

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA- BOUMERDES-
FACULTE DES HYDRAUCARBURES ET DE LA CHIMIE



Département Transport et Equipements Des Hydrocarbures

Mémoire de Fin D'études
En vue de l'obtention Du diplôme de
MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Génie mécanique : transport et distribution des hydrocarbures

THEME

**EVALUATION DES PERFORMANCES DE
L'OLEODUC OH2 PAR LA TECHNIQUE DES
RNA**

Réalisé par :

-M^{elle} ABDERREZAK HADJER

- M^{elle} GHEDIA SOUMIA

Soutenu publiquement le 13/06/2016

Devant le jury :

Président de jury : Mr BOUALI ELAHMOUNE

Encadreur : Mr TIKOBAINI MOURAD

Examineur : Mr YOUNSI KARIM

Examineur : Mr HARHOUT RIAD

Professeur

MA/A

MC/B

MA/B

Année Universitaire : 2015/2016

REMERCIEMENTS



*En entrée à ce mémoire, nous tenons à remercier et glorifier **ALLAH** le tout puissant pour nous avoir donné la vigueur et la potentialité de parfaire notre parcours de vie éducative.*

*On remercie tout d'abord **M^r TIKOBAINI.M**, professeur à la faculté des Hydrocarbures et de la Chimie de Boumerdes, pour avoir accepté d'assurer l'encadrement de notre thème de mémoire, grâce à son soutien scientifique et moral et grâce à son aide, on a pu la mener à bien.*

*On exprime nos profonds remerciements à **M^r BOURERSA.M**, encadreur de ce thème au niveau de SONATRACH, pour son aide précieuse, sa confiance, ses encouragements, sa patience et son soutien favorable pour l'aboutissement de ce travail.*

*Nous tenons à remercier les enseignants qui nous ont formés au cours de notre cursus universitaire et en particulier les professeurs de département Transport et Distribution des Hydrocarbures (**M^r CHEBOUBA.A** et **M^r YOUNSI.K**).*

Sans oublier à remercier les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter le jugement de notre travail.

Un grand merci pour tout le personnel de la société SONATRACH, Direction de Transport par Canalisation TRC pour leurs aides et leurs gentillesse.

Nos remerciements vont également à tous nos amis et collègues de la faculté des Hydrocarbures et de la Chimie.

HADJER & SOUMIA

DEDICACES



*C'est avec un grand plaisir et fierté que je
dédie ce mémoire :*

*A celui qui a toujours garni mes chemins avec force et lumière... mon
très cher père ;*

A la plus belle perle du monde... ma tendre mère ;

A ma chère sœur HADJER, je la souhaite tout le succès et le bonheur ;

A toute ma famille ;

*A mon binôme et chère copine HADJER, avec laquelle j'ai partagé les
moments de joie et de déception durant la réalisation de notre
mémoire ;*

A ma très chère copine SABRINA ;

A ceux qui me sont chères et je l'aiment ;

A tous mes amis et mes collègues, promotion 2011.

GHEDIA SOUMIA

DEDICACES



Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie ce mémoire:

*A mon très cher **PÈRE** : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour ma formation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as accordés pour mon éducation tout au long de ces années.*

*A ma tendre **MÈRE** : Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

*A ma très précieuse sœur **MERIEH** : Tu es mon idole chère sœur je te souhaite toute la réussite dans ta vie professionnelle et personnelle, je t'aime beaucoup.*

*A mes frères **MEHDI** & **REDOUANE** : Vous êtes ma source d'inspiration et de volonté merci d'être à mes côtés, je vous souhaite la réussite et le courage dans votre vie.*

*A toute ma famille **ABDERREZAK** & **MESSAOUI**.*

Aux personnes qui m'ont soutenaient, encourageaient et qui étaient présents aux moments les plus difficiles.

*A mes copines **SOUMIA** & **SABRINA** : Pour les sœurs agréables qu'elles étaient et qu'elles resteront pour moi Inchallah.*

A tous les membres de ma promotion. A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études. A tous ceux qui me sont chers et que j'ai omis de citer.

ABDERREZAK HADJER

ملخص:

إن تزايد الطلب على الطاقة كالغاز و البترول يستلزم أكثر فأكثر بناء و إعادة تهيئة خطوط النقل البري للمحروقات. مهما كان المكان الذي يعبره أنبوب نقل المحروقات هذا الأخير معرض دائما لمختلف الأخطار معظمها سببها تآكلات موضعية أو تشققات سببها الصدأ تحت تأثير الضغط. إن إعادة تهيئة أنابيب نقل المحروقات تعتبر عملية جد مكلفة نظرا للمشاريع الضخمة للانجاز، إذن انه لمن الذكاء اتخاذ إجراءات قبلية لتصليحات اقل كلفة، لذلك نهتم في هذه المذكرة بتقييم قدرات أنبوب نقل بري للبترول في حالة متدهورة بسبب الصدأ، ببناء نموذج آلي يسمح بتقدير أولوية تصليح العيوب المكتشفة، للوصول إلى هدفنا اتباعنا تقنية :

(Réseaux de neurons artificiels).

كلمات مفتاحية: أنبوب نقل المحروقات؛ الضغط؛ شبكة العصب؛ الصدأ.

