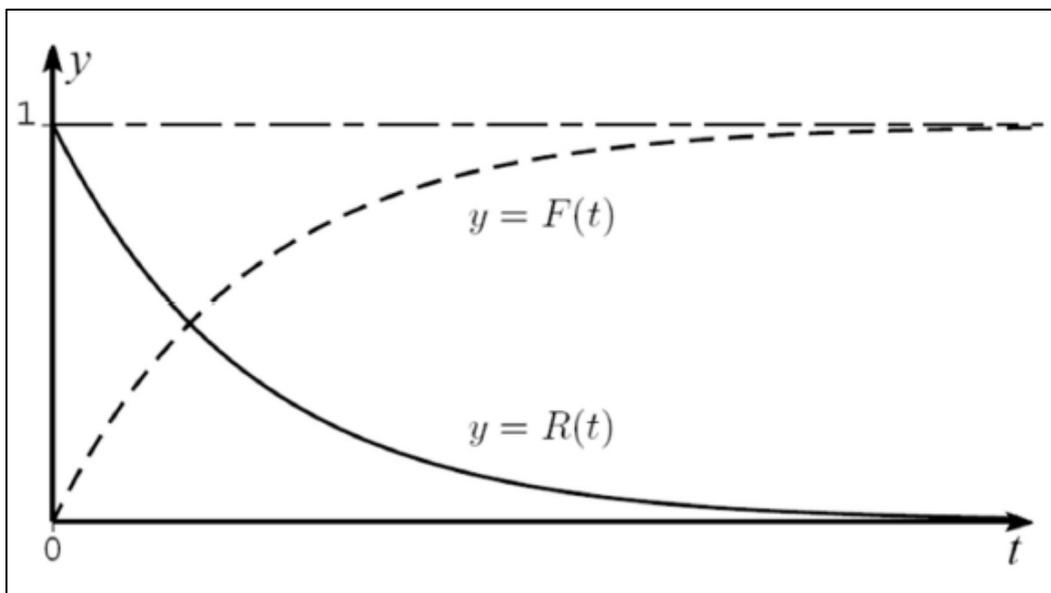


Figure (II.01) La fonction de fiabilité $R(t)$ et la fonction de répartition $F(t)$

3.3. La fonction de densité :

Elle exprime la probabilité que le système tombe en panne entre $[t; t + dt]$.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

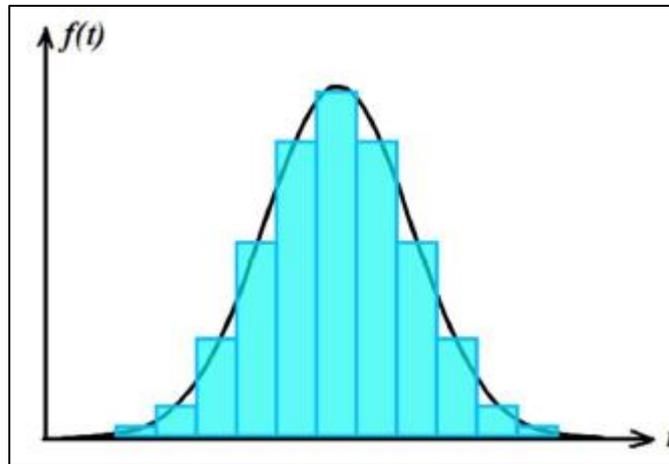


Figure (II.02) La fonction de densité de probabilité $f(t)$

3.4. Taux de défaillance :

$\lambda(t)dt$ Est la probabilité qu'une défaillance d'un dispositif se produise dans l'intervalle de temps $[t; t + dt]$ sachant que ce dispositif a bien fonctionné jusqu'à l'instant t .

$$\lambda(t)dt = \frac{F(t+dt) - F(t)}{R(t)} = \frac{dF(t)}{1 - F(t)}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Le comportement temporel du taux de panne est représenté par une courbe dite "en baignoire".

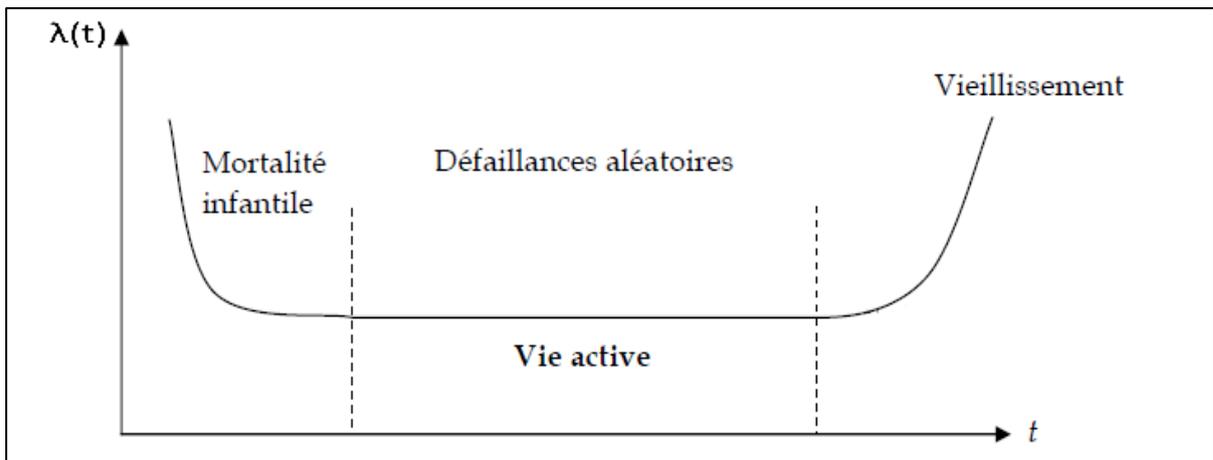


Figure (II.03) Taux de défaillance en fonction du temps

Cette courbe comporte trois phases :

- Mortalité infantile : c'est une durée de vie en principe très courte. Elle est décrite par une décroissance progressive du taux de défaillance avec le temps dû à une amélioration des caractéristiques internes, par un rodage préalable des pièces.
- Défaillance aléatoire : c'est la zone de maturité ou de pleine activité du dispositif pour laquelle le taux de défaillance est sensiblement constant. C'est également le domaine des défaillances imprévisibles qui se produisent de façon aléatoire.
- Vieillessement : elle comporte la majorité de la vie du dispositif. Elle est caractérisée par une augmentation progressive du taux de défaillance car les pièces mécaniques sont soumises à des phénomènes de vieillissement multiples.

3.5. MTTF (Mean Time To Failure) :

C'est la moyenne de temps de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance.

3.6. MTBF (Mean Time Between Failure) :

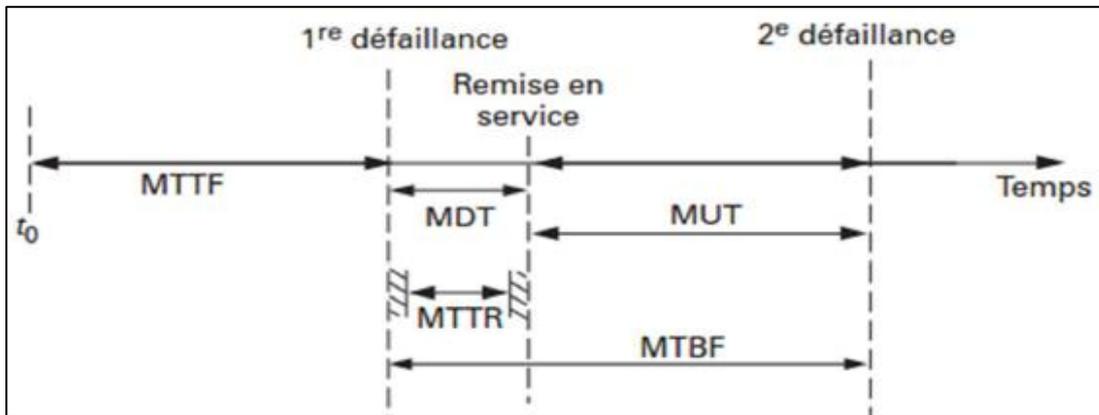
C'est la moyenne de temps de bon fonctionnement entre deux défaillances d'un système réparable.

$$MTBF = MUT + MDT$$

Tel que :

MUT : Mean Up Time c'est la durée moyenne de fonctionnement après réparation.

MDT : Mean Down Time c'est la durée moyenne d'indisponibilité.



4. Les lois de distribution :

Afin d'évaluer la fiabilité d'un produit, il est nécessaire de savoir comment il devient défaillant dans le temps pour cela nous présenterons quelques distributions qui interviennent le plus fréquemment dans l'analyse des données de vie.

4.1. La loi exponentielle :

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. C'est une loi simple, très utilisée en fiabilité dont le taux de défaillance est constant. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales.

La densité de probabilité d'une loi exponentielle de paramètre λ s'écrit :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

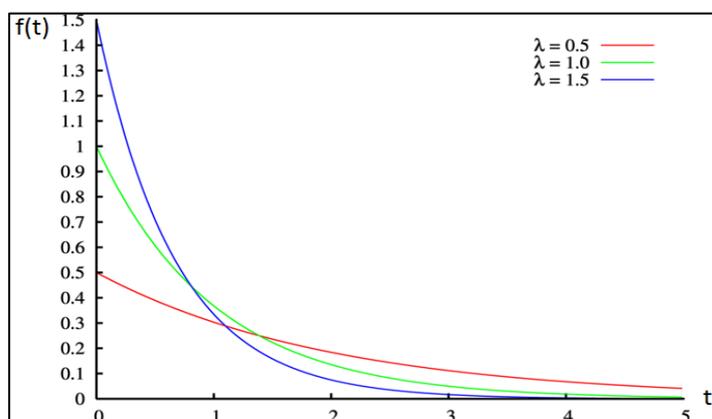


Figure (II.04) La fonction de densité de probabilité de la loi exponentielle

La fonction fiabilité :

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

La fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

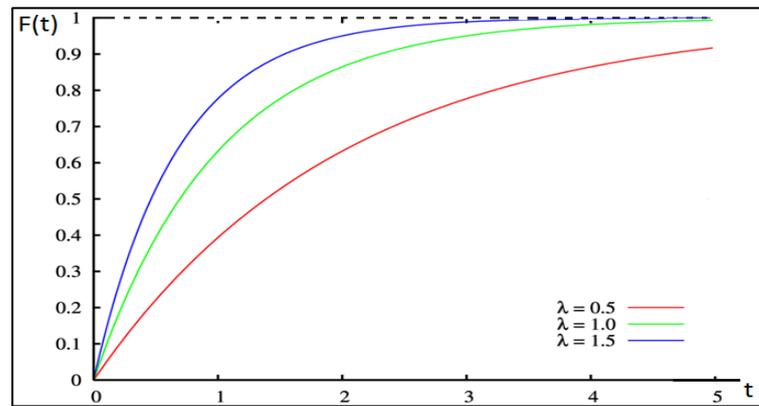


Figure (II.05) La fonction de répartition de la loi exponentielle

Le taux de défaillance est constant dans le temps :

$$\lambda(t) = \lambda$$

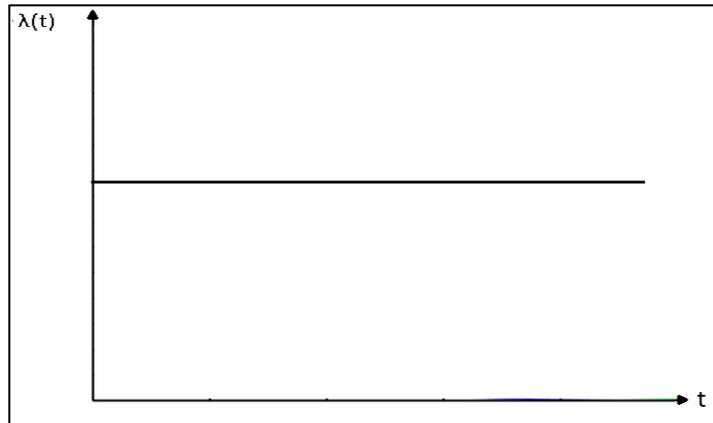


Figure (II.06) Le taux de défaillance de la loi exponentielle $\lambda(t)$

4.2. La loi normale (Laplace-Gauss) :

La loi normale est très répandue parmi les lois de probabilité. En fiabilité, la distribution normale est utilisée pour représenter la distribution des durées de vie de dispositifs en fin de vie (usure) car le taux de défaillance est toujours croissant.

La densité de probabilité d'une loi normale de moyenne MTBF et d'écart-type σ s'écrit :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-MTBF}{\sigma}\right)^2\right]$$

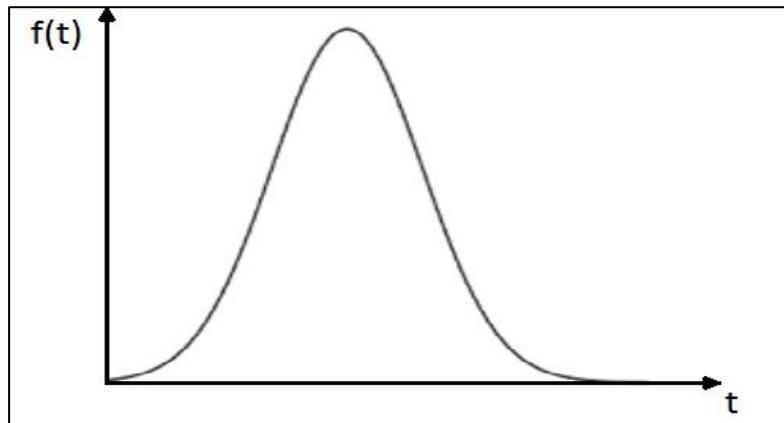


Figure (II.07) La fonction de densité de probabilité $f(t)$

La fonction de répartition s'écrit :

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left[-\frac{(x-MTBF)^2}{2\sigma^2}\right] dx$$

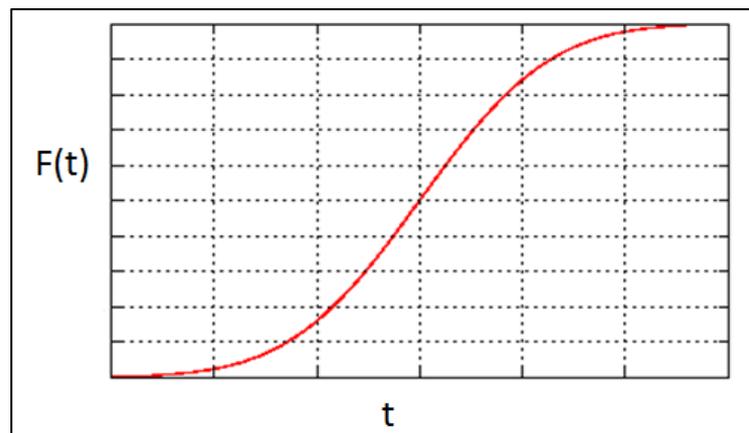


Figure (II.08) La fonction de répartition de la loi normale $F(t)$

La fiabilité est donnée par:

$$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} \exp\left[-\frac{(\tau-MTBF)^2}{2\sigma^2}\right] d\tau$$

4.3. La loi log-normal (ou de Galton) :

Cette distribution est largement utilisée pour modéliser des données de vie, en particulier les défaillances par fatigue en mécanique.

Une variable aléatoire continue et positive T est distribuée selon une loi log-normale si son logarithme népérien est distribué suivant une loi normale.

La densité de probabilité d'une loi log-normale de paramètres positifs $MTBF$ et σ est :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log(t)-MTBF}{\sigma}\right)^2\right]$$

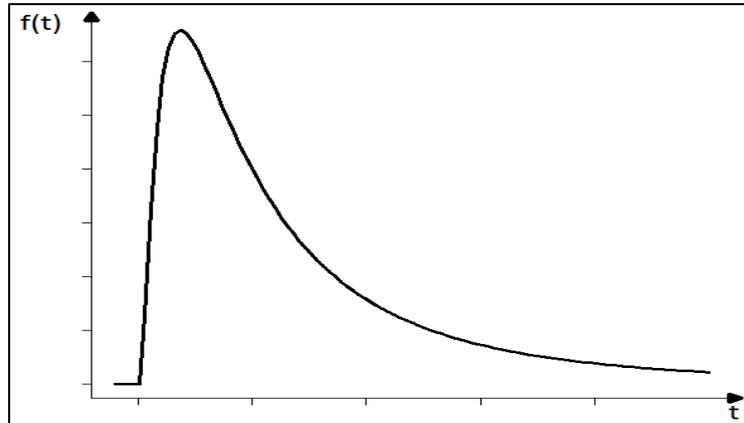


Figure (II.09) La fonction de densité de probabilité de la loi log-normale

La fonction fiabilité:

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\log(t)-MTBF}{\sigma}\right)$$

$$\Phi = -\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{k}$$

Φ : Fonction de répartition de la loi normale centrée réduite.