Résumé :

L'augmentation de la demande d'énergie telles que le gaz et le pétrole nécessite de plus en plus la construction et la réhabilitation des lignes de pipelines. Quel que soit l'endroit que le pipeline traverse, ce dernier est toujours exposé aux différents risques, la plupart de ces derniers sont causés par les piqures de corrosion ou par des fissurations de corrosion sous contraintes. La réhabilitation des pipelines est considérée comme opération très coûteuse en raison des projets énormes à réaliser, donc sa sera intelligent de prévoir des réparations moins couteuses pour cela on s'intéresse dans ce mémoire d'évaluer les performances d'un oléoduc dégradé par l'effet de la corrosion en construisant un modèle informatisé permettant de juger la criticité des défauts détectés selon la propriété de réparation de ces derniers, pour atteindre notre but, on a opté pour la technique des réseaux de neurones artificiels.

Mots clés : Pipeline ; Pression ; Réseau de neurone ; Corrosion.

Abstract:

The raise of demand for energy as gas and oil needs more and more construction and rehabilitation of pipelines lines. Whatever is the place the pipeline crosses, it's always exposed to different risks, and most of these risks are caused by stings of corrosion or cracks of corrosion under duress. The rehabilitation of pipelines is considered as an expensive operation because of enormous projects to accomplish, so it would be smart to provide reparations less expensive, therefore, in this thesis we're interested to evaluate the performances of a pipeline damaged by effects of corrosion, using a computerized model which allows us to judge the defects detected critically depending on the property of reparation of the latter, to reach our aim, we opted for the technique of artificial neural networks.

Keywords: Pipeline; Pressure; Neural network; Corrosion.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	----------

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES PIPLINES

I.1 Introduction.....	2
I.2 Qu'est-ce qu'un pipeline ?	3
I.3 Composants d'un pipeline.....	3
I.4 Classification des pipelines.....	4
I.5 Caractéristiques d'un pipeline.....	4
I.6 Comment fonctionne un pipeline ?	7
I.7 Défaillances et anomalies dans un pipeline	8
I.7.1 Défaillance mécanique.....	8
I.7.1.1 Les ruptures.....	8
I.7.1.2 Fragilité	9
I.7.1.3 Fissuration.....	9
I.7.1.4 Déformation plastique.....	9
I.7.2 Défaillance physique.....	9
I.7.2.1 Vieillessement physique	9
I.7.3 Défaillance due à la corrosion.....	10
I.7.3.1 Définition de la corrosion	10
I.7.3.2 Types de corrosion.....	10
I.8 Protection contre la corrosion	11
I.8.1 Revêtements.....	11
I.8.1.1 Revêtements métalliques	11
I.8.1.1.1 Revêtement anodique.....	11
I.8.1.1.2 Revêtement cathodique	11
I.8.1.2 Revêtements non métalliques	12
I.8.1.2.1 Types des revêtements non métalliques.....	12
I.8.1.2.1.1 Revêtement polymérique	12
I.8.1.2.1.2 Les peintures	12
I.8.1.2.1.3 Revêtement en bitume	12

I.8.1.2.1.4 Les inhibiteurs.....	12
I.8.2 Critères des revêtements des conduites	13
I.8.3 La protection cathodique	13
I.9 Contrôle et inspection	14
I.9.1 Inspection des canalisations.....	14
I.9.2 Méthodes d'inspection des canalisations	14
I.9.2.1 Examen visuel.....	14
I.9.2.2 Contrôle non destructif par outils intelligents.....	14
I.9.2.2.1 Les outils de configuration « kalliper pig »	15
I.9.2.2.2 Les outils de détection de perte de métal.....	15
I.9.2.2.2.1 La fuite de flux magnétique MFL	15
I.9.2.2.2.2 Les ultrasons (UT)	16
I.10 Le nettoyage des conduites	16
I.10.1 Outils de nettoyage rigides	17
I.10.2 Outils de nettoyage élastique	17
I.10.3 Les hybrides	18
I.11 La réhabilitation des pipelines	18
I.11.1 Normes de calcul d'un pipeline corrodé	18
I.11.2 La norme DNV PR-F101	20
I.11.2.1 Les défauts isolés	21
I.11.2.2 L'interaction entre les défauts.....	22

CHAPITRE II : LES RESEAUX DE NEURONES

II.1 Introduction	24
II.2 Historique	25
II.3 Le neurone biologique	25
II.4 Le neurone artificiel.....	26
II.4.1 Représentation mathématique :.....	26
II.5 La fonction d'activation.....	27
II.5.1 La fonction à seuil :.....	28
II.5.2 La fonction linéaire par morceaux :	28
II.5.3 La fonction sigmoïde :	28

II.6 Analogie entre le neurone biologique et formel	29
II.7 Bases de fondation des réseaux de neurones	29
II.8 Les réseaux de neurones	30
II.9 Différents types des réseaux de neurones.....	31
II.9.1 Réseaux à une seule couche	31
II.9.1.1 Perceptron	31
II.9.2 Réseaux multicouches	33
II.9.2.1 Réseau de Kohonen	33
II.9.2.2 Réseau d'Hopfield.....	34
II.9.2.3 Le perceptron multi couche	34
II.10 L'apprentissage.....	35
II.11 Les types d'apprentissage.....	35
II.11.1 L'apprentissage supervisé	35
II.11.2 L'apprentissage non supervisé	36
II.12 Les algorithmes d'apprentissage	36
II.12.1 L'algorithme de rétro propagation :.....	36
II.12.2 L'algorithme de BFGS :.....	37
II.13 Architecture des réseaux de neurones	37
II.13.1 Réseaux de neurones non bouclés (feed-forward) :.....	37
II.13.2 Réseaux de neurones bouclés (feed-back) :.....	38
II.14 Étapes de construction d'un réseau de neurones	39
II.15 Avantages et inconvénients des réseaux de neurones	39
II.15.1 Avantages	39
II.15.2 Inconvénients :.....	39