4.4. La loi de Weibull :

Cette loi est utilisée dans plusieurs domaines (électronique, mécanique,...). Elle caractérise le comportement du système dans les trois phases de vie : période de jeunesse, période de vie utile et période d'usure ou vieillissement. Dans sa forme la plus générale, la distribution de Weibull dépend des trois paramètres suivants : β , η et γ .

La densité de probabilité d'une loi de Weibull a pour expression :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]$$

Ou :

β est le paramètre de forme ($\beta > 0$).

η est le paramètre d'échelle ($\eta > 0$).

γ est le paramètre de position ($\gamma \geq 0$).

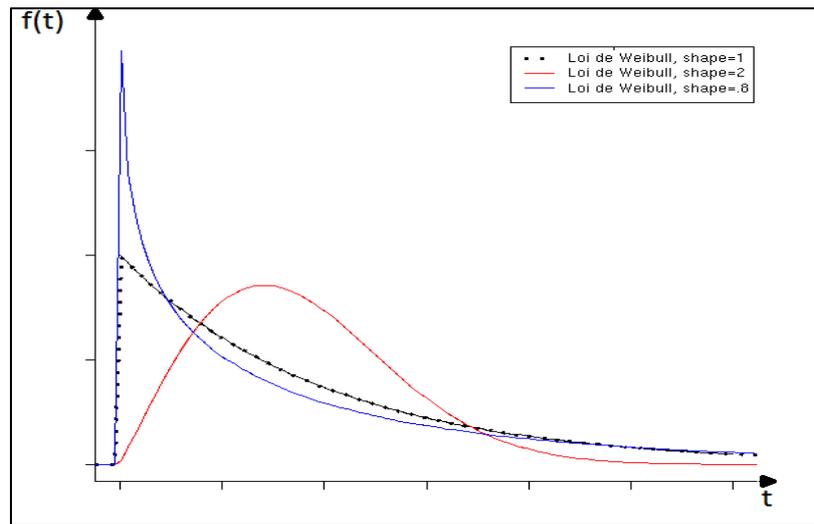


Figure (II.10) La fonction de densité de probabilité de la loi Weibull

La fonction fiabilité:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]$$

5. Etude statistique sur la base des données d'exploitation :

L'étude de la fiabilité sur la base des données expérimentales nécessite un traitement statistique qui permet d'estimer la loi qui s'ajuste le mieux à des valeurs numériques obtenues expérimentalement ceci afin qu'ils puissent ensuite effectuer des prévisions relativement exactes.

5.1. Suite statistique :

Elle est généralement représentée sous forme d'un tableau qui regroupe :

- **Les classes** : ce sont des intervalles qui contiennent un nombre donné d'observation

$$\text{la classe} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{i}$$

$$i = \sqrt{N}$$

Tel que : i le nombre de classe.

N le nombre total des échantillons.

- **Effectif** : c 'est le nombre d'observation de chaque classe.
- **Effectif relatif** : il est défini par le rapport entre le nombre d'observation de chaque classe sur le nombre total d'échantillons.

5.2. L'histogramme :

C'est la représentation graphique de la suite statistique tracé sous forme des rectangles ayant pour base l'étendu de la classe et pour hauteur l'effectif.

La forme de ce dernier permet de mettre une hypothèse sur la loi de distribution.

6. Estimation par intervalle de confiance :

Il est important d'affecté chaque estimateur d'un intervalle de confiance à un niveau de confiance donné. Par principe, on cherche ainsi à évaluer les bornes d'un intervalle encadrant la valeur de l'estimateur ; si on affirme que le paramètre appartient à cet intervalle il y a une probabilité α pour que l'on se trompe. De manière simplifié on peut dire que le paramètre cherché aura une probabilité choisi α de ne pas appartenir a cet intervalle celui-ci est appelé intervalle de confiance et la quantité $1 - \alpha$ est appelée niveau de confiance.

Prenant le calcul d'estimateur et de l'intervalle de confiance d'un taux de défaillance :

$\hat{\lambda}$: Estimateur de taux de défaillance.

λ_{sup} : Borne supérieure d'un intervalle de confiance au niveau de confiance $1 - \alpha$.

λ_{inf} : Borne inférieure d'un intervalle de confiance au niveau de confiance $1 - \alpha$.

$$\hat{\lambda} = \frac{N_f}{T_f} = \frac{\text{nombre de défaillances en fonctionnement}}{\text{durée cumulée de fonctionnement}}$$

Supposons que λ est constant le nombre de défaillance est distribué suivant une loi exponentielle.

On en déduit que les limites de l'intervalle de confiance sont les suivantes :

$$\lambda_{sup} = \frac{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 (2N_f+2)}{2T_f}$$

$$\lambda_{inf} = \frac{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2 (2N_f)}{2T_f}$$

Avec $\alpha = P[\lambda \notin [\lambda_{inf}, \lambda_{sup}]]$

7. Les tests d'ajustement :

Un test d'adéquation permet de statuer sur la compatibilité d'une distribution observée avec une distribution théorique associée à une loi de probabilité, on s'intéresse dans notre étude par le Test de khi-deux :

Ce test consiste à :

- calculer la statistique khi-deux :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - NP_i)^2}{NP_i}$$

Tel que :

n_i : Nombre d'observations dans la classe i .

P_i : Probabilité d'être dans la classe i .

NP_i : Nombre moyen d'observations attendues si l'hypothèse est juste.

- Comparer les résultats obtenus avec les valeurs χ_{critique}^2 pour un nombre de degré de liberté égal à $k - 1$ et un seuil de signification compris généralement entre 0,1 et 0,01.

8. Fiabilité des systèmes :

Lorsqu'un équipement est composé de plusieurs éléments formant ainsi un système, la fiabilité de ce dernier dépend de la fiabilité de ses composants. De ceci, il faut ajuster le calcul de la fiabilité au système. De façon générale, les composants d'un système sont assemblés en série ou en parallèle.

8.1. Système série:

La défaillance d'un seul composant entraîne la défaillance du système.

$$R_s = P(s) = P(S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_n) = P(S_1) \cdot P(S_2) \dots P(S_n)$$

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i$$

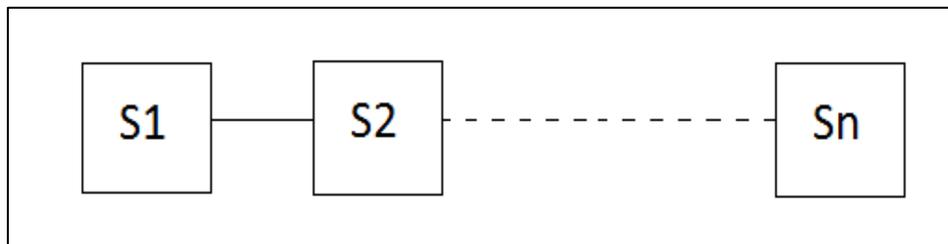


Figure (II.11) Système en série

8.2. Système parallèle:

Il faut que tous les composants soient défectueux pour que le système soit défectueux.

$$F = 1 - R = 1 - P(S) = P(\bar{S})$$

$$F = P(\bar{S}_1).P(\bar{S}_2) \dots P(\bar{S}_n) = F_1.F_2 \dots F_n$$

$$F = (1 - R_1).(1 - R_2) \dots (1 - R_n)$$

$$R_s = 1 - [(1 - R_1).(1 - R_2) \dots (1 - R_n)]$$

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n(1 - R_i)$$

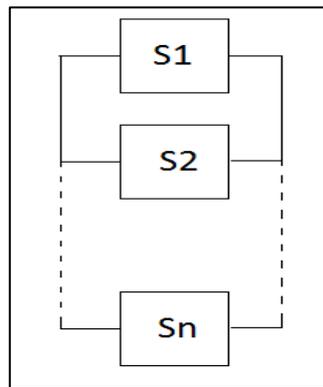


Figure (II.12) Système en parallèle

Le tableau ci-dessous résume la fiabilité d'un système avec différents types d'assemblage suivant la loi exponentielle :

Assemblage	Distribution	$R_{syst}(t)$
Série	Quelconque	$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$
	Exponentielle λ_i non identique	$R_s(t) = \exp(-(\sum_{i=1}^n \lambda_i)t)$
	Exponentielle λ_i identique	$R_s(t) = e^{-n \lambda_i t}$
Parallèle	Quelconque	$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \exp(-\int_0^t \lambda_i \tau d\tau))$
	Exponentielle λ_i non identique	$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t})$
	Exponentielle λ_i identique	$R_s(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_i t})^n$

9. Caractéristiques de maintenabilité :

9.1. La maintenabilité :

C'est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état où elle peut accomplir une fonction requise dans des conditions données d'utilisation.

$$M(t) = P(\text{la maintenance de } E \text{ est achevée au temps } t)$$

$$M(t) = 1 - P(E \text{ non réparée sur la durée } [0, t])$$

9.2. La maintenance :

C'est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

9.2.1. Les types de maintenance :

La maintenance est classée en deux catégories : la maintenance corrective et la maintenance préventive.

La maintenance corrective est effectuée en cas de défaillance du système, elle peut être palliative (réparation provisoire) ou curative (réparation complète)

La maintenance préventive est réalisée lorsque le système est encore en fonctionnement, elle peut être :

- Systématique lorsque la maintenance préventive est réalisée à des intervalles de temps préétabli ou selon un nombre d'unité d'usage.
- Conditionnelle lorsque l'action de maintenance préventive est subordonnée au contrôle d'évolution des paramètres significatifs de la dégradation elle repose sur la détermination de seuils critiques de ces paramètres.

9.3. Taux de réparation :

C'est la probabilité que l'entité soit réparée entre t et $t + dt$ sachant qu'elle n'était pas réparée sur l'intervalle $[0, t]$.

$$\mu dt = P(E \text{ réparée sur } [t, t + dt] \text{ sachant qu'elle n'était pas réparée sur } [0, t])$$

$$\mu(t) = \frac{1}{1-M(t)} \frac{dM(t)}{dt}$$

9.4. MTTR (Mean Time To Repair) :

Le terme MTTR est la durée moyenne jusqu'à la réparation d'une entité réparable.

On résume les principaux paramètres de maintenabilité dans le tableau ci-contre :

Distribution	Exponentielle	Normale	Log-normale
densité de probabilité $g(t)$	$g(t) = \mu e^{-\mu t}$	$g(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-MTTR}{\sigma}\right)^2\right]$	$g(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t)-MTTR}{\sigma}\right)^2\right]$
Fonction de maintenabilité $M(t)$	$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$	$M(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{(x-MTTR)^2}{2\sigma^2}\right] dx$	$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\log(t)-MTTR}{\sigma}\right)$ $\Phi = -\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{k} dK$
Durée moyenne de maintenabilité MTTR	$MTTR = \frac{1}{\mu}$	$MTTR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N TTR_i$	

10. La disponibilité :

L'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné.

La probabilité associée $A(t)$ à l'instant t est aussi appelée disponibilité et s'exprime par :

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

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

$$\bar{A} = 1 - A(t)$$

La disponibilité instantanée d'un système réparable est donnée par :

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp[-(\lambda + \mu)t]$$

Si on fait tendre le temps à l'infini, on obtient la disponibilité asymptotique :

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

11. La redondance :

Un système réel est constitué de plusieurs composants et présente plusieurs modes de défaillance, de tel système est dit complexe et leur analyse devient plus en plus difficile.

La redondance est une technique qui contribue à l'accroissement de la fiabilité, elle consiste donc à disposer plusieurs exemplaires d'un même équipement.

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.

On distingue deux grandes catégories de redondances dont l'utilisation rend le système plus fiable :

Les redondances actives et les redondances passives ou (standby).

11.1. La redondance active :

On parle de redondance active, quand tous les éléments fonctionnent en permanence. On distingue la redondance active totale et partielle

11.1.1. La redondance active totale :

Un système à redondance active totale ne devient défaillant qu'avec la défaillance du dernier élément survivant. Par définition, il s'agit d'un système dans lequel les éléments sont associés en parallèle.

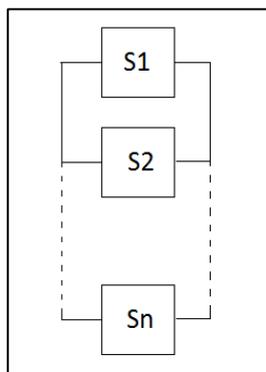


Figure (II.13) Système en redondance active totale

11.1.2. La redondance active partielle :

On parle de redondance active partielle quand un système comporte n éléments, dont K ($K < n$) strictement nécessaires pour qu'il fonctionne. Le système peut donc accepter $(n - k)$ défaillances.

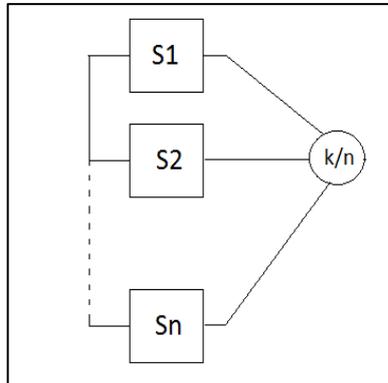


Figure (II.14) Système en redondance active partielle

11.2. La redondance passive :

La redondance est dite passive ou (standby) quand les éléments surabondants ne sont mis en service qu'au moment du besoin; cela signifie que parmi n éléments seuls m sont en service. Ceci implique que certains éléments seront en attente ou en stock.

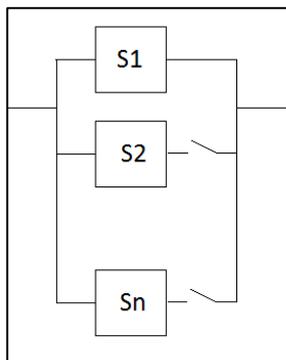


Figure (II.15) Système en redondance passive

11.3. Disponibilité d'un système avec redondance :

Elément 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	$A = 1 - \prod_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \right)$
Redondance active à deux éléments	$A = \frac{\mu^2 + 2\lambda\mu}{\mu^2 + 2\mu\lambda + \lambda^2}$
Redondance r/n	$A = \sum_{k=r}^n \frac{C_N^k \lambda^{n-k} \mu^k}{(\lambda + \mu)^n}$
Redondance passive à deux éléments (1+1)	$A = \frac{2\mu^2 + 2\lambda\mu}{2\mu^2 + 2\mu\lambda + \lambda^2}$

12. La sécurité :**12.1. Notion de sécurité :**

La sécurité est souvent définie par son contraire : elle serait l'absence de danger, de risque, d'accident ou de sinistre, elle concerne la non occurrence d'événements pouvant diminuer ou porter atteinte à l'intégrité du système.

Selon l'organisation internationale de normalisation (ISO) : la sécurité est l'absence de risques inacceptables, de blessure ou d'atteinte à la santé des personnes, directement ou indirectement, résultant d'un dommage au matériel ou à l'environnement.

12.2. La sécurité fonctionnelle :

Selon la norme IEC 61061(1998), la sécurité fonctionnelle est le sous ensemble de la sécurité globale se rapportant à la machine et au système et qui dépend du bon fonctionnement d'un système ou d'un équipement.

Malgré les efforts déployés par les entreprises, les accidents de travail liés aux facteurs humains ou aux facteurs techniques (incendies, explosions, etc.) restent nombreux en Algérie ou à travers le monde. La fréquence de ces accidents a suscité de nombreux efforts sur les études de risques afin de mieux les prévenir, les prévoir et les gérer.

Le chevauchement technique entre les domaines de la sécurité et la maintenance industrielles est tout à fait normal du fait que, d'une part, l'absence ou le manque de sécurité industrielle favorise l'occurrence des accidents provoquant des dommages aux installations et équipements se répercuteront systématiquement sur la maintenance corrective. D'autre part, des équipements mal ou pas entretenus peuvent, très souvent, être la causes d'accidents catastrophiques.

Chapitre III

Détermination de la charge maximale de fonctionnement de l'OZ1/OZ2

Le calcul hydraulique fait partie du calcul technologique des oléoducs qui permet de déterminer les pertes de charge dues aux frottements au cours du transport de pétrole ainsi le régime de fonctionnement des oléoducs.

Dans notre cas ; on fait attention au calcul hydraulique dont le but est la détermination de la charge maximale de refoulement des stations de l'OZ1 et l'OZ2.