CHAPITRE III : L'OLEODUC OH2 26''

III.1 Introduction	40
III.2. Description du réseau de transport de pétrole brut.....	40
III.3 Description du STC OD1/OD3/OH2 « El Borma – Rhourd El Baguel – Mesdar – Haoud El Hamra»	41
III.4 Description de l'oléoduc OH2« Mesdar – Haoud El Hamra»	42
III.4.1 Tracé de l'oléoduc OH2.....	42
III.4.2 Caractéristique de l'oléoduc OH2.....	43

III.4.3 Postes de sectionnement.....	43
III.4.4 Terminal départ Mesdar	44
III.4.5 Parc de stockage.....	44
III.4.6 Station de pompage.....	45
III.4.7 Protection cathodique	46
III.5 Caractéristiques de l'acier X52	46
III.5.1 Propriétés chimique	46
III.5.2 Propriétés mécaniques.....	47
III.6 Inspection de la ligne OH2.....	47
III.6.1 Technique de détection des défauts	48
III.6.2 Résultats d'inspection.....	49

CHAPITRE IV : EVALUATION DES PERFORMANCES DE L'OH2

VI.1 Problématique	50
IV.2 Partie I : Evaluation des performances de la ligne lors de sa capacité de design	50
IV.2.1 Détermination des pressions d'opération.....	50
IV.2.2 Résultats de la simulation hydraulique 1	52
IV.2.3 Détermination des pressions réduites (norme DNV)	54
IV.2.4 Résultats de calcul des pressions réduites (norme DNV).....	55
IV.3 Présentation de l'approche « Réseau de neurones »	56
IV.3.1 Architecture du réseau.....	56
IV.4 Application et construction du modèle	56
IV.4.1 Collecte et génération des données.....	56
IV.4.2 Entraînement du réseau.....	57
IV.4.2.1 Résultats d'entraînement	59
IV.4.3 Test et simulation du réseau « Net1 »	63
IV.4.3.1 Résultats de la simulation 1	64
IV.5 Résultats des performances de la ligne (Partie I).....	65
IV.6 Partie II : Evaluation des performances de la ligne après déclassement.....	66
IV.6.1 Détermination des pressions d'opération.....	66
IV.6.2 Résultats de la simulation hydraulique 2	66
IV.6.3 Résultats de calcul des pressions réduites (norme DNV).....	68
IV.6.4 Résultats de la simulation 2	69

TABLE DES MATIERES

IV.7 Résultats des performances de la ligne (Partie II).....	70
IV.8 Conclusion	71
CONCLUSION GENERALE	72
RECOMMANDATIONS	73
ANNEXES	
BIBLIOGRAPHIE	

LISTE DES TABLEAUX

Tab. I.1 Valeurs des constantes k_1 et k_2 (hydrocarbures liquides).....	6
Tab. I.2 Valeurs des constantes k_1 et k_2 (gaz).....	6
Tab. I.3 Diamètres et épaisseurs normalisés.....	6
Tab. I.4 Composition chimique typique d'acier du pipeline.....	7
Tab. I.5 Propriétés mécaniques des aciers.....	7
Tab. III.1 Capacité de stockage du parc de stockage Mesdar.....	44
Tab. III.2 Les caractéristiques de la station de pompage Mesdar.....	45
Tab. III.3 Paramètres d'exploitation de l'OH2.....	45
Tab. III.4 Les débits usuels de l'OH2.....	46
Tab. III.5 Propriétés chimique de l'acier X52(tube PSL1 ET PSL2).....	46
Tab. III.6 Propriétés mécaniques de l'acier X52(tube PSL1 ET PSL2).....	47
Tab. IV.1 Données de calcul hydraulique (Partie I).....	52
Tab. IV.2 Résultats de simulation hydraulique (Partie I).....	53
Tab. IV.3 Résultats de calcul de norme DNV.....	55
Tab. IV.4 Base de données 1 « Entraînement ».....	58
Tab. IV.5 Résultats d'entraînement.....	61
Tab. IV.6 Base de données 2 « Test ».....	63
Tab. IV.7 Résultats de simulation par Net1 (Partie I).....	64
Tab. IV.8 Données de calcul hydraulique (partie II).....	66
Tab. IV.9 Résultats de simulation hydraulique (Partie II).....	67
Tab. IV.10 Résultats de calcul de norme DNV.....	68
Tab. IV.11 Résultats de simulation par Net1 (Partie II).....	69