1. Caractéristiques du produit :

Pour le calcul hydraulique, les propriétés les plus importantes sont :

La masse volumique : $\rho = 816.16 \text{ Kg/m}^3$

La viscosité : $\nu = 3.24 \text{ cSt}$

Tension de vapeur : $T_v = 0.75 \text{ Kg/cm}^2$

2. Caractéristiques de la ligne :

2.1. La ligne OZ1 :

La longueur : $L = 801.478 \text{ Km}$

Le diamètre : $D_{ex} = 28 \text{ ''}$

L'épaisseur : $\delta_{moy} = 0.00792 \text{ m}$

Le diamètre intérieur : $D_{in} = D_{ex} - 2 \delta_{moy} = 0.69536 \text{ m}$

2.2. La ligne OZ2 :

La longueur : $L = 821 \text{ Km}$

Le diamètre : $D_{ex} = 34 \text{ ''}$

L'épaisseur : $\delta_{moy} = 0,0127 \text{ mm}$

Diamètre intérieur : $D_{in} = 0,8382 \text{ m}$

3. Régime de fonctionnement :

3.1. Nombre de REYNOLDS :

Est déterminé par la formule suivante :

$$Re = \frac{W.D_{int}}{\nu} = \frac{4.Q}{\pi.D_{int}.\nu}$$

Tel que :

$$W = \frac{4.Q}{\pi.D_{int}^2}$$

On distingue deux régimes d'écoulement :

- Ecoulement laminaire.
- Ecoulement turbulent.

L'écoulement turbulent est classé en trois zones :

- Zone tube lisse.
- Zone transitoire.
- Zone quadratique.

La rugosité relative : $\mathcal{E} = \frac{2 e}{D_{int}}$

e : La rugosité absolue en (mm)

$$e = 0.047 \text{ mm}$$

3.2. Coefficient de perte de charge λ :

Il est en fonction du régime d'écoulement et sa détermination présente une tâche primordiale.

Le calcul de λ pour chaque régime se fait comme suit :

Régime laminaire		Régime turbulent				
$\lambda = f(Re)$	$Re = 2320$	Tubes lisses	$Re_1 = \frac{25}{\varepsilon}$	Transitoire (frottement mixte)	$Re_2 = \frac{1000}{\varepsilon}$	Quadratique
		$\lambda = f(Re)$		$\lambda = f(Re, \varepsilon)$		$\lambda = f(\varepsilon)$
$\lambda = \frac{64}{Re}$		$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$		$\lambda = 0.11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\varepsilon}{2} \right)^{0.25}$ $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{7.4} \right)$		$\lambda = 0.11 \left(\frac{\varepsilon}{2} \right)^{0.25}$

Tableau (III.01) coefficient de perte de charge λ

3.2.1. Pertes de charge linéaires :

Sont les pertes de charge par frottement au cours d'un écoulement en régime permanent, sont déterminées par la formule de Darcy- Weisbach :

$$h_f = \frac{\lambda W^2 L}{2.g.D} = \frac{8.Q^2.\lambda.L}{g.\pi^2.D^5} = \frac{0.086.Q^2.\lambda.L}{D^5}$$

Avec :

W : La vitesse d'écoulement du produit en (m/s).

λ : Coefficient de perte de charge.

L : La longueur du tronçon en(m).

D : Diamètre intérieur de la conduite en (m).

g : Accélération de la pesanteur en(m/s^2).

Q : Le débit d'écoulement du produit en (m^3/s).

3.3. La pente hydraulique :

Elle représente les pertes de charge réparties par unité de longueur.

$$i = \tan \alpha = \frac{h_f}{L} = \frac{8.Q^2.\lambda}{g.\pi^2.D^5} = 0,0826 \frac{\lambda.Q^2}{D^5}$$

3.4. Bilan de charge :

$$n. H_{st} + H_{al} = il + \Delta Z + H_{fin}$$

Avec :

$$H_{st} = \frac{P_{ref} - P_{asp}}{\rho.g}$$

Tel que :

H_{st} : La charge créée par chaque station.

H_{al} : La charge d'alimentation (la charge des pompes boosters pour la SP01, et la charge de de produit à l'entrée de station).

H_{fin} : La charge à la fin du tronçon.

4. Détermination de la charge maximale :

4.1. Cas de l'OZ1 :

L'ouvrage OZ01 a pour capacité maximale : $M = 07 \text{ MTA}$.

Le bilan de charge :

$$H_{st} = il + \Delta Z$$

$$H_{st} = \frac{0.0826 \lambda Q^2}{D^5} l + \Delta Z$$

Et :

$$H_{st} = H_{ref} - H_{asp}$$

D'où

$$H_{ref} = \frac{0.0826 \lambda Q^2}{D^5} l + \Delta Z + H_{asp}$$

Détermination du coefficient de perte de charge :

- Calcul du débit :

On a :

$$Q = \frac{M}{\rho}$$

Considérons que le pipe fonctionne 330 jours par an, on calcule le débit volumique :

$$Q = \frac{7 * 10^6 * 10^3}{816,16 * 330 * 24 * 3600}$$

$$Q = 0.301 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Nombre de Reynolds :

$$Re = 169909,00$$

$$Re_1 = 184936,17$$

$$Re_2 = 7397446,81$$

On constate que : $Re_1 < Re < Re_2$ (zone de frottements mixtes)

On calcule λ à l'aide de la formule de Colebrook :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{7,4} \right]$$

On utilise Excel pour le calcul itératif, supposant $\lambda_0 = 0.01$

On pose : $x = -2 \log(Ax + B)$

Tel que :

$$A = \frac{2,51}{Re} ; B = \frac{\varepsilon}{7,4} ; x_0 = \frac{1}{\sqrt{\lambda_0}}$$

Avec $|x - x_0| \leq 10^{-12}$

Les résultats obtenus sont indiqués dans tableau ci-dessous :

λ_0	x_0	x	écart	λ
0,01	10	7,584571	2,415429	0,017384
0,017384	7,584571	7,792799	0,208228	0,016467
0,016467	7,792799	7,772747	0,020052	0,016552
0,016552	7,772747	7,774658	0,001911	0,016544
0,016544	7,774658	7,774476	0,000182	0,016545
0,016545	7,774476	7,774493	1,74E-05	0,016545
0,016545	7,774493	7,774492	1,66E-06	0,016545
0,016545	7,774492	7,774492	1,58E-07	0,016545
0,016545	7,774492	7,774492	1,51E-08	0,016545
0,016545	7,774492	7,774492	1,44E-09	0,016545
0,016545	7,774492	7,774492	1,37E-10	0,016545
0,016545	7,774492	7,774492	1,31E-11	0,016545
0,016545	7,774492	7,774492	1,25E-12	0,016545
0,016545	7,774492	7,774492	1,18E-13	0,016545

$$\lambda = 0.16545$$

Calculons la charge maximale de refoulement de chaque station :

La station	SP01	SP03	SP05
La longueur l (m)	218075	197025	174900
ΔZ (m)	339	390	415
H_{asp} (m)	74,90	74,90	74,90

Tableau (III.02) caractéristiques des stations de l'OZ1

Les résultats de calcul sont résumés dans le tableau ci-dessous :

	Q (m^3/s)	H_{ref} (m)	H_{ref} (bar)
SP01	0,301	579,60	46,43
SP03	0,301	614,61	49,24
SP05	0,301	622,79	49,89

4.2. Cas de l'OZ2 :

L'ouvrage OZ2 a pour capacité maximale : $M = 34 \text{ MTA}$.

- calcul du débit volumique :

$$Q = \frac{34 * 10^6 * 10^3}{816,16 * 330 * 24 * 3600}$$

$$Q = 1,460 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Calcul du nombre de Reynolds :

$$Re = 684635,34$$

$$Re_1 = 222925,53$$

$$Re_2 = 8917021,28$$

On constate que : $Re_1 < Re < Re_2$ (zone de frottements mixtes)

On calcul λ à l'aide de la formule de Colebrook :

λ_0	x_0	x	écart	λ
0,01	10	8,622789	1,377211	0,013449
0,013449	8,622789	8,709463	0,086675	0,013183
0,013183	8,709463	8,703746	0,005717	0,0132
0,0132	8,703746	8,704122	0,000376	0,013199
0,013199	8,704122	8,704097	2,47E-05	0,013199
0,013199	8,704097	8,704099	1,63E-06	0,013199
0,013199	8,704099	8,704099	1,07E-07	0,013199
0,013199	8,704099	8,704099	7,04E-09	0,013199
0,013199	8,704099	8,704099	4,63E-10	0,013199
0,013199	8,704099	8,704099	3,04E-11	0,013199
0,013199	8,704099	8,704099	2E-12	0,013199
0,013199	8,704099	8,704099	1,31E-13	0,013199

$$\lambda = 0,013199$$

Calculons la charge maximale de refoulement de chaque station :

La station	SP01	SP02	SP03	SP04	SP05	SP06
La longueur l (m)	127600	93200	87100	109300	121000	100800
ΔZ (m)	76	252	281	112	125	236,2
H_{asp} (m)	74,90	74,90	74,90	74,90	74,90	74,90

Tableau (III.03) caractéristiques des stations de l'OZ2

Les résultats de calcul sont résumés dans le tableau ci-dessous :

	Q (m^3/s)	H_{ref} (m)	H_{ref} (bar)
SP01	1,460	867,90	69,53
SP02	1,460	850,60	68,14
SP03	1,460	845,32	67,72
SP04	1,460	801,07	64,17
SP05	1,460	879,81	70,48
SP06	1,460	877,50	70,30

Interprétation des résultats :

OZ1 :

La station	Basse pression de refoulement (bars)	La pression de refoulement (bars)	Haute pression de refoulement (bars)
SP01	36	46,43	58.5
SP03	36	49,24	60.5
SP05	36	49,89	58

OZ2 :

La station	Basse pression de refoulement (bars)	La pression de refoulement (bars)	Haute pression de refoulement (bars)
SP01	32	69,53	74
SP02	36	68,14	68.2
SP03	36	67,72	75.3
SP04	32	64,17	65.3
SP05	35	70,48	70.9
SP06	34	70,30	70.7

D'après les tableaux ci-dessus, on constate que la pression de refoulement maximale calculée pour chaque station est comprise entre la pression basse et haute de refoulement. Par conséquent, les deux ouvrages fonctionnent en plein sécurité avec les débits maximaux.

Chapitre IV

Etude statistique sur la fiabilité des turbopompes de l'OZ2

1. Historique de pannes des turbopompes :

Prenons l'exemple de la SP01, on rappelle que cette station contient 04 turbopompes fonctionnent sur l'OZ2.

Dans ce qui suit, on montre les tables des retours d'expérience enregistrés sur ces TP.

Turbopompe 103						
N° de panne	Cumul de marche	TBF (h)	Durée de panne	TTR (h)	Nombre de démarrage	Causes de panne
1	1502,35	1502,35	120,00	27,00	7	Manque sonde t° d'huile
2	2253,58	751,23	36,00	7,50	11	Elimination défaut vibration
3	4093,71	1840,13	48,50	12,00	15	Haute t° d'huile
4	5933,84	2142,76	72,00	27,00	20	Problèmes thermo couple
5	5977,84	44	200,00	39,00	23	Ecran digital défectueux
6	6596,19	618,35	61,00	35,02	36	Problème vanne de recyclage
7	7596,8	1000,61	30,00	17,84	36	Défaut d'allumage

Tableau (IV.01) Heures de marche de la TP 103

Turbopompe 104						
N° de panne	Cumul de marche	TBF (h)	Durée de panne	TTR (h)	Nombre de démarrage	Causes de panne
1	445,00	445,00	79,15	8,00	4	Défaut T° D'air
2	823,00	378,00	185,00	27,20	8	Défaut De Vibration
3	3569,65	2746,65	660,10	13,00	8	Perte De Flamme
4	4095,90	526,25	494,00	7,70	10	Défaut Non Allumage
5	5070,87	974,97	83,00	19,50	12	Séquence Combustion Incomplète
6	8284,37	3213,5	56,00	21,00	14	Défaut Vanne Doseuse Gaz
7	9782,64	1498,27	15,40	23,60	17	Défaut Transmetteur De T° d'huile
8	12426,64	2644,00	19,00	18,70	20	Défaut Détecteur Feu Et Gaz

Tableau (IV.02) Heures de marche de la TP 104

Turbopompe 105						
N° de panne	Cumul de marche	TBF (heure)	Durée de panne	TTR (heure)	Nombre de démarrage	Causes de panne
1	280,95	280,95	13,00	7,00	9	Défaut vanne de recyclage
2	693,49	412,54	20,00	6,00	17	Calage moteur
3	2528,94	1 835,45	164,00	24,70	18	Défaut allumage
4	2607,54	78,60	60,00	1,60	22	Alimentation électrique 24 v
5	4108,05	1 500,51	32,00	11,00	33	Insuffisance vitesse turbine libre
6	4960,40	852,35	26,00	16,80	33	Intervention sur vanne aspiration pompe
7	5040,40	80,00	96,00	30,00	46	Manque bougies d'allumage
8	6789,4	1 749,00	80,00	50,00	51	Déplacement bague extérieure pompe
9	7201,94	412,54	74,00	19,30	58	Défaut vanne aspiration pompe
10	8297,29	1095,35	26,45	14,25	4	Fuite d'huile cote réducteur de vitesse pompe

Tableau (IV.03) Heures de marche de la TP 105

Turbopompe 106						
N° de panne	Cumul de marche	TBF (h)	Durée de panne	TTR (h)	Nombre de démarrage	Causes des pannes
1	270,12	270,12	48,00	10,00	8	Défaut transmetteur t° d'huile
2	2473,17	2203,05	76,00	15,40	11	Défaut détecteur feu & gaz
3	3557,42	1 084,25	96,00	26,00	16	Défaut allumage
4	3699,42	142	36,00	5,48	23	Echec flamme
5	4409,42	710	27,00	4,00	26	Changement garniture extérieures
6	6795,47	2386,05	40,00	6,00	35	Fuite de brut cote soupape aspiration
7	7749,47	954	22,00	4,00	45	Défaut allumage
8	8955,52	1 206,05	38,00	29,00	48	Insuffisance vitesse turbine libre
9	12456,52	3501	210,00	34,80	51	Intervention sur la pompe

Tableau (IV.04) Heures de marche de la TP 106

2. Estimation des paramètres de fiabilité :

Les TP sont identiques et fonctionnent dans un environnement semblable c'est ce qu'on a permis de regrouper les échantillons afin de pallier le problème d'insuffisance des données issues de chaque machine :

1.1. Taux de défaillance :

	TP 103	TP 104	TP 105	TP 106
	TBF			
1	44	378	78,6	142
2	618,35	445	80	270,12
3	751,23	526,25	280,95	710
4	1000,61	974,97	382,46	954
5	1502,35	1498,27	412,54	1084,25
6	1840,13	2644	852,35	1206,05
7	2142,76	2746,65	1095,35	2203,05
8		3213,5	1500,51	2386,05
9			1749	3501
10			1835,45	

2.1.1. Analyse statistique de l'échantillon :

échantillon = {44 – 78,6 – 80 – 142 – 270,12 – 280,95 – 378 – 382,46 – 412,54 – 445 – 526,25 – 618,35 – 710 – 751,23 – 852,35 – 954 – 974,97 – 1000,61 – 1084,25 – 1095,35 – 1206,05 – 1498,27 – 1500,51 – 1502,35 – 1749 – 1835,45 – 1840,13 – 2142,76 – 2203,05 – 2386,05 – 2644 – 2746,65 – 3213,5 – 3501}

Nombre d'échantillons : $N = 34$

Nombre de classe : $k = \sqrt{34} \approx 6$

Le pas : $\Delta t = \frac{3501-44}{6} = 576.2 h$

Centre de la classe : $ci = \frac{a+b}{2}$

2.1.2. La suite statistique :

N ° de classe	Classe	Ci	Ni	Pi	Pi cumule
1	[44 - 620,2[	332,1	12	0,353	0,353
2	[620,2 - 1196,4[	908,3	8	0,235	0,588
3	[1196,4 - 1772,6[	1484,5	5	0,147	0,735
4	[1772,6 - 2348,8[	2060,7	4	0,118	0,853
5	[2348,8 - 2925[	2636,9	3	0,088	0,941
6	[2925 - 3501,2[	3213,1	2	0,059	1,000
Σ			34	1,000	

La moyenne :

$$MTBF = \sum_{i=1}^k ci . Pi$$

$$MTBF = 1213,35 \text{ h}$$

L'histogramme correspondant au tableau statistique théorique est représenté sur la figure suivante:

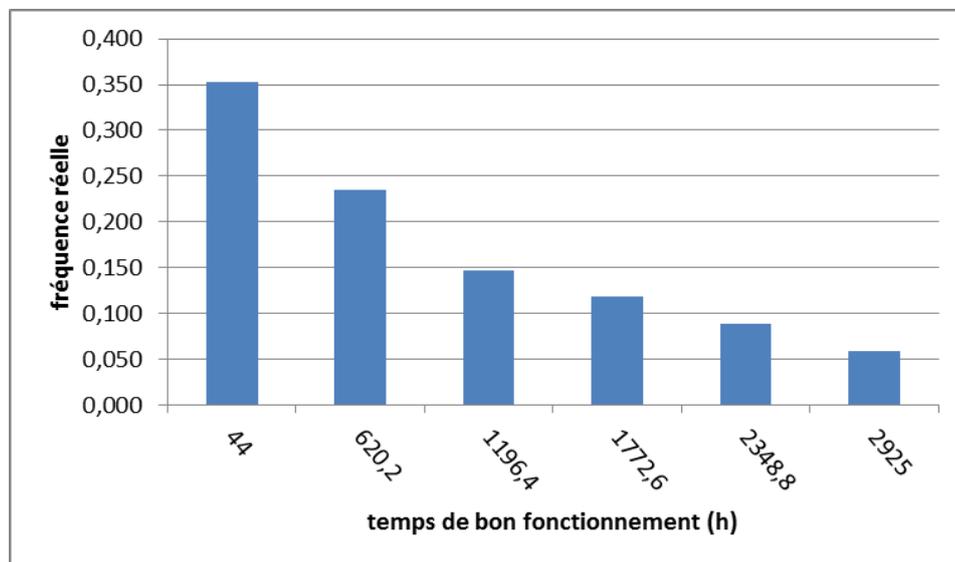


Figure (IV.01) Histogramme des temps de bon fonctionnement SP01

D'après l'allure de l'histogramme, on suppose que la loi de distribution est exponentielle.