LISTE DES FIGURES

Fig. I.1 Un pipeline.....	3
Fig. I.2 Composants d'un pipeline.....	5
Fig. I.3 Rupture d'un pipeline.....	8
Fig. I.4 Vieillissement physique « endommagement ».....	10
Fig. I.5 Aspects de corrosion.....	11
Fig. I.6 Outils de détection de perte de métal « MFL ».....	15
Fig. I.7 outils de détection de perte de métal « UT ».....	16
Fig. I.8 Outils de nettoyage rigide.....	17
Fig. I.9 Outils de nettoyage « forme de piston ».....	17
Fig. I.10 Outils de nettoyage « forme de sphère ».....	18
Fig. I.11 Défaut isolé.....	21
Fig. I.12 Défaut combiné.....	22
Fig. I.13 Interaction des défauts combinés.....	23
Fig. II.1 Représentation schématique d'un neurone biologique.....	26
Fig. II.2 Représentation schématique d'un neurone formel.....	27
Fig. II.3 Différents types des fonctions d'activation pour le neurone artificiel.....	27
Fig. II.4 Architecture d'un réseau de neurone.....	30
Fig. II.5 Réseau à une seule couche.....	31
Fig. II.6 Schéma d'un perceptron.....	31
Fig. II.7 Schéma de classification.....	33
Fig. II.8 Structure d'un réseau de Kohonen à 2 entrées et 5 neurones concurrents.....	33
Fig. II.9 Structure d'un réseau de Hopfield.....	34
Fig. II.10 Architecture du perceptron multi couche.....	34

LISTES DES FIGURES & DES TABLEAUX

Fig. II.11 Réseaux de neurone non bouclés.....	37
Fig. II.12 Réseaux de neurones bouclés.....	38
Fig. III.1 Carte de réseau du transport de pétrole brut.....	41
Fig. III.2 Schéma descriptif du système de transport par canalisation (OD1, OD3, OH2).....	42
Fig. III.3 Le profil hydraulique de l'OH2.....	43
Fig. III.4 MagneScan RH.....	47
Fig. III.5 Principe de fonctionnement de magnescan RH.....	48
Fig. III.6 Résultats d'inspection de l'OH2 sous forme d'histogramme.....	49
Fig. IV.1 Profil en long communiqué par SH – Profil en long d'interpolation.....	51
Fig. IV.2 Réseau de neurones « Net1 »	59
Fig. IV.3 Performances du réseau « Net1 ».....	59
Fig. IV.4 Regression du « Net1 ».....	60
Fig. IV.5 Représentation de pourcentage de points de corrosion selon la priorité de réparation.....	65
Fig. IV.6 Courbe de la pressions (PMS, P_{op} et P_{red}) au long de la conduite.....	65
Fig. IV.7 Représentation de pourcentage de points de corrosion selon la priorité de réparation.....	70
Fig. IV.8 Courbe de la pressions (PMS, P_{op} et P_{red}) au long de la conduite.....	70

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'acheminement des hydrocarbures : pétrole brut, gaz naturel et gaz liquéfiés est considéré comme étape charnière dans la chaîne de l'industrie pétrolière, elle constitue le maillon intermédiaire entre l'amont : zones de production et l'aval : centres de distribution et de consommation, pour cela des pipelines, des navires citernes, des camions citernes et des wagons citernes sont utilisés.

Parmi les modes de transport cités ci-dessus, on opte pour celui par canalisation. Un pipeline présente de nombreux avantages par rapport aux autres moyens : massivité de transport (60 million de litre/jours), haut degré de sécurité (moins de deux incidents pour 10 000 km de pipeline par an), sûreté d'approvisionnement (fonctionne 24h/24h tous les jours de l'année) et coût minimal (en comparant les coûts moyens par tonne et pour 100 km : pipelines : 1.8 à 2.1 €, train : 2.7 €, barge : 2.7 à 4.1€, camion : 4.1€).

Bien que ses bienfaits, le pipeline en service est exposé à plusieurs contraintes (défaillances mécanique, fragilité, pertes de métal, déformations géométriques ...) qui perturbent son fonctionnement optimal, parmi ces derniers, nous citons la corrosion : considérée comme facteur très important qui influe sur la rentabilité des pipelines, des coûts énormes sont dirigés annuellement à l'atténuer.

Les canalisations dont le matériau constructif le plus répandu est l'acier non allié sont particulièrement exposées à la corrosion, soit de leur environnement (comme pour les tubes enterrés), soit de leur fonction (transport de fluides corrosifs).

L'ouvrage OH2 est l'un des pipelines Algériens assurant le transport de pétrole brut vers les champs de distribution (en particulier HEH), ce pipeline était victime du phénomène de corrosion qui a dégradé son état. L'objectif de notre travail est la réalisation d'une étude appréciative qui met le fonctionnement de cette ligne (capacité de design /capacité actuelle) en question, cela est établi après détérioration de l'état de la canalisation (inspection réalisée en 2001).

Les pertes de métal obligent les opérateurs à diminuer la pression de service pour éviter les ruptures au niveau du pipeline. Afin de rétablir cet obstacle, il y a recours à une opération d'inspection en ligne qui permet : l'analyse de l'état de la canalisation en classifiant les défauts selon la criticité de priorité de réparation.

Vue que les objectifs de l'industrie sont devenus de plus en plus compliqués, dans le sens à chercher d'accomplir le but visé par le minimum d'efforts possible. On a recours à utiliser la technique des réseaux de neurones artificiels pour modéliser le problème et classifier les défauts de corrosion sur la ligne de l'OH2 selon la criticité de réparation de ces derniers.