D'où :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

$$\lambda = 0,000824 \text{ h}^{-1}$$

2.1.3. Test Khi-deux :

Afin de vérifier notre hypothèse, on procède le test khi-deux : $\chi^2 < \chi_{critique}^2$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(ni - NP_i^*)^2}{NP_i^*}$$

Tel que :

P_i^* : est la fréquence théorique :

$$P_i^* = F(b) - F(a) = \int_a^b f(t) dt$$

D'où :

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$$

N ° de classe	Classe	P_i^*	$\frac{(ni - NP_i^*)^2}{NP_i^*}$
	[0 - 44[	0,0356	1,211
1	[44 - 620,2[	0,3646	0,013
2	[620,2 - 1196,4[	0,2268	0,011
3	[1196,4 - 1772,6[	0,1410	0,009
4	[1772,6 - 2348,8[	0,0877	0,347
5	[2348,8 - 2925[	0,0546	0,707
6	[2925 - 3501,2[	0,0339	0,621
	[3501,2 - ∞ [0,0558	1,898
	Σ	1,000	4,816

$$\chi^2 = 4,816$$

Pour un degré de liberté $k - 1 = 5$ et une erreur admissible 0.1 :

$$\chi_{\text{critique}}^2 = 9.2364$$

Donc :

$$\chi^2 < \chi_{\text{critique}}^2 ;$$

D'où l'hypothèse est admise.

2.1.4. Estimation de λ par intervalle de confiance :

Pour le calcul des bornes de l'intervalle de confiance de taux de défaillance pour un niveau de confiance de : $1 - \alpha = 0.9$

Avec : $N_f = 34$ et $T_f = 41049,8 h$

$$\lambda_{sup} = \frac{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 (2N_f + 2)}{2T_f}$$

$$\lambda_{inf} = \frac{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2 (2N_f)}{2T_f}$$

N_f	T_f	$\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2 (2N_f)$	$\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 (2N_f + 2)$	$\hat{\lambda}$	λ_{inf}	λ_{sup}
34	41049,8	50,03	90,53	0,00083	0,00061	0,0011

2.2. Taux de réparation :

Tableau des temps de réparation (TTRi) pour les turbopompes (en heures) :

	TP 103	TP 104	TP 105	TP 106
	TTR			
1	7,5	8	1,5	4
2	9,3	7,7	6	5,48
3	12	13	7	6
4	17,84	18,7	11	8
5	27	19,5	14,25	10
6	35,02	21	16,8	15,4
7	39	23,6	19,3	26
8		27,2	24,7	29
9			30	34,8
10			50	

2.2.1. Analyse statistique de l'échantillon :

échantillon = {1,5 - 4 - 5,48 - 6 - 6 - 7 - 7,5 - 7,7 - 8 - 8 - 9,3 - 10 - 11 - 12 - 13 - 14,25 - 15,4 - 16,8 - 17,84 - 18,7 - 19,3 - 19,5 - 21 - 23,6 - 24,7 - 26 - 27 - 27,2 - 29 - 30 - 34,8 - 35,02 - 39 - 50}

Nombre d'échantillons : $N = 34$

Nombre de classe : $k = \sqrt{34} \approx 6$

Le pas : $\Delta t = \frac{50-1,5}{6} = 8,1$

2.2.2. La suite statistique :

N° de classe	Classe	Ci	Ni	Pi	Pi cumule
1	[1,5 - 9,6[	5,55	11	0,324	0,324
2	[9,6 - 17,7[	13,65	7	0,206	0,529
3	[17,7 - 25,8[	21,75	7	0,206	0,735
4	[25,8 - 33,9[	29,85	5	0,147	0,882
5	[33,9 - 42[	37,95	3	0,088	0,971
6	[42 - 50,1[	46,05	1	0,029	1,000
	Σ		34	1,00	

$$\text{MTTR} = 18,176 \text{ h}$$

On construit l'histogramme dont la base est la classe et la hauteur est la fréquence réelle :

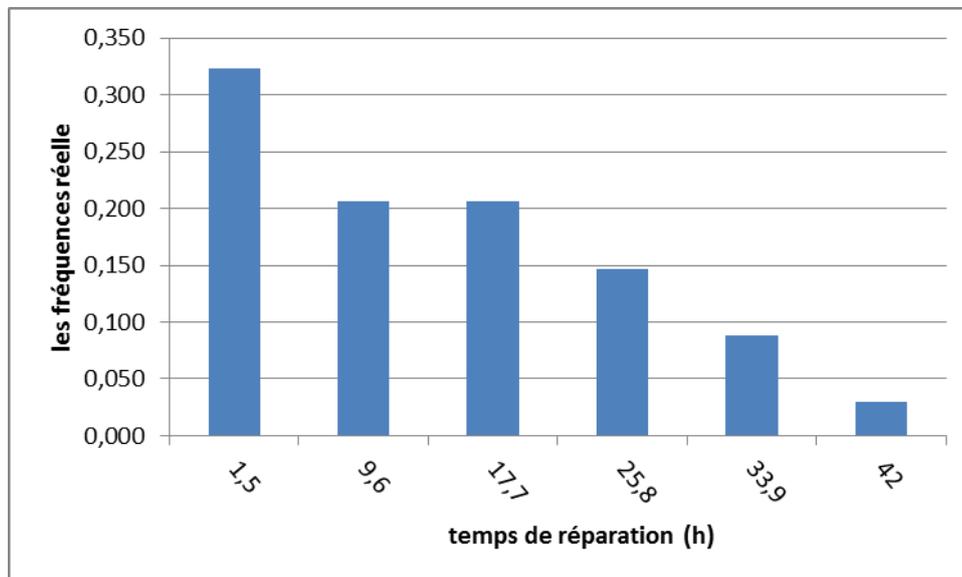


Figure (IV.02) Histogramme de temps de réparation SP01

D'après l'allure de l'histogramme, on suppose que la loi de distribution est exponentielle.

$$\mu = \frac{1}{\text{MTTR}}$$

$$\mu = 0,0550 \text{ h}^{-1}$$

2.2.3. Test khi-deux :

N ° de classe	Classe	P _i *	$\frac{(n_i - NP_i^*)^2}{NP_i^*}$
	[0 - 1,5[	0,079	2,693171
1	[1,5 - 9,6[	0,331	0,006
2	[9,6 - 17,7[	0,212	0,006
3	[17,7 - 25,8[	0,136	1,230
4	[25,8 - 33,9[	0,087	1,412
5	[33,9 - 42[	0,056	0,646
6	[42 - 50,1[	0,036	0,037
	[50,1 - ∞ [	0,064	2,160
	Σ	1,00	8,190

$$\chi^2 = 8,190$$

Pour un degré de liberté $k - 1 = 5$ et une erreur admissible $0,1$, on obtient

$$\chi_{\text{critique}}^2 = 9,2364 .$$

Donc :

$$\chi^2 < \chi_{\text{critique}}^2$$

D'où l'hypothèse est admise.

2.2.4. Estimation de μ par intervalle de confiance :

Pour le calcul des bornes de l'intervalle de confiance de taux de réparation pour un niveau de confiance de : $1 - \alpha = 0,9$

$$\mu_{\text{sup}} = \frac{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 (2N_f + 2)}{2T_f}$$

$$\mu_{\text{inf}} = \frac{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2 (2N_f)}{2T_f}$$

N_f	T_f	$\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2 (2N_f)$	$\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 (2N_f + 2)$	$\hat{\mu}$	μ_{inf}	μ_{sup}
34	605,69	50,03	90,53	0,056	0,041	0,075

3. Résultats de calcul :

On adoptera la même approche pour l'estimation des taux de défaillance et de réparation des turbopompes des autres stations dont leurs historiques de panne sont mentionnés dans **l'annexe 02**, dans ce qui suit les résultats de calcul obtenus :

SP01 :

MTBF	λ	Khi-deux	MTTR	μ	Khi-deux
1213,35	0,000824	4,816	18,176	0,0550	8,190

Intervalle de confiance :

λ_{inf}	$\hat{\lambda}$	λ_{sup}	μ_{inf}	$\hat{\mu}$	μ_{sup}
0,00061	0,00083	0,00110	0,041	0,056	0,075

OSP02 :

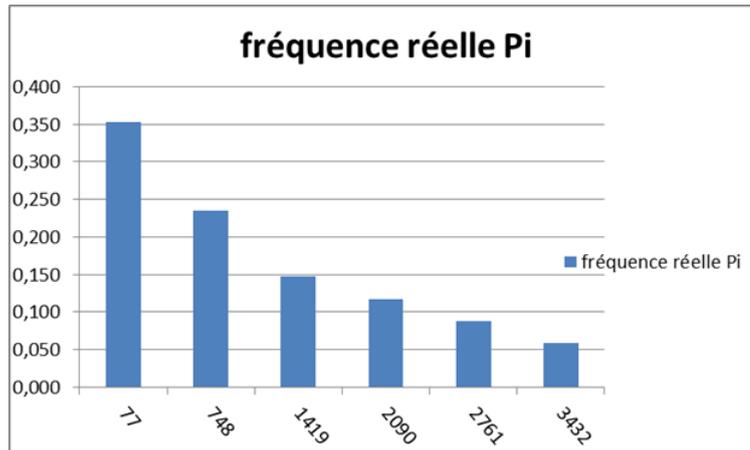


Figure (IV.03) Histogramme des temps de bon fonctionnement SP02

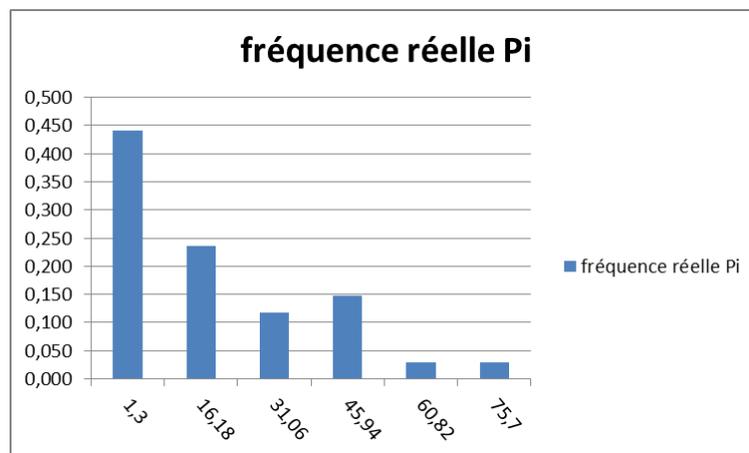


Figure (IV.04) Histogramme de temps de réparation SP02

MTBF	λ	Khi-deux	MTTR	μ	Khi-deux
1438,74	0,000695	5,436	26,246	0,0381	5,365

Intervalle de confiance :

λ_{inf}	$\hat{\lambda}$	λ_{sup}	μ_{inf}	$\hat{\mu}$	μ_{sup}
0,00050	0,00068	0,00090	0,030	0,040	0,054

SP03 :

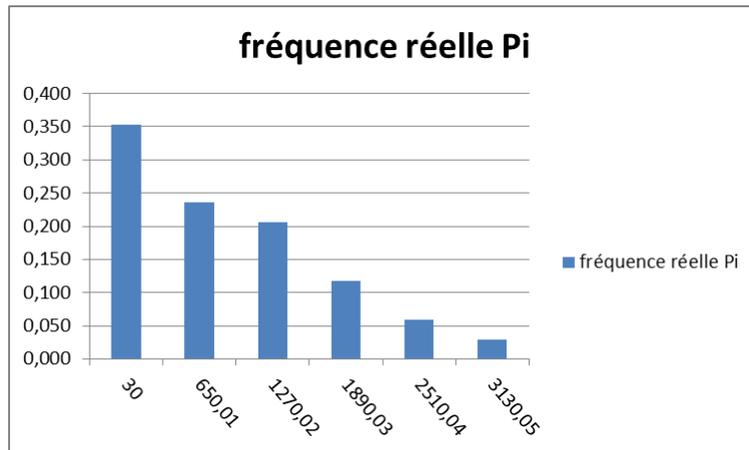


Figure (IV.05) Histogramme des temps de bon fonctionnement SP03

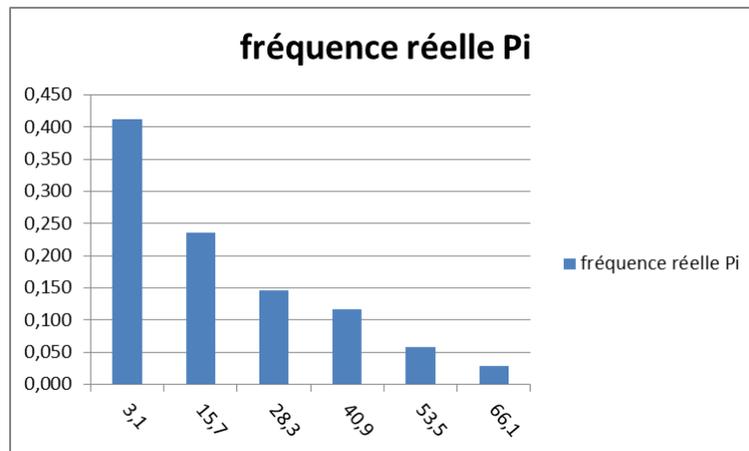


Figure (IV.06) Histogramme de temps de réparation SP03

MTBF	λ	Khi-deux	MTTR	μ	Khi-deux
1197,08	0,000835	4,065	25,335	0,0395	6,822

Intervalle de confiance :

λ_{inf}	$\hat{\lambda}$	λ_{sup}	μ_{inf}	$\hat{\mu}$	μ_{sup}
0,00060	0,00081	0,00108	0,029	0,039	0,053

SP04 :

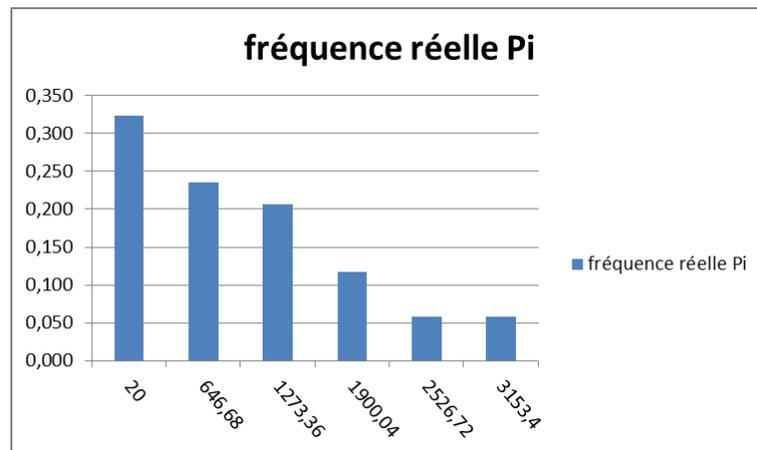


Figure (IV.07) Histogramme des temps de bon fonctionnement SP04

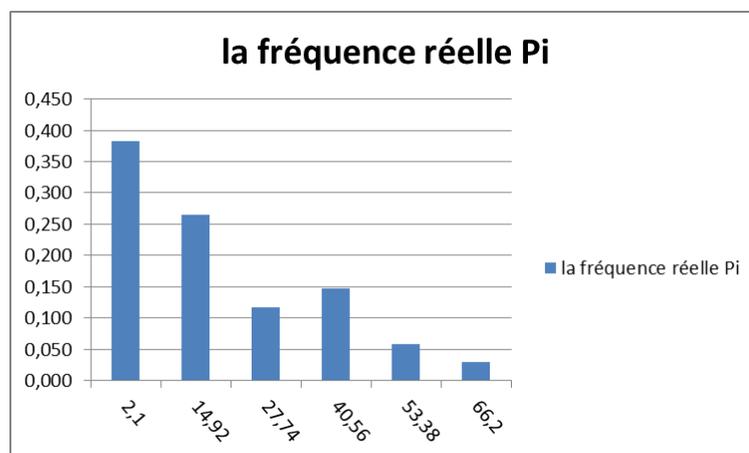


Figure (IV.08) Histogramme de temps de réparation SP04

MTBF	λ	Khi-deux	MTTR	μ	Khi-deux
1291,79	0,000774	4,538	25,478	0,0393	6,564

Intervalle de confiance :