Les résultats attendus à la fin de notre étude est d'approuver un modèle informatisé des réseaux de neurones permettant de juger la priorité de réparation des défauts de corrosion sur un pipe, et d'examiner les performances de l'ouvrage OH2 affecté par la corrosion.

I.1 Introduction

Les zones de production sont le plus souvent éloignées des zones de consommation. Pour acheminer le pétrole d'une zone à l'autre, deux modes de transports principaux sont utilisés : l'oléoduc (ou pipeline) et le pétrolier par voie maritime.

Un oléoduc (du latin oleum : « huile » et ducere : « conduire ») est une canalisation destinée au transport du pétrole. Il est souvent désigné par l'anglicisme plus général pipeline. Mais le terme « Pipeline » englobe aussi bien les oléoducs que tous les autres tubes de transports de liquides (comme les aqueducs pour l'eau) ou de gaz (comme les gazoducs pour le gaz naturel).

Dans ce chapitre nous allons présenter ces ouvrages de tous ce qui les concernent : classification, caractéristiques, défaillances et anomalies.

Due à leur exposition à des hautes pressions ils sont irritables aux différents types de défaillances, en particulier la corrosion, le passage d'un piston instrumenté à l'intérieur d'une canalisation en acier mesure l'épaisseur de métal de celle-ci, tout au long et sur toute la circonférence. Il peut ainsi détecter des pertes de métal, en fournissant les dimensions de ces derniers, ainsi que leur position, afin de pouvoir juger la criticité de ces défauts, plusieurs normes de calcul ont été établis, on cite parmi : l'ASME B31G, l'ASME B31G modifiée et la DNV PR-101, cette dernière est adaptée ensuite dans la partie calcul.

I.2 Qu'est-ce qu'un pipeline ?

Le terme pipeline s'applique spécifiquement aux systèmes de canalisations à haute pression (jusqu'à 100 bars) utilisés pour le transport à moyenne et grande distance des hydrocarbures liquides et gazeux, permet l'échange de produits entre raffineries, dépôts pétroliers et installations portuaires.

C'est aux États-Unis en 1865 que fut utilisée, pour la première fois, une conduite pour évacuer la production d'un gisement. Depuis lors, l'emploi de ce mode de transport des hydrocarbures liquides ou gazeux s'est généralisé, d'abord aux États-Unis, puis dans le reste du monde, son expansion est marquée non seulement par un accroissement des longueurs de canalisations, en exploitation, mais aussi par une augmentation de leurs diamètres.

Sa longueur peut varier de quelques kilomètres à des centaines, voire des milliers de kilomètres. Bien souvent les pipelines sont interconnectés entre eux pour former un réseau parfois très dense, formant une sorte de « toile d'araignée ».



Fig. I.1 : Un pipeline

I.3 Composants d'un pipeline

Le pipeline est avant tout constitué d'un assemblage des tubes soudés bout à bout, revêtus extérieurement voir intérieurement, la plupart du temps enterré dans le sol, à l'intérieur desquels circule le produit à transporter, c'est la différence de pression qui constitue la force motrice nécessaire au déplacement du fluide, les tubes constituant la conduite sont en acier à haute résistance, des études sont en cours pour remplacer l'acier par des matières plastiques armées de fibre de verre. Des pressions élevées apparaissent quelquefois sur certaines parties du pipeline et l'emploi de stations de protection, constituées de soupapes et de réservoirs, est parfois nécessaire pour éviter d'avoir à utiliser des tubes à parois renforcées. De même, des vannes de lignes sont employées pour protéger certaines zones critiques : traversées de rivières, etc.

I.4 Classification des pipelines

On distingue deux types :

A/- Gazoducs, qui sont divisés en deux classes :

- La première renferme les conduites dont la pression de service est de 26 à 100 bars.
- La deuxième classe renferme les conduites dont la pression de service est de 12 à 25 bars.

B /- Oléoducs, on considère quatre classes en fonction de leurs diamètres :

- Première classe : renferme les conduites de diamètre 1000 à 1450 mm ;
- Deuxième classe : renferme les conduites de diamètre 500 à 1000 mm ;
- Troisième classe : renferme les conduites de diamètre 300 à 500 mm ;
- Quatrième classe : renferme les conduites de diamètre est inférieur à 300 mm.

D'autre part, une classification selon la résistance mécanique, la construction, l'exploitation et la sureté de fonctionnement est effectuée, cette dernière consiste à diviser chaque conduite en catégorie de tronçons, les normes françaises fixent pour le transport des hydrocarbures liquides trois catégories de tronçons de conduite :

- Catégorie 1 : tronçons se trouvant à moins de 40 m des agglomérations ou moins de 15 m d'une maison d'habitation ;
- Catégorie 2 : tronçons se trouvant dans une zone inhabitée ;
- Catégorie 3 : tronçons se trouvant dans les autres zones.

De même pour le transport du gaz naturel, les normes françaises fixent trois catégories :

- Catégorie 1 : tronçons se trouvant non proches des agglomérations ;
- Catégorie 2 : tronçons se trouvant à moins de 75 m des agglomérations ;
- Catégorie 3 : tronçons se trouvant dans une zone d'agglomération.