λ_{inf}	$\hat{\lambda}$	λ_{sup}	μ_{inf}	$\hat{\mu}$	μ_{sup}
0,00059	0,00080	0,00107	0,029	0,039	0,053

SP05 :

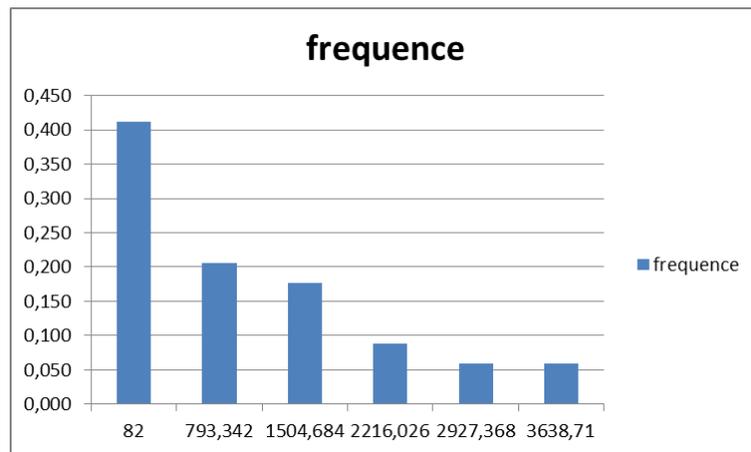


Figure (IV.09) Histogramme des temps de bon fonctionnement SP05

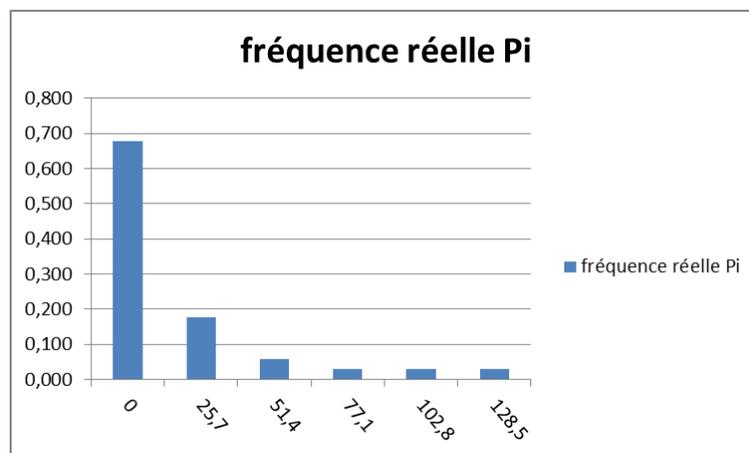


Figure (IV.10) Histogramme de temps de réparation SP05

MTBF	λ	Khi-deux	MTTR	μ	Khi-deux
1400,075	0,0007142	3,172	29,479	0,0339	4,547

Intervalle de confiance :

λ_{inf}	$\hat{\lambda}$	λ_{sup}	μ_{inf}	$\hat{\mu}$	μ_{sup}
0,00054	0,00074	0,00098	0,028	0,038	0,051

SP06 :

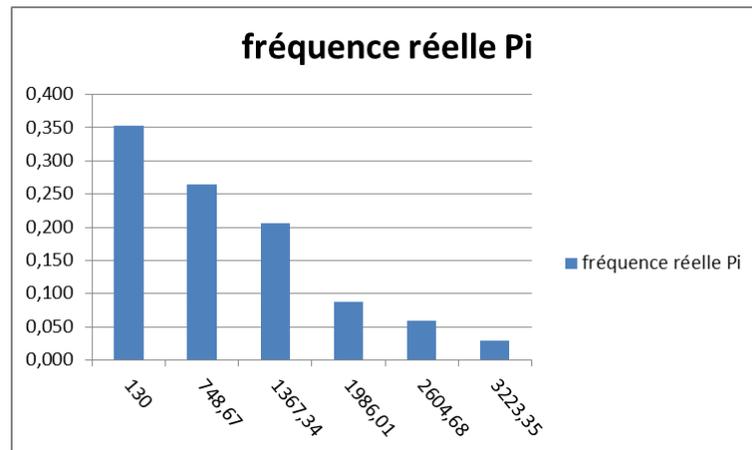


Figure (IV.11) Histogramme des temps de bon fonctionnement SP06

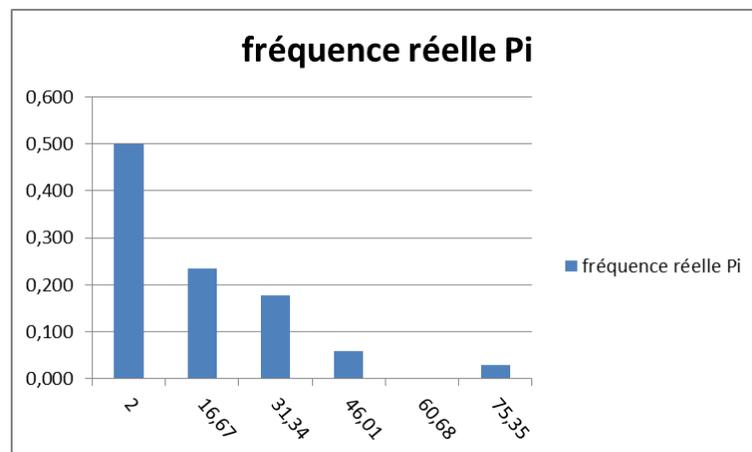


Figure (IV.12) Histogramme de temps de réparation SP06

MTBF	λ	Khi-deux	MTTR	μ	Khi-deux
1258,163	0,000795	6,897	22,712	0,044	2,663

Intervalle de confiance :

λ_{inf}	$\hat{\lambda}$	λ_{sup}	μ_{inf}	$\hat{\mu}$	μ_{sup}
0,00058	0,00078	0,00104	0,034	0,046	0,062

Interprétation des résultats :

D'après l'analyse de notre étude, on peut conclure :

- La distribution des temps de bon fonctionnement et de réparation des turbopompes suit une loi exponentielle ce qui implique que ces équipements se trouvent dans la zone de plein activité.
- Les TP ont des taux de défaillance tolérables compris entre 0,000695 ~ 0,000835 vu de leurs nouveautés.
- Les taux de réparation ont des valeurs acceptables comprises entre 0,0339 ~ 0,0550, qui se traduit par une réparation admissible qui peut être amélioré et modernisé.

Chapitre V

Application au calcul de la fiabilité, maintenabilité, disponibilité

1. Les graphes de Markov :

La méthode markovienne est une technique très performante, utilisée pour modéliser des systèmes dont les modes de défaillance sont dépendants, mais aussi pour les systèmes réparables avec taux de panne et de réparation constants. Le diagramme représente les différents états du système et les transitions entre ces états.

Un système redondant contient n composants se trouve à un instant donné dans un des $(n + 1)$ états :

E_i caractérisé par le nombre i de composants en état de marche.

E_n est l'état pour lequel tous les composants sont bons.

E_0 l'état pour lequel tous les composants sont défectueux.

Le passage d'un état à un autre est évalué par les taux de transition λ et μ tel que :

- λdt caractérise la probabilité de passer de l'état i (état de bon fonctionnement) vers l'état $i - 1$ (état de défaillance) entre l'instant t et $t + dt$.
- μdt caractérise la probabilité de revenir à l'état i (après réparation) entre l'instant t et $t + dt$.

De plus, on rajoute une boucle à chaque sommet qui correspond à la probabilité de rester dans le même état entre l'instant t et $t + dt$.

On considère le système suivant :

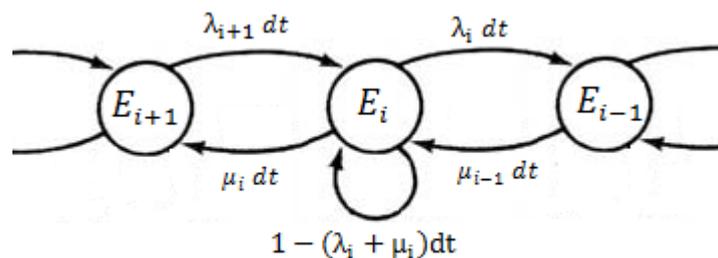


Figure (V.01) Graphe d'état d'un système réparable

P_i c'est la probabilité que le système se trouve à l'état E_i à l'instant $t + dt$.

$$P_i(t + dt) = P_{i+1}(t) \lambda_{i+1} dt + P_i(t)(1 - \lambda_i dt - \mu_i dt) + P_{i-1}(t) \mu_{i-1} dt$$

La forme différentielle de cette équation est :

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = P_{i+1}(t) \lambda_{i+1} - P_i(t) (\lambda_i + \mu_i) + P_{i-1}(t) \mu_{i-1}$$

Associé à la relation :

$$\sum_{i=0}^n P_i(t) = 1$$

Les deux équations aux limites :

$$\begin{cases} \frac{d P_n(t)}{dt} = -\lambda_n P_n(t) + \mu_{n-1} P_{n-1}(t) \\ \frac{d P_0(t)}{dt} = -\mu_0 P_0(t) + \lambda_1 P_1(t) \end{cases}$$

Application à la disponibilité :

A l'instant $t = 0$, on suppose que tous les composants sont bons d'où :

$$P_n(0) = 1 ; P_i(0) = 0, \forall i \neq n$$

Pour calculer la disponibilité d'un système, on définit l'état absorbant E_d qui a l'indice le plus élevé qui entraîne l'indisponibilité du système :

$$A(t) = \sum_{i=d+1}^n P_i(t) = 1 - \sum_{i=0}^d P_i(t)$$

1.1. Application au calcul de la disponibilité des turbopompes :

Appliquant la chaîne de Markov pour évaluer la disponibilité des turbopompes, dont la configuration est (3+1), au niveau des stations de pompage de la ligne OZ2 pour le régime de 34 MTA.

On considère qu'il y a une seule équipe de réparation.

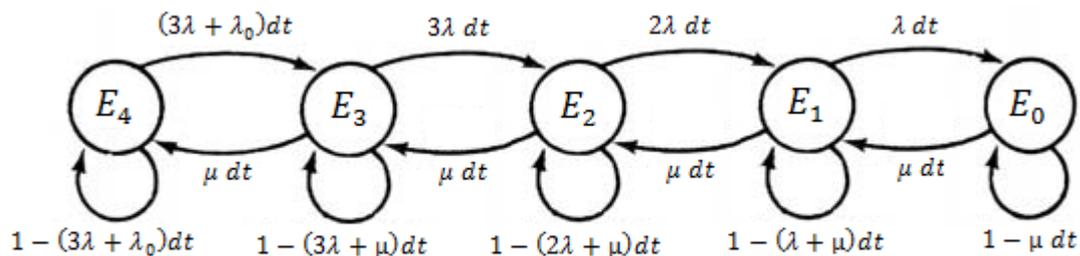


Figure (V.02) Graphe d'état de la disponibilité

1.1.1. Les états de système :

E_4 : 0 TP en panne (03 TP en exploitation et la TP en réserve est en bon état).

E_3 : 1 TP en panne (03 TP en exploitation : la TP en réserve est en exploitation).

E_2 : 2 TP en panne (02 TP en exploitation).

E_1 : 3 TP en panne (01 TP en exploitation).

E_0 : 4 TP en panne (0 TP en exploitation).

1.1.2. Les équations d'états du système :

$$\begin{cases} P_4(t + dt) = P_4(t)(1 - (3\lambda + \lambda_0)dt) + P_3(t) \mu dt \\ P_3(t + dt) = P_3(t)(1 - (3\lambda + \mu)dt) + P_2(t) \mu dt + P_4(t)(3\lambda + \lambda_0)dt \\ P_2(t + dt) = P_2(t)(1 - (2\lambda + \mu)dt) + P_1(t) \mu dt + P_3(t) 3\lambda dt \\ P_1(t + dt) = P_1(t)(1 - (\lambda + \mu)dt) + P_0(t) \mu dt + P_2(t) 2\lambda dt \\ P_0(t + dt) = P_0(t)(1 - \mu dt) + P_1(t) \lambda dt \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d P_4(t)}{dt} = -(3\lambda + \lambda_0)P_4(t) + \mu P_3(t) \\ \frac{d P_3(t)}{dt} = -(3\lambda + \mu)P_3(t) + \mu P_2(t) + (3\lambda + \lambda_0)P_4(t) \\ \frac{d P_2(t)}{dt} = -(2\lambda + \mu)P_2(t) + \mu P_1(t) + 3\lambda P_3(t) \\ \frac{d P_1(t)}{dt} = -(\lambda + \mu)P_1(t) + \mu P_0(t) + 2\lambda P_2(t) \\ \frac{d P_0(t)}{dt} = -\mu P_0(t) + \lambda P_1(t) \end{cases}$$

Conditions initiales : $P_4(0) = 1$, $P_3(0) = P_2(0) = P_1(0) = P_0(0) = 0$

$\lambda_0 = 0$ (Durant le stockage)

A $t \rightarrow \infty$: $P(t) = cste$

$$\frac{d P_4(t)}{dt} = \frac{d P_3(t)}{dt} = \frac{d P_2(t)}{dt} = \frac{d P_1(t)}{dt} = \frac{d P_0(t)}{dt} = 0$$

On aura :

$$\begin{cases} 0 = -(3\lambda + \lambda_0)P_4 + \mu P_3 \\ 0 = -(3\lambda + \mu)P_3 + \mu P_2 + (3\lambda + \lambda_0)P_4 \\ 0 = -(2\lambda + \mu)P_2 + \mu P_1 + 3\lambda P_3 \\ 0 = -(\lambda + \mu)P_1 + \mu P_0 + 2\lambda P_2 \\ 0 = -\mu P_0 + \lambda P_1 \end{cases}$$

Par la résolution analytique, on obtient :

$$\begin{cases} P_0 = \frac{1}{1 + \frac{\mu}{\lambda} + \frac{\mu^2}{2\lambda^2} + \frac{\mu^3}{6\lambda^3} + \frac{\mu^4}{18\lambda^4}} \\ P_1 = \frac{\mu}{\lambda} P_0 \\ P_2 = \frac{\mu^2}{2\lambda^2} P_0 \\ P_3 = \frac{\mu^3}{6\lambda^3} P_0 \\ P_4 = \frac{\mu^4}{18\lambda^4} P_0 \end{cases}$$

1.1.3. Application numérique :

Cas de la SP01 :

SP01	
λ	μ
0,000824	0,0550

$$\begin{cases} P_0 = 8,66 \cdot 10^{-7} \\ P_1 = 5,78 \cdot 10^{-5} \\ P_2 = 0,0019294 \\ P_3 = 0,0429267 \\ P_4 = 0,9550852 \end{cases}$$

L'état absorbant du système est : E_2

D'où :

$$A_{SP1} = \sum_{i=3}^4 P_i$$

$$A_{SP1} = P_3 + P_4$$

$$A_{SP1} = 0,998012$$

Les résultats de calcul de la disponibilité des turbopompes installées au niveau des autres stations sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Station	SP01	SP02	SP03	SP04	SP05	SP06
A (%)	99,8012	99,7064	99,6070	99,6583	99,6099	99,71187

Interprétation des résultats :

Par la méthode markovienne, on a évalué la disponibilité des turbopompes qui diffèrent légèrement d'une station à une autre.

D'après l'analyse des résultats obtenus, on constate :

- Toutes les stations ont une disponibilité acceptable qui varie entre 99,8012% et 99,6070%.
- La SP01 possède la disponibilité plus élevée.

2. Arbre de défaillance :

2.1. Définition de l'arbre de défaillance :

L'arbre de défaillances est une technique d'ingénierie très utilisée dans les études de sécurité et de fiabilité des systèmes en s'appuyant sur la connaissance des éléments constitutifs de ces derniers. L'analyse par arbre de défaillance permet d'exprimer les scénarios conduisant à un évènement redouté (indésirable).