I.5 Caractéristiques d'un pipeline

Un pipeline se caractérise tout d'abord par sa ligne qui est constituée de tubes d'acier pouvant résister à une pression de 100 bars environ. Son diamètre courant est compris entre 6 et 42 pouces (soit 15 cm à 1 mètre), son épaisseur varie de 6.35 à 30mm, la profondeur d'enfouissement dans le sol varie de 0,6 à 1 mètre selon son ancienneté et ses lieux de passages. Les caractéristiques des tubes (diamètre, épaisseur, type d'acier) sont définies par calcul en fonction de plusieurs paramètres tels que : le débit souhaité, le profil du terrain, les zones environnementales traversées, la réglementation en vigueur, etc....

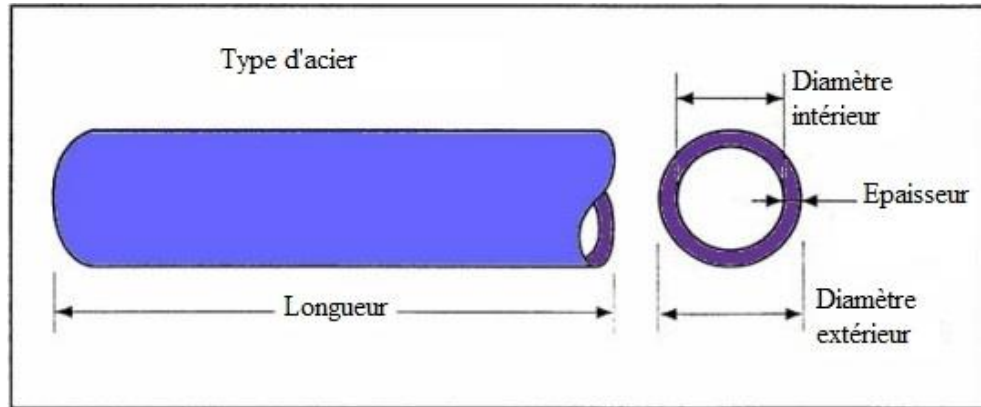


Fig. I.2 : Composants d'un pipeline

Epaisseur

L'épaisseur des parois de la conduite est déterminée suivant les normes en vigueur par l'expression :

$$t = \frac{PMS D_{ext}}{2 [\sigma]} \dots \dots \dots (1) \quad \text{ou :} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{PMS : pression maximale de service ;} \\ D_{ext} : \text{diamètre extérieur ;} \\ [\sigma] : \text{Contrainte admissible ;} \end{array} \right.$$

Les rapports $k_1 = \frac{[\sigma]}{\sigma_e}$ et $k_2 = \frac{[\sigma]}{\sigma_r}$, sont appelés « coefficients de sécurité » et ils sont fixés dans le règlement de sécurité, ici σ_e est la limite d'élasticité du matériau des tubes et σ_r la limite de rupture.

Dans ce cas l'expression (1) peut être présentée sous les formes :

$$t_1 = \frac{PMS D_{ext}}{2 k_1 \sigma_e} \quad \text{et} \quad t_2 = \frac{PMS D_{ext}}{2 k_2 \sigma_r}$$

En général, $k_1 \sigma_e \neq k_2 \sigma_r$, c'est pourquoi certains normes préconisent de calculer t_1 et t_2 et prendre l'épaisseur la plus grande (norme française).

Les valeurs de k_1 et k_2 sont fixées par le règlement en vigueur en fonction de la nature de produit transporté et de la catégorie du tronçon considéré.

Chapitre I : GÉNÉRALITÉS SUR LES PIPELINES

A /- Pour les hydrocarbures liquides et liquéfiés :

Catégorie de la conduite	Produit liquéfié			Produit liquide		
	k ₁ (Conduite enterrée et non enterrée)	k ₂		k ₁ (Conduite enterrée et non enterrée)	k ₂	
		Conduite enterrée	Air libre		Conduite enterrée	Air libre
Cat 1	0.60	0.36	0.36	0.675	0.47	0.44
Cat 2	0.72	0.55	0.44	0.75	0.59	0.44
Cat 3				0.82	0.65	0.65

Tab. I.1 : Valeurs des constantes k₁ et k₂ (hydrocarbures liquides)

B /- Pour les gaz :

Catégorie de la conduite	Produit : gaz naturel		
	k ₁ (Conduite enterrée et non enterrée)	k ₂	
		Conduite enterrée	Air libre
Cat 1	0.73	0.55	0.44
Cat 2	0.60	0.36	0.36
Cat 3	0.50	0.30	0.30

Tab I.2 : Valeurs des constantes k₁ et k₂ (gaz)

Diamètre

Voilà un tableau qui récapitule des valeurs normalisées des diamètres et des épaisseurs d'après la norme API :

Dext normalisés (mm)	Epaisseurs normalisées (mm)													
	6,35	7,14	7,92	8,74	9,52	10,31	11,13	11,91	12,70	14,27	15,88	17,48	19,05	
406,4 (16")	SS	SS	SS	SS	SS	SS	SS	SS	SS					
457,2 (18")	SS	SS	SS	SS	SS	SL	SL	SL	SL					
508,0 (20")	SS	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL					
558,8 (22")	SS	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL					
609,6 (24")	SS	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	L	L			
660,4 (26")	SS	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	L	L	L		
711,2 (28")	SS	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	L	L	L		
762,0 (30")	SS	SS	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	L	L	L		
812,8 (32")	SS	SS	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	L	L	L	L	
863,6 (34")	SS	SS	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	L	L	L	L	
914,4 (36")	SS	SS	SL	SL	SL	SL	SL	SL	SL	L	L	L	L	
965,2 (38")			SS	SS	SL	SL	SL	SL	SL	L	L	L	L	
1016,0(40")			SS	SS	SL	SL	SL	SL	SL	L	L	L	L	
1066,8 (42")				SS	SL	SL	SL	SL	SL	L	L	L	L	
1117,6 (44")				SS	SL	SL	SL	SL	SL	L	L	L	L	
1168,4 (46")				SS	SS	SS	SS	SS	SS					
1219,2 (48")				SS	SS	SS	SS	SS	SS					

Tab. I.3 : Diamètres et épaisseurs normalisés

Type d'acier

Le choix des aciers des tubes est basé sur des caractéristiques chimiques et mécaniques : Composition chimique typique des aciers pour pipelines, norme API :

Grade	C	Mn	Nb	V	C _{eq} max
B	0.06 à 1.2	0.7 à 1	-	-	0.32
X 52	0.06 à 1.2	1 à 1.4	0.03 à 0.05	-	0.4
X 65	0.06 à 1.0	1.3 à 1.6	0.04 à 0.07	0.03 à 0.07	0.42
X 70	0.06 à 1.2	1.45 à 1.65	0.04 à 0.07	0.04 à 0.07	0.42

Tab. I.4 : Composition chimique typique d'acier du pipeline

Propriétés mécaniques des aciers pour tube selon la norme API :

Spécification API	Grade	Limite d'élasticité [kg/mm ²]	Résistance à la rupture [kg/mm ²]
5L	A	21	34
5L	B	25	42
5LX	X42	29	42
5LX	X46	32	45
5LX	X52	37	47
5LX	X56	39	52
5LX	X60	41	55
5LX	X65	46	56
5LX	X70	48	56

Tab. I.5 : Propriétés mécaniques des aciers

Lors du choix des aciers des tubes, on cherche souvent des tubes à valeurs élevées de σ_e ou de σ_r parce que :

- On peut ainsi, à épaisseur constante, augmenter les contraintes de travail ;
- On peut aussi, à contrainte d'utilisation fixée, diminuer l'épaisseur donc le poids des tubes.

I.6 Comment fonctionne un pipeline ?

Le transport de produits impose que la ligne soit toujours pleine (un produit en pousse un autre) et que l'on trouve en sortie des capacités suffisantes pour pouvoir satisfaire le receveur. Lorsqu'un pipeline transporte plusieurs produits différents, il est dit multi produits, les produits se poussent selon des séquences prédéfinies. Celles-ci sont organisées en fonction de la compatibilité et des spécifications des produits transportés (gasoil et fioul domestique, essence Sans Plomb 95 avec essence Sans plomb 98...). Seul le jet ou kérosène ne supporte aucun mélange pour des questions de sécurité.

I.7 Défaillances et anomalies dans un pipeline

Les causes de défaillance des canalisations sont de diverses natures. Elles peuvent se manifester soit par une rupture, soit par une fuite dans les conduites. La plupart de ces défaillances sont causées par des piqures de corrosion ou par des fissurations de corrosion sous contrainte mais, il ne faut pas négliger les agressions mécaniques extérieures. En effet, il arrive que les canalisations soient endommagées ou perforées accidentellement lors des travaux d'excavation par des engins de chantier.

Suivant l'effet de la défaillance, on distingue les types suivants : défaillance mécanique, physique et chimique (due à la corrosion). On classe les défaillances en fonction de leurs :

- Causes (mauvais emploi, faiblesse inhérente, usure corrosion) ;
- Degré (partielle, complète, intermittente) ;
- Vitesse d'apparition (défaillance soudaine et défaillance progressive) ;
- Action (physique, thermique, rayonnement ou par irradiation).

I.7.1 Défaillance mécanique

I.7.1.1 Les ruptures

- Rupture fragile : ou encore rupture par clivage s'accompagne de très peu de déformation plastique. La rupture se produit alors que les déformations sont purement élastiques.
- Rupture ductile : ce mode de rupture est dû à la naissance des cavités (vide) sous l'effet des contraintes et des déformations.
- Rupture par fatigue : c'est la modification des propriétés du métal soumis à des variations d'efforts (vibrations).
- Rupture inter granulaire : c'est la séparation des grains entre eux au niveau des joints qui s'explique par une faible cohésion des joints grain. Cette rupture peut être une : rupture ductile ou fragile.



Fig. I.3 : Rupture d'un pipeline

I.7.1.2 Fragilité

Les métaux fragiles ont une capacité de déformation plastique relativement faible avant la rupture. Cela signifie qu'une pièce fragile soumise à une charge excessive de contraintes peut connaître une défaillance soudaine et potentiellement catastrophique sans allongement initial ou déformation. Moins un métal est ductile, plus il sera fragile.

I.7.1.3 Fissuration

C'est une discontinuité brutale apparue dans un matériau sous l'effet de contraintes internes ou externes, ou la matière est séparée sur une certaine surface, sa propagation, sous l'effet de contraintes suffisantes, combinée ou non avec un environnement agressif (corrosion sous contrainte) mène à la rupture.