2.2. Concept de base :

Il convient de définir les concepts qui sont à la base de la méthode :

2.2.1. Evènement redouté :

L'analyse par arbre de défaillance se concentre sur un évènement particulier qualifié d'indésirable parce qu'on ne souhaite pas le voir se réaliser, c'est l'évènement sommet pour lequel on fait l'étude de toutes les causes qui y conduisent.

2.2.2. Évènements intermédiaires :

Les événements intermédiaires sont des événements moins globaux que l'événement sommet. Ils sont liés à l'événement redouté via un connecteur logique. Ces événements peuvent être, à leur tour, redéfinis par d'autres événements intermédiaires plus détaillés.

2.2.3. Évènements élémentaires :

Sont des événements non développés correspondants au niveau le plus détaillé de l'analyse du système. On les représente par des cercles.

2.2.4. Les portes logiques :

Les portes logiques généralement utilisées sont représentées ci-contre :

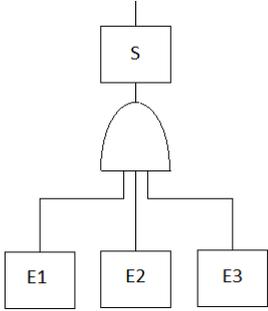
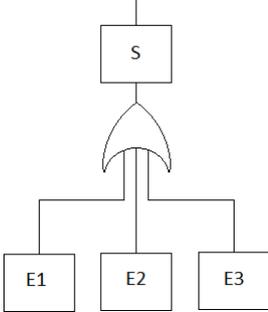
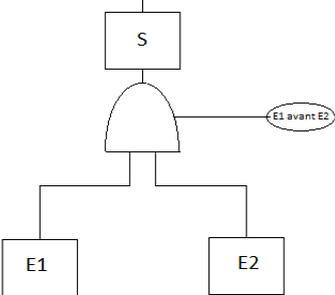
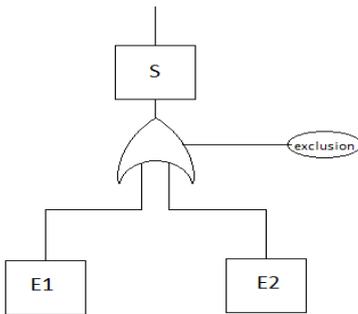
Symbole	Nom du symbole	Signification du symbole
	Porte ET	L'évènement de sortie de la porte et est générée si tous les évènements d'entrée sont présents simultanément.
	Porte OU	L'évènement de la porte OU est généré si l'un au moins des évènements d'entrée est présent.
	Porte ET avec condition	L'évènement de sortie est généré si tous les évènements sont présents et si la condition est réalisée.
	Porte OU avec condition	L'évènement de sortie est généré si l'un au moins des évènements est présent et si la condition est réalisée.

Tableau (V.01) les portes logiques

2.2.5. Représentation des évènements :

Les symboles habituellement utilisés sont représentés dans le tableau ci-dessous :

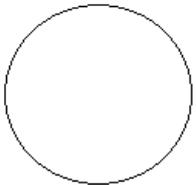
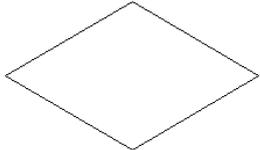
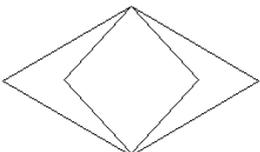
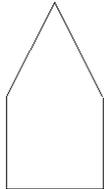
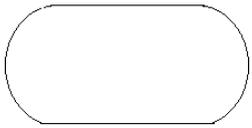
Symbole	Nom du symbole	Signification du symbole
	rectangle	Représentation d'un évènement résultant de la combinaison d'autres évènements par l'intermédiaire d'une porte logique.
	Cercle	Représentation d'un évènement élémentaire ne nécessitant pas de futur développement.
	Losange	Représentation d'un évènement qui ne peut être considéré comme élémentaire mais dont les causes ne sont pas et ne seront pas développées.
	Double losange	Représentation d'un évènement dont les causes ne sont pas encore développées mais le seront ultérieurement.
	Maison	Représentation d'un évènement de base qui est un évènement survenant normalement pendant le fonctionnement du système.
	Ovale	Représentation d'un évènement conditionnel qui peut être utilisé avec certaines portes logiques.

Tableau (V.02) les symboles de représentation des évènements

Pour réduire la taille d'un arbre en évitant la duplication des sous arbres identiques ou semblables on utilise des symboles de transfert de sous arbres.

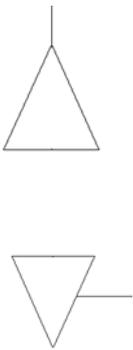
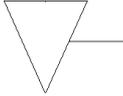
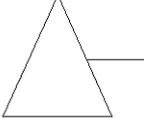
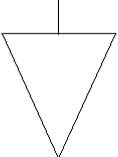
symbole	Nom du symbole	Signification du symbole
	Triangle	<p>La partie de l'arbre de défaillance qui suit le symbole</p>  <p>est transférée à l'emplacement indiqué par le symbole</p> 
	Triangle inversé	<p>Une partie semblable, mais non identique à celle qui suit le symbole</p>  <p>Est transférée à l'emplacement indiqué par le symbole</p> 

Tableau (V.03) les symboles de transfert

2.3. Exploitation de l'arbre de défaillance :

2.3.1. Exploitation qualitative :

Cet analyse permet de déterminer la faiblesse du système .elle est faite dans le but de proposer des modifications afin d'améliorer la fiabilité du système. La recherche des éléments les plus critiques est faite en déterminant les chemins qui conduisant à un ER. Ces chemins critiques représentent des scénarios qui sont analysés en fonction des différentes modifications qu'elles sont possibles d'apporter au système.

2.3.2. Exploitation quantitative :

C'est l'évaluation de la probabilité d'apparition de l'ER connaissant la probabilité d'occurrence des évènements de base ainsi les évènements intermédiaires. Cette analyse permet de déterminer les caractéristiques de la fiabilité du système. En pratique, il est difficile d'avoir des valeurs exactes des probabilités des évènements, c'est pour cela il est possible de faire appel à :

- Des bases de données.
- Des jugements d'experts.
- Des essais lorsque cela est possible.
- Au retour d'expérience sur l'installation ou des installations analogues.

2.4. Construction de l'arbre de défaillance :

Pour construire un arbre de défaillance, on suit une procédure itérative qui débute par l'évènement redouté, appelé évènement sommet. Cet évènement constitue la racine de l'arbre.

La méthode de construction consiste à faire l'hypothèse de l'occurrence de l'évènement redouté et à chercher la ou les causes immédiates (appelées évènements intermédiaires). Le processus est réitéré jusqu'à aboutir à des évènements pour lesquels la recherche des causes ne s'impose plus. Ces évènements nommés évènements élémentaires (ou évènements de base) constituent les feuilles de l'arbre. L'évènement sommet, ainsi que les évènements intermédiaires de l'arbre sont liés à leurs causes immédiates par l'intermédiaire des portes logiques.

2.5. Etablissement de l'arbre de défaillance pour une station de pompage :

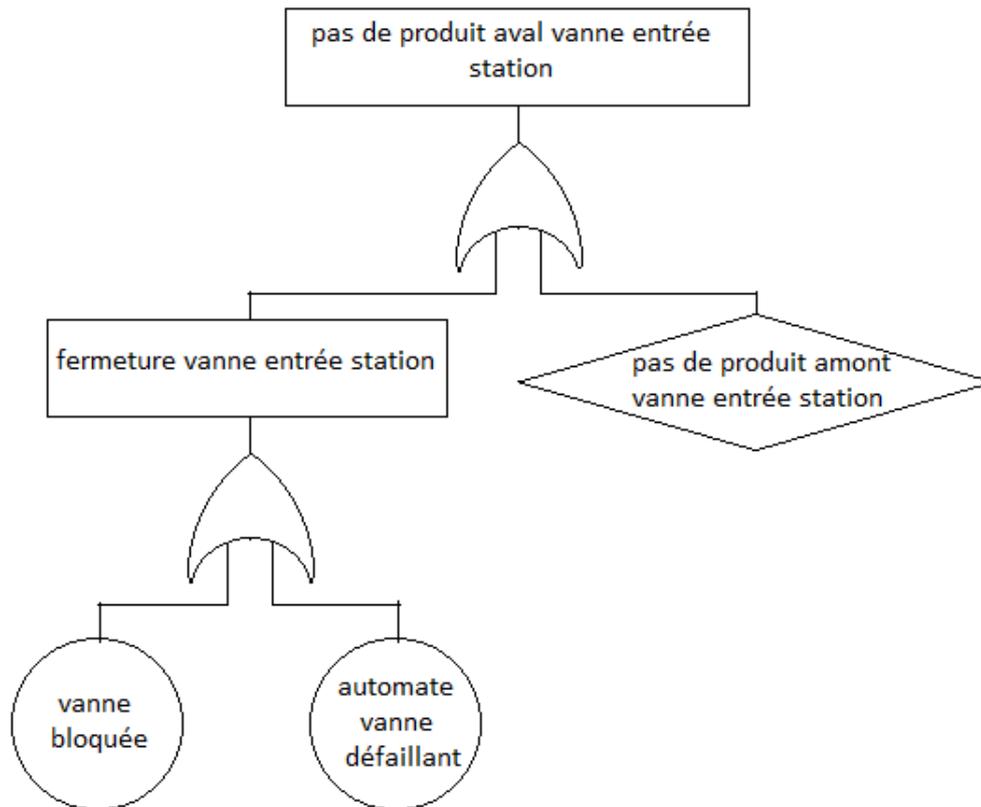
Notre étude consiste à chercher les causes conduisant à l'apparition de l'ER en se basant sur les principaux équipements de la station (**Voir annexe 03**)

<p>Evènement redouté : arrêt de la station</p> <p>A) Pas de produit aval vanne entrée station OU B) panne automate station OU C) turbopompes indisponibles</p>
<p>A) Pas de produit aval vanne entrée station :</p> <p>A1- fermeture vanne entrée station OU A2- pas de produit amont vanne entrée station</p>
<p>A1- fermeture vanne entrée station :</p> <p>A11- vanne bloquée OU A12- automate vanne défaillant</p>
<p>B) panne automate station :</p> <p>B1- pas de courant électrique OU B2- automate station défaillant</p>
<p>B1- pas de courant électrique :</p> <p>B11- coupure d'électricité Sonelgaz ET B12- panne turboalternateurs</p>
<p>C) turbopompes indisponibles :</p> <p>C1- panne turbopompe 03 ET C2- panne turbopompe 04 ET C3- panne turbopompe 05 ET C4- panne turbopompe 06.</p>
<p>C1- panne turbopompe 03 :</p> <p>C11- skid air défaillant OU C12- basse pression d'aspiration OU C13- turbopompe défaillante OU C14- haute pression de refoulement OU C15- skid gaz défaillant.</p>
<p>C11- skid air défaillant :</p> <p>C111- panne compresseurs d'air (deux compresseurs d'air assemblés en parallèle) OU C112- automate skid défaillant OU C113- panne sécheurs (deux sécheurs assemblés en parallèle).</p>
<p>C15- skid gaz défaillant :</p> <p>C151- panne unité de détente (trois détendeurs assemblés en parallèle) OU C152- pas de gaz OU C153- automate skid défaillant OU C154- panne unité de séchage (deux sécheurs assemblés en parallèle).</p>

L'arbre de défaillance associé : (voir annexe 4)

2.5.1. Calcul de la probabilité d'occurrence de l'ER :

Sous système A :



Indice	Evènement	F(t) : probabilité d'apparition de l'évènement (%)	Source
A11	Vanne bloquée	01	Jugement d'experts et retour d'expérience
A12	Automate vanne défaillant	0,5	
A2	Pas de produit amont vanne entrée station	0,2	

La probabilité de défaillance de la vanne d'entrée station :

$$F_{A1} = 1 - [(1 - F_{A11})(1 - F_{A12})]$$

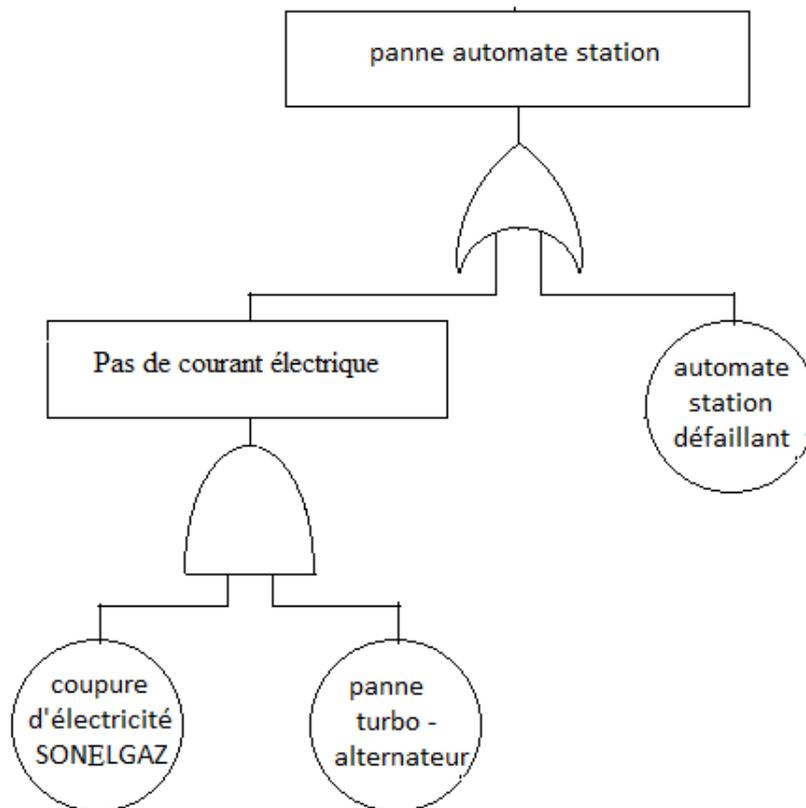
$$F_{A1} = 0,01495$$

La probabilité de ne pas avoir produit aval vanne entrée station :

$$F_A = 1 - [(1 - F_{A1})(1 - F_{A2})]$$

$$F_A = 0,0169$$

Sous système B :



Indice	Evènement	F(t) : probabilité d'apparition de l'évènement (%)	Source
B11	Coupure d'électricité SONELGAZ	7	Jugement d'experts et retour d'expérience
B12	Panne turboalternateurs	5,29	
B2	automate station défaillant	1,2	

La probabilité de ne pas avoir du courant électrique :

$$F_{B1} = F_{B11} * F_{B12}$$

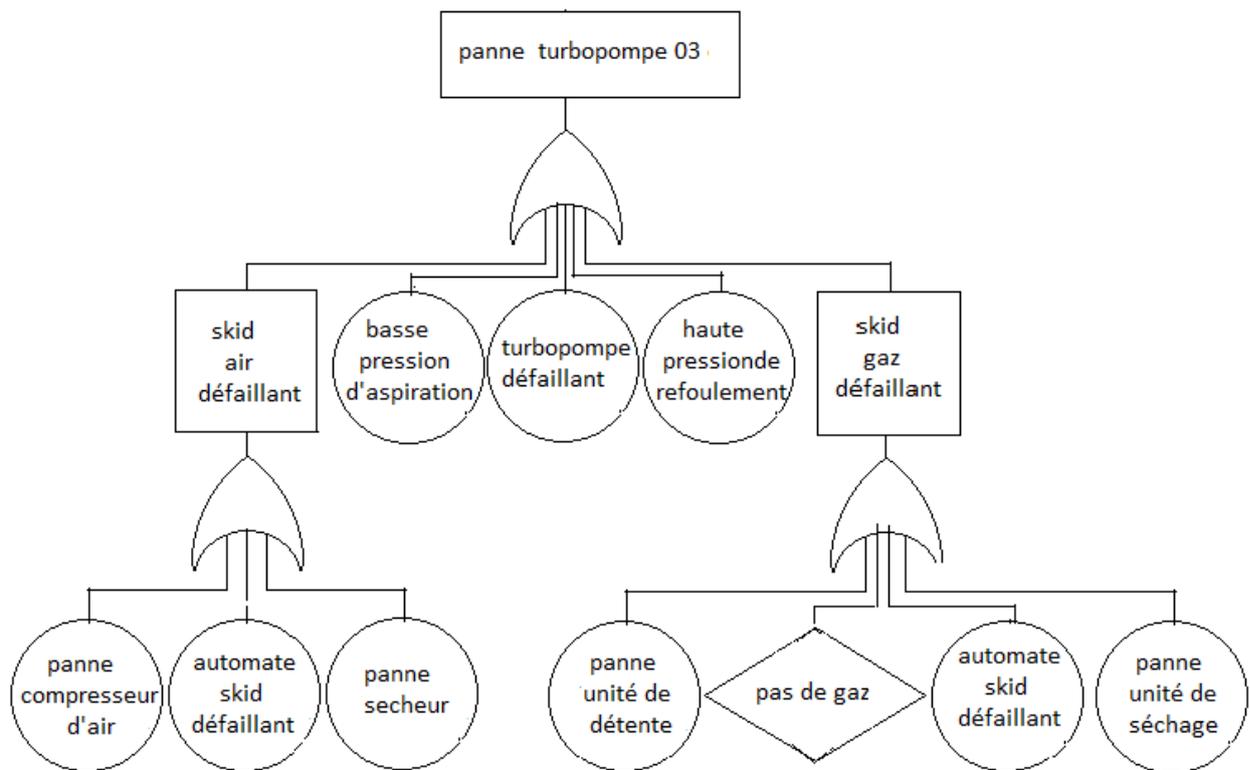
$$F_{B1} = 0,0037$$

La probabilité de défaillance de l'automate de la station :

$$F_B = 1 - [(1 - F_{B1})(1 - F_{B2})]$$

$$F_B = 0,01566$$

Sous système C :



Indice	Evènement	F(t) : probabilité d'apparition de l'évènement (%)	Source
C111	Panne compresseurs d'air	0,04	Jugement d'experts et retour d'expérience
C112	Automate skid air défaillant	0,5	
C113	Panne sécheurs	0,04	
C12	Basse pression d'aspiration	1,5	
C13	Turbopompe défaillante	34	
C14	Haute pression de refoulement	1,5	
C151	Panne unité de détente (skid gaz)	0,003	
C152	Pas de gaz	3,95	
C153	Automate skid gaz défaillant	0,5	
C154	Panne unité de séchage	0,017	

Probabilité de défaillance de skid air :

$$F_{C11} = 1 - [(1 - F_{C111})(1 - F_{C112})(1 - F_{C113})]$$

$$F_{C11} = 0,0058$$

Probabilité de défaillance de skid gaz :

$$F_{C15} = 1 - [(1 - F_{C151})(1 - F_{C152})(1 - F_{C153})(1 - F_{C154})]$$

$$F_{C15} = 0,0445$$

Probabilité d'avoir une panne de la turbopompe 03 :

$$F_{C1} = 1 - [(1 - F_{C11})(1 - F_{C12})(1 - F_{C13})(1 - F_{C14})(1 - F_{C15})]$$

$$F_{C1} = 0,3917$$

Probabilité d'avoir panne des turbopompes :

$$F_C = F_{C1} * F_{C2} * F_{C3} * F_{C4}$$

$$F_C = 0,0235$$

La probabilité d'occurrence de l'ER (arrêt de la station) :

$$F_{ER} = 1 - [(1 - F_A)(1 - F_B)(1 - F_C)]$$

$$F_{ER} = 0,0551$$

Calcul de la fiabilité de la station :

$$R = 1 - F_{ER}$$

$$R = 0,9449$$

Tableau des résultats de calcul :

Système			Sous systèmes		
Indice	F système (%)	R système (%)	Indice	F sous-système (%)	R sous-système (%)
ER	5,51	94,49	A	1,69	98,31
			B	1,57	98,43
			C	2,35	97,65

Interprétation des résultats :

En analysant les résultats du tableau ci-dessus, on constate que la fiabilité des turbopompes est la plus faible ce qui influe négativement sur la fiabilité du système.

Ces résultats montrent que la station étudiée a une fiabilité de 94,49%, autrement dit elle possède un risque de 5,51% qu'elle soit défaillante c'est la probabilité d'interrompre l'acheminement de produit.

Pour une durée de fonctionnement de 01 mois (30 jours), on aura :

La durée de bon fonctionnement est :

$$D = 0.9449 * 30$$

$$D = 28,35 J$$

La durée d'indisponibilité est :

$$D = 30 - 25.35$$

$$D = 1,65 J$$

Cette durée d'indisponibilité correspond à un volume perdu de produit qu'on peut l'évaluer comme suit :

$$Q = \frac{V}{t}$$

D'où le volume mensuel perdu est :

$$V = Q . t$$

$$V = 1,46 * 1,65 * 24 * 3600$$

$$V = 208516,032 m^3$$

3. Diagramme de fiabilité :

3.1. Définition :

Le diagramme de fiabilité modélise l'ensemble des missions à réaliser pour garantir le succès de la mission du système, c'est une représentation graphique sous forme de blocs elle décrit une démarche d'analyse par décomposition fonctionnelle du système en sous fonction.

3.2. Objectifs :

Un diagramme de fiabilité est un modèle qui permet de représenter le comportement d'un système sous une vue fonctionnelle dont l'objectif est de dissocier toutes les opérations à réaliser pour aboutir au succès de la mission du système.

Il ne prend pas en considération les réparations des composants donc on l'utilise uniquement pour l'analyse de fiabilité de système.

3.3. Construction du diagramme :

La figure ci-dessous illustre un schéma simplifié de la ligne OZ2 à lequel on s'intéresse dans notre étude.

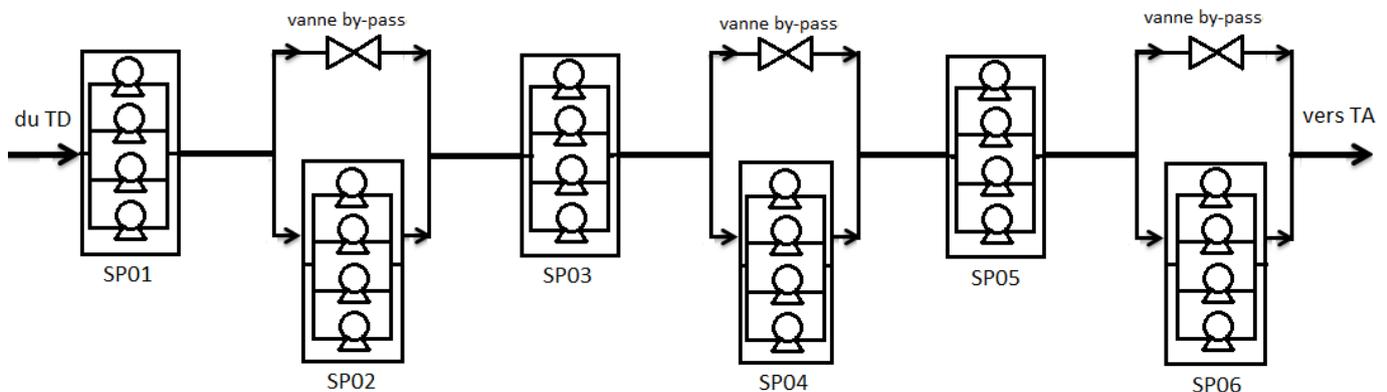


Figure (V.03) schéma simplifié de la ligne

Les chemins de succès :

- 1- partant du TD vers le TA le produit passe à travers toutes les stations (SP01, SP02, SP03, SP04, SP05 et SP06).
- 2- Partant du TD vers le TA le produit ne passe qu'à travers les stations impaires (SP01, SP03 et SP05) et les by-pass des stations paires.

Le diagramme de fiabilité de la ligne (**Voir annexe 05**).

Calcul de la fiabilité de la ligne :

D'après les données issues de l'exploitation :

Elément	Fiabilité (%)	Source
Tronçon	99.69	Jugement d'experts et retour d'expérience
station paire	96,24	
Station impaire	94,49	
By-passe	99,9	

$$R_{\text{ligne}} = R_1 * R_2 * [1 - (1 - R_3)(1 - R_4)] * R_5 * R_6 * R_7 * [1 - (1 - R_8)(1 - R_9)] * R_{10} * R_{11} * R_{12} * [1 - (1 - R_{13})(1 - R_{14})] * R_{15}$$

$$R_{\text{ligne}} = \mathbf{0,8280}$$

Interprétation des résultats :

D'après le calcul résultant de l'analyse du diagramme de fiabilité, la ligne possède un pourcentage de 82,80% d'accomplir sa mission, c'est une valeur un peu faible et ceci revient au type d'association de ses composants, l'assemblage en série diminue la fiabilité du système.

Chapitre VI

Conclusion et recommandations

1. Conclusion :

Ce travail nous a permis de mettre en place une approche d'analyse des caractéristiques de la FMD qui favorise l'amélioration de la sûreté de fonctionnement des installations stratégiques de l'oléoduc OZ2 ; pour l'OZ1 les procédures de l'analyse sont identiques à celles de l'OZ2, seule la difficulté de la collecte des données nous a empêché de l'entamer.

L'idée de départ a été de chercher à capitaliser un ensemble de données disponibles (REX) pour les utiliser dans la détermination des principaux paramètres de la fiabilité et la maintenabilité.

- Intégrant les résultats obtenus des taux de défaillance et de réparation, on s'est appuyé sur l'approche markovienne dans le but d'évaluer la disponibilité des turbopompes.
- Par la suite, on a abordé l'analyse de la fiabilité des stations de pompage en se basant sur la méthode de l'arbre de défaillance pour faire une étude quantitative de l'ER.
- Ensuite, on a fait recours au diagramme de fiabilité afin d'évaluer la fiabilité de la ligne OZ2 tenant compte de l'assemblage en série des tronçons de conduite avec les SP.
- Puis, on a vérifié les pressions de refoulement des stations lors du fonctionnement maximal afin d'assurer qu'elles sont comprises entre les seuils de haute pression de refoulement et basse pression de refoulement.

Enfin, cette étude pourra être complétée en suggérant quelques propositions servant à l'amélioration de la sûreté de fonctionnement de l'OZ2.

2. Recommandations :

Un système est un ensemble de composants en interaction destiné à accomplir une tâche donnée. Dans notre étude ; on a considéré l'oléoduc comme un système constitué de deux composants (sous-systèmes) assemblés en série :

- les tronçons de canalisation.
- les stations de pompage.

La défaillance de chacun d'eux représente une influence directe sur la ligne ce qui altère l'approvisionnement en pétrole. Pour cela, il faut agir sur la fiabilité et la maintenabilité en procédant des méthodes dont la réalisation entrainera un gain de disponibilité de tous les sous-systèmes ce qui amène à un fonctionnement sûr de l'ouvrage.

2.1. Amélioration de la fiabilité des tronçons de canalisation :

Afin d'assurer une longue durée de vie et une exploitation optimale de la ligne OZ2, on propose en plus d'un contrôle et d'un suivi régulier :

Une surveillance cathodique :

Par la vérification du niveau de potentiel électrique de la conduite par rapport au milieu environnant dans le but d'être alerté de toute dégradation accidentelle ou modification de l'environnement de la conduite.

Inspection et nettoyage périodiques des canalisations :

On effectue les opérations de nettoyages en réduisant les impacts de corrosion et d'encrassement sur l'exploitation des pipelines et des inspections pour l'évaluation de l'état technique de la conduite.

Un bon traitement de produit avant de le transporter :

On traite le pétrole brut en diminuant la concentration de l'eau et les particules solides pour le rendre plus conforme aux spécifications de transport.

Une très bonne détection des fuites :

Dans éventualité improbable d'une fuite, la détection rapide est importante afin de minimiser tous les impacts de ce phénomène.

2.2. Amélioration de la disponibilité des turbopompes :

Pour la réalisation de cette proposition, on distingue plusieurs méthodes parmi elles on choisit :

- Augmenter le nombre des turbopompes redondantes : La redondance des équipements est une forme de fiabilité, elle apporte une sécurité à l'utilisateur exploitant, et permet à la maintenance de faire les interventions préventives en gardant le flux de production toujours continu.
- Augmenter le nombre de réparateurs (atelier de réparation) : il permet de réduire la durée d'intervention sur les équipements ce qui entraîne la diminution de la durée de réparation.

A l'aide des graphes de Markov, on évalue l'efficacité de ces méthodes sur la disponibilité des TP :

Première méthode : configuration (3+2), un seul réparateur :

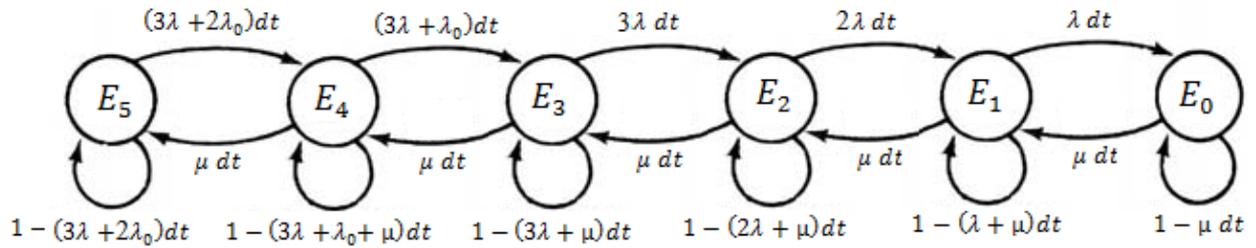


Figure (VI.01) Graphe d'état de la disponibilité

$$\begin{cases} \frac{d P_5(t)}{dt} = -(3\lambda + 2\lambda_0)P_5(t) + \mu P_4(t) \\ \frac{d P_4(t)}{dt} = -(3\lambda + \lambda_0 + \mu)P_4(t) + \mu P_3(t) + (3\lambda + 2\lambda_0)P_5(t) \\ \frac{d P_3(t)}{dt} = -(3\lambda + \mu)P_3(t) + \mu P_2(t) + (3\lambda + \lambda_0)P_4(t) \\ \frac{d P_2(t)}{dt} = -(2\lambda + \mu)P_2(t) + \mu P_1(t) + 3\lambda P_3(t) \\ \frac{d P_1(t)}{dt} = -(\lambda + \mu)P_1(t) + \mu P_0(t) + 2\lambda P_2(t) \\ \frac{d P_0(t)}{dt} = -\mu P_0(t) + \lambda P_1(t) \end{cases}$$

L'état absorbant du système est E_2 .

La disponibilité est calculée par :

$$A = \frac{\frac{\mu^5}{54\lambda^5} + \frac{\mu^4}{18\lambda^4} + \frac{\mu^3}{6\lambda^3}}{1 + \frac{\mu^5}{54\lambda^5} + \frac{\mu^4}{18\lambda^4} + \frac{\mu^3}{6\lambda^3} + \frac{\mu^2}{2\lambda^2} + \frac{\mu}{\lambda}}$$

Deuxième méthode : configuration (3+1), 04 réparateurs :

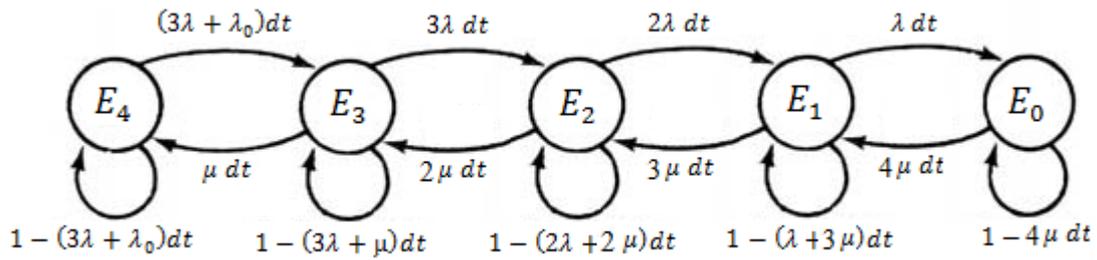


Figure (VI.02) Graphe d'état de la disponibilité

$$\begin{cases} \frac{d P_4(t)}{dt} = -(3\lambda + \lambda_0)P_4(t) + \mu P_3(t) \\ \frac{d P_3(t)}{dt} = -(3\lambda + \mu)P_3(t) + 2\mu P_2(t) + (3\lambda + \lambda_0)P_4(t) \\ \frac{d P_2(t)}{dt} = -(2\lambda + 2\mu)P_2(t) + 3\mu P_1(t) + 3\lambda P_3(t) \\ \frac{d P_1(t)}{dt} = -(\lambda + 3\mu)P_1(t) + 4\mu P_0(t) + 2\lambda P_2(t) \\ \frac{d P_0(t)}{dt} = -4\mu P_0(t) + \lambda P_1(t) \end{cases}$$

L'état absorbant du système est E_2 .

La disponibilité est calculée par :

$$A = \frac{\frac{4 \mu^4}{3 \lambda^4} + \frac{4 \mu^3}{\lambda^3}}{1 + \frac{4 \mu^4}{3 \lambda^4} + \frac{4 \mu^3}{\lambda^3} + \frac{6 \mu^2}{\lambda^2} + \frac{4 \mu}{\lambda}}$$

Les résultats obtenus sont :

Station	SP01	SP02	SP03	SP04	SP05	SP06
Disponibilité %						
Configuration (3+1), un seul réparateur	99,8012	99,7064	99,6070	99,6583	99,6099	99,7119
Configuration (3+2), un seul réparateur	99,9911	99,9839	99,9751	99,9798	99,9754	99,9844
Configuration (3+1), 4 réparateurs	99,9025	99,8565	99,8086	99,8333	99,8099	99,8592

Les deux méthodes sont efficaces, seul le critère de coût permet de favoriser l'une des méthodes par rapport à l'autre.

2.3. Amélioration de la maintenance :

La Fiabilité et la Maintenabilité sont deux notions fondamentales parallèles de même importance. Cependant complémentaires, une maintenabilité optimale sera particulièrement recherchée là où la fiabilité est douteuse, afin de rendre notre système plus performant, on doit :

- Assurer la compétence des responsables de la maintenance.
- Former des équipes spécialisées dans les différents modes de défaillance des turbopompes.
- Elaborer et optimiser un programme de maintenance préventive basé sur la fiabilité de chaque composant dans la ligne (MBF, OMF).
- Assurer un contrôle rigoureux des opérations de maintenance.

2.4. Organiser une bonne gestion des stocks :

Il est important de disposer de la bonne pièce de rechange au bon moment.

Un stock des pièces rechanges bien calculé représente toujours un capital important, qu'il faut gérer en tenant compte de deux contraintes parfaitement contradictoires :

D'une part, maintenir un niveau de stock le plus bas possible, (pour ne pas immobiliser inutilement des capitaux qui seraient tellement plus rentables ailleurs).

D'autre part, assurer un taux satisfaisant de couverture des demandes du service maintenance.

Bibliographie

Afnor. Fiabilité maintenabilité disponibilité, recueil des normes françaises, Afnor-Ute. (1991).

Ait- Kadi. (2002). "La fiabilité des systèmes». Note de cours, département de génie mécanique, université Laval, Québec, Canada.

BENMOUNAH Amar "optimisation of maintenance intervals preventive and repair of gas turbines case of algerien gas pipelines" scientific journal machanica".ISSN 13921207 machanika 2014 volume 20(03):305309.

Manuel opératoire phase 01/02. Sonatrach branche TRC.

Fiche technique. Système de transport par canalisation, pétrole brut OZ1/OZ2 HAOUD EL HAMRA-ARZEW.

BENMOUNAH Amar. Séminaire T.R.C. Juillet – août 2007.

BENMOUNAH Amar. Fiabilité des systèmes (Chaines de Markov).

BENMOUNAH Amar. Fiabilité et disponibilité des systèmes réparables.

BENMOUNAH Amar. Markovian Approach of Safety Engineering of a Machines.System European Journal of Scientific Research. ISSN 1450-216X Vol.25 No.3 (2009), pp.488-498.

BOUHAFS. Cours de transport des produits pétrolier.

W. BENZAOUI. Cours de sûreté de Fonctionnement, Université Kasdi Merbah-Ouargla 2014/2015.

ALAIN Gondran, MICHEL Magnien, MOURICE. Fiabilité des systèmes

VILLEMEUR Alain, CASEAU P, HARCOURT A D. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels.

DURAND Jacques, BLANCHO Philippe. Sûreté de fonctionnement et maîtrise des risques, la maintenabilité.

H.Procaccia et P .Morilhat. Fiabilité des structures et des installations industriels.

Military handbook -791AM (1988). Maintainability DESIGN Technique Design department of defense of Washington, DC.

Military handbook -472 (1984). Maintainability Prediction-Notice Technique department of defense of Washington, DC.

Olivier Basile. Modélisation de la fiabilité des équipements mécaniques .Travail de fin d'études. Faculté polytechnique de Mons, 2001.

P.Chapouille.Fiabilité. Maintenabilité. Technique de l'ingénieur, 6 :T4300, 1980.

Zwinglestein G.Diagnostic des défaillances. Hermès, 1995.

Zwinglestein G. (1995).La maintenance basée sur la fiabilité- diagnostic et maintenance ,1996.

Annexe

Annexe 01

Situation géographique		Sp1	Sp2	Sp3	Sp4	Sp5	Sp6	
Turbopompe	turbine	Nombre	6	4	6	4	6	4
		constructeur	ALSTHOM	ALSTHOM	ALSTHOM	ALSTHOM	ALSTHOM	ALSTHOM
		Type	TORNADO	TORNADO	TORNADO	TORNADO	TORNADO	TORNADO
		Puissance (MW)	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
	Pompe	Nombre	6	4	6	4	6	4
		constructeur	GUINARD	GUINARD	GUINARD	GUINARD	GUINARD	GUINARD
		Débit (m ³ /h)	1752	1752	1752	1752	1752	1752
		HMT (m)	780	780	780	780	780	780
	Type d'assemblage		Parallèle	Parallèle	parallèle	Parallèle	parallèle	Parallèle
	Boosters	Moteur électrique	Nombre	6	-	-	-	-
constructeur			ABB	-	-	-	-	-
Type				-	-	-	-	-
Puissance (Kv)			500	-	-	-	-	-
pompe		Nombre	6	-	-	-	-	-
		constructeur	GUINARD	-	-	-	-	-
		Débit (m ³ /h)	1150/1760	-	-	-	-	-
G Electrogène	OU T Alternateur	Nombre	GE	GE	GE	GE	GE	2TA+GE
		Constructeur	-	-	-	-	-	TURBOM ECA
		Puissance (MW)	-	-	-	319KVA	252KVA	2MW+252 KVA
Consommation		Gaz	Gaz	Gaz	Gaz	gaz	Gaz	
Pression max de refoulement(Bars)		74	68	75	65	71	61	
Pression min de refoulement(Bars)		4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	
Date de mise en service		2003	2004	2003	2004	2003	2004	

Annexe 02

SP02								
Nombre de panne	TP 203		TP 204		TP 205		TP 206	
	TBF	TTR	TBF	TTR	TBR	TTR	TBF	TTR
1	77	1,3	210	2	416,15	4	260	8
2	234,96	5	555,34	5	450,4	7	1222,43	9
3	242	9	600,75	10,38	1388,62	13	1814,3	10,4
4	356,03	11,5	743,13	15	1400,9	16,49	1928	12,71
5	465,13	20	798,5	18	2083,25	22	2401,27	17,02
6	957,1	36	1316,31	28,4	2672	27,65	2560,85	34,12
7	1011,85	37	1741,45	32,81	3102,2	30,2	3383,74	46
8	1137,02	46,33	2030,12	50,4	4102,65	48,2		
9	2786,75	52,57	2327	62				
10	3521,05	90,56						

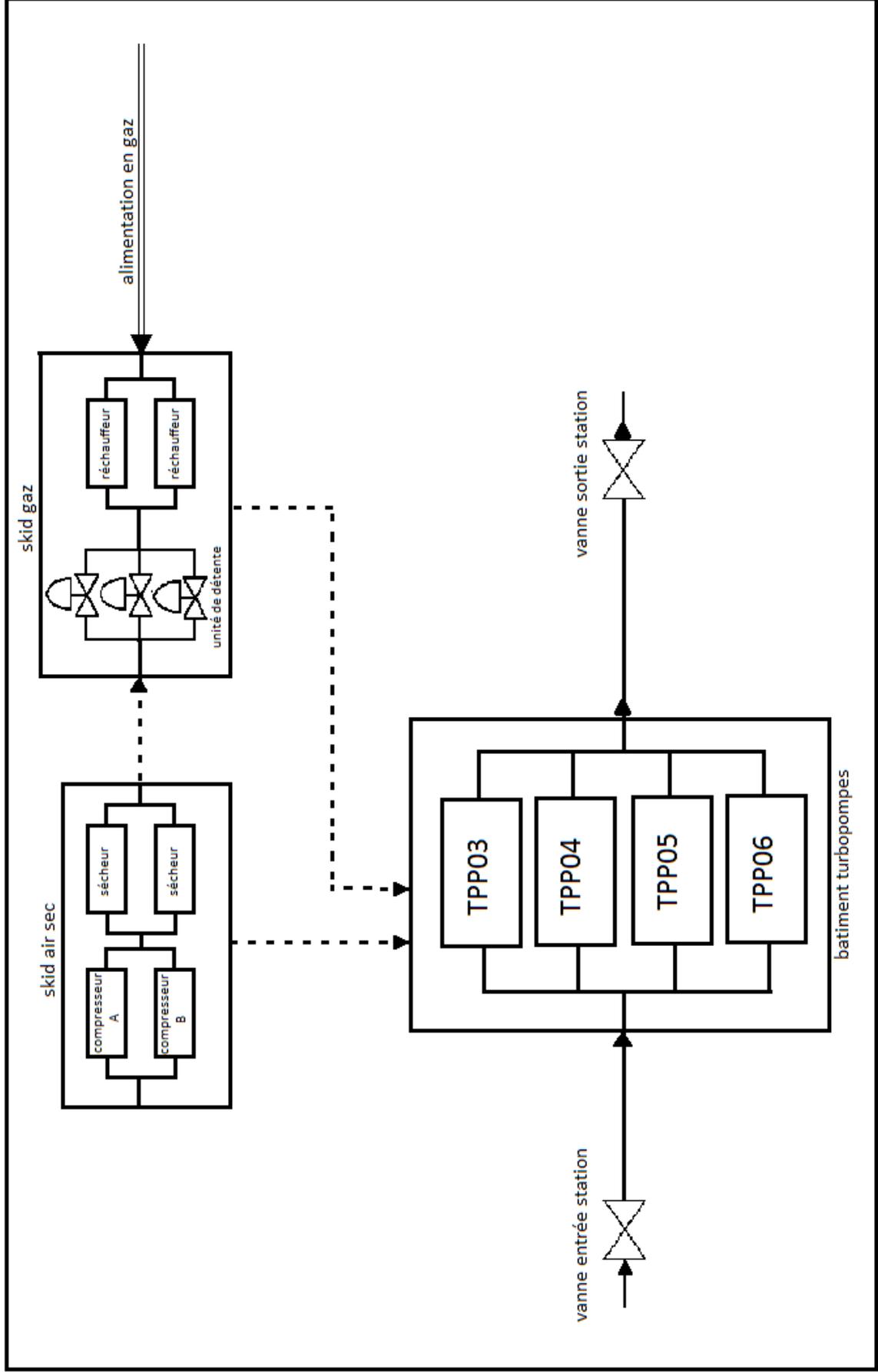
SP03								
Nombre de panne	TP 303		TP 304		TP 305		TP 306	
	TBF	TTR	TBF	TTR	TBR	TTR	TBF	TTR
1	65	5	132,2	5,5	30	3,1	694,32	5
2	625,55	13	269,1	1	79,45	6	912,74	8,1
3	740,2	18,5	556	12,5	292,05	5,7	955,74	24,7
4	1265,5	24,2	444,25	13	386,45	8	1208,58	29
5	1498,35	28	525,05	19	410	13,4	2346,65	43,5
6	2122,1	34,8	1194,5	21,3	976,35	15	2196,05	51
7	3005,55	61,7	1590	25,5	1502,1	25	3740,51	54,8
8			2444,25	41	1555,15	31,2		
9			2843,15	78,5	1735,45	35,4		
10					1801,1	38		
					1790,5	51,3		

SP04								
Nombre de panne	TP 403		TP 404		TP 405		TP 406	
	TBF	TTR	TBF	TTR	TBR	TTR	TBF	TTR
1	53,2	5	132,2	8	20	2,1	717	7
2	674,55	6,6	269,1	11,5	79,45	7,15	1168,05	12
3	755,2	15	370,5	12	292,05	9	1735,45	16
4	1299,25	20,4	444,25	14,2	386,45	10,5	1750,1	24
5	1498,35	28,7	525,05	16	409,5	13	1832,3	26
6	2112,1	38,2	1194,5	24	715,58	15	2146,4	30,4
7	3165,55		1598,1	41,3	856,35	27	2196,05	42
8			2644,25	55,3	1008,25	36	3780,05	50,5
9			2843,15	79	1502,1	47,6		
10					2155,15	60		

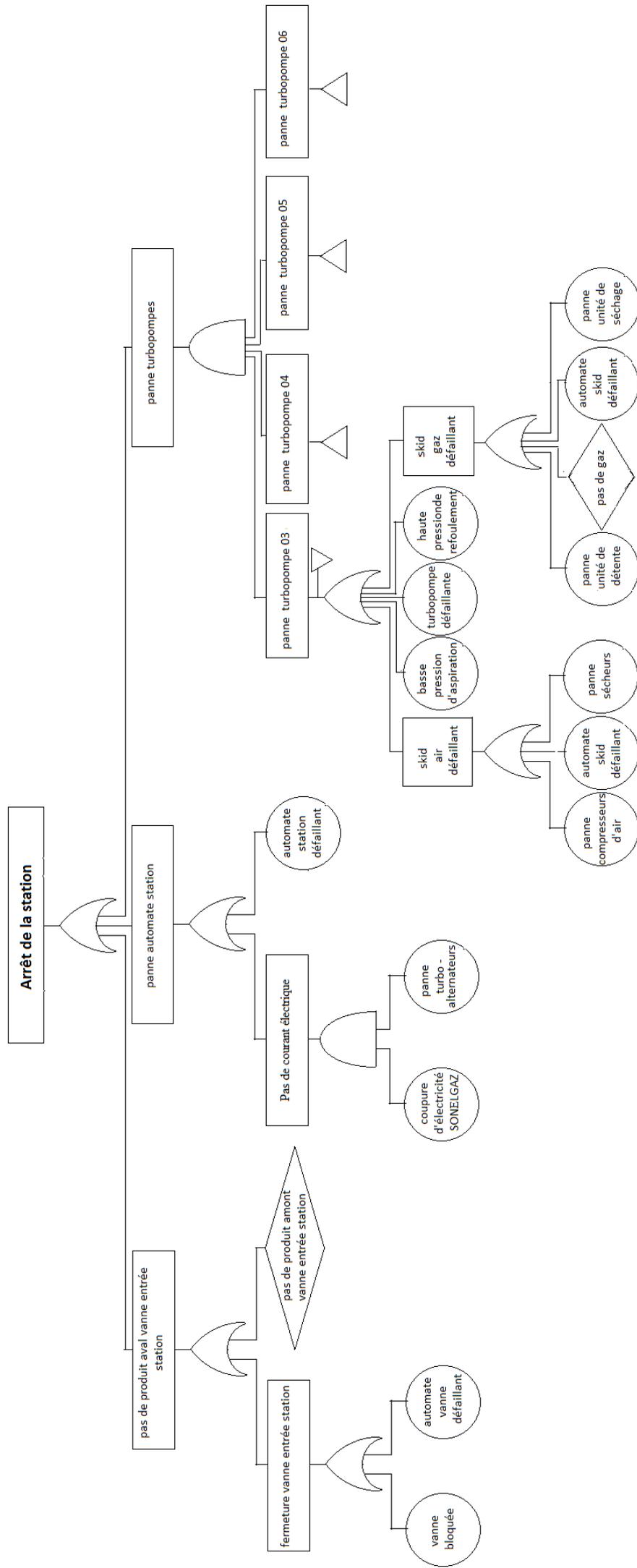
SP05								
Nombre de panne	TP 503		TP 504		TP 505		TP 506	
	TBF	TTR	TBF	TTR	TBR	TTR	TBF	TTR
1	82	0	200	2	402,35	8	234,25	6
2	236,25	3	558,5	3	461,1	9	541,26	7
3	241,25	5	597,5	5	874,51	14	943	10
4	361,3	4	734	6,1	1575,05	15	1986,3	15
5	485,3	9	765,25	8	2043,55	22	2068,2	16
6	557,3	9	1000,84	11	2782,25	36	2475	17
7	1001,35	26	1278,2	28,4	2998,2	77	2998,4	154
8	1097,2	30	1737,25	64				
9	2876,35	38	1999,45	80				
10	4350,05	45	3699,5	108				

SP06								
Nombre de panne	TP 603		TP 604		TP 605		TP 606	
	TBF	TTR	TBF	TTR	TBR	TTR	TBF	TTR
1	130	2,5	179,15	2	251	4,45	369	2,5
2	417	3,5	236,2	2	429,2	7,5	698,7	5,4
3	729,2	6	562	8,3	942,58	9	709,2	5
4	800,25	18,6	660,5	11,5	1402,65	11,5	844	11,2
5	1280,3	24,5	954,28	17	1588	15,45	1273,88	13
6	1420,55	33	1174,87	19,3	1746	28,7	1356,31	22,6
7	1994,5	55	1350,44	21	2592,4	42	1520,3	29
8			1872,84	36	2856,73	44	1865	33,2
9			2144	43	3168,8	51,3		
10					3842	90		

Annexe 03



Annexe 04



Annexe 05