I.7.1.4 Déformation plastique

Tout solide auquel est appliqué un effort mécanique se déforme. Tant que le matériau est soumis à une contrainte inférieure à une valeur spécifique (limite d'élasticité), il va se comporter de manière réversible, lors de l'annulation de la charge appliquée (il va reprendre sa forme initiale). A l'inverse, si l'on contraint le matériau au-delà de sa limite d'élasticité, une déformation persiste après la décharge : c'est la déformation plastique.

I.7.2 Défaillance physique

I.7.2.1 Vieillessement physique

- La plastification : elle est caractérisée par une modification des propriétés mécaniques du matériau, qui se traduit par une baisse de température de transition vitreuse, transition entre le domaine caoutchoutique et le domaine viscoplastique.
- Le gonflement : la pénétration de solvant au sein du matériau polymère peut induire un gonflement susceptible de provoquer des modifications de structure interne lorsqu'ils existent des hétérogénéités qui induisent des contraintes entre zones plus ou moins gonflées.
- L'endommagement : l'endommagement sous contraintes peut craquelures ou des fissures dans le matériau.
- La migration d'adjuvants : la migration d'adjuvant se caractérise par la perte des propriétés qu'il devait fournir au polymère.



Fig. I.4 : Vieillesse physique « endommagement »

I.7.3 Défaillance due à la corrosion

I.7.3.1 Définition de la corrosion : La corrosion est la détérioration d'une substance en raison d'une réaction chimique à son environnement. La substance ne doit pas nécessairement être un métal, le bois, la céramique, le plastique et d'autres matériaux peuvent également être corrodés.

I.7.3.2 Types de corrosion : D'un point de vue général et macroscopique, ils existent deux types de corrosion :

Corrosion uniforme ou « généralisée » : affecte la totalité de la structure de métal, n'est pour cette raison préjudiciable que sur le plan de l'esthétique mais ne modifie que très peu les propriétés mécaniques du matériau.

Corrosion localisée : elle est plus dangereuse, car les dégâts qu'elle provoque en profondeur diminuent fortement la résistance du métal, en général, ce type de corrosion se manifeste sur les matériaux qui présentent une hétérogénéité sur leurs surfaces. Parmi les formes de cette corrosion, on distingue les plus rencontrées :

- Corrosion par pique : c'est la forme d'attaque localisée dans laquelle un ou plusieurs points de faible surface sont corrodés avec une pénétration dans la masse du métal.
- Corrosion sélective : elle peut se produire sur les alliages formés des métaux dont la sensibilité à la corrosion est différente.
- Corrosion inter granulaire : ce type de corrosion est caractéristique de la corrosion sous contrainte, elle se manifeste par la progression de fissures perpendiculairement à la contrainte principale.



Fig. I.5 : Aspects de corrosion

I.8 Protection contre la corrosion

I.8.1 Revêtements

Les revêtements des métaux sont souvent appliqués afin d'améliorer la vie de corrosion du métal support, ils peuvent être appliqués pour d'autres raisons : augmenter la résistance à l'usure, une résistance électrique de contact basse, résistance à l'oxydation, et tant d'autres. Les quelques mécanismes qui permettent cette amélioration vont être décrits :

I.8.1.1 Revêtements métalliques

Les métaux sont recouverts d'autres métaux de différentes manières. Pour chaque méthode, ils existent souvent une grande variété de techniques. L'acier peut être traité de toutes les manières possible, par exemple, des pièces en acier peuvent être trempées à chaud dans du zinc ou de l'étain en fusion, ou chauffé avec de la poudre de zinc, on peut aussi les pulvériser. A température élevée, le métal de revêtement se diffuse dans le métal de base, ce qui peut conduire à la formation de phases intermédiaires. Ils existent deux types de revêtements métalliques :

I.8.1.1.1 Revêtement anodique

Le métal protecteur est moins noble que le métal à protéger ($E_{\text{métal à protéger}} > E_{\text{métal protecteur}}$) l'épaisseur est en général comprise entre 100 et 200 μm , ainsi la protection est assurée même en cas de discontinuité du revêtement.

I.8.1.1.2 Revêtement cathodique

Le métal protecteur est plus noble que le métal à protéger ($E_{\text{métal à protéger}} < E_{\text{métal protecteur}}$). La moindre fissure dans le revêtement entraînera l'attaque du métal de base, celui-ci se corrode localement et joue un rôle d'anode, la continuité du revêtement est donc nécessaire pour ce type de revêtement.

I.8.1.2 Revêtements non métalliques

Les revêtements organiques forment une barrière plus ou moins imperméable entre le matériau et le milieu. L'efficacité de protection pour ce type de revêtement repose sur l'absence de défaut, mais en pratique cela est quasi impossible. Ce type de revêtement est appliqué sur les gazoducs et les oléoducs.

I.8.1.2.1 Types des revêtements non métalliques

I.8.1.2.1.1 Revêtement polymérique

On distingue trois types :

- Les thermoplastiques : polyéthylènes, polypropylène, poly vinyle chloré(PVC)
- Les thermodurcissables : polyester, époxy
- Les caoutchoucs : naturels et synthétiques

Les procédés de réalisation de ce type de revêtement sont nombreux à savoir celui à la poudre, au pistolet, par immersion, par laminage mais la réalisation à la poudre reste le plus répandu car il suffit de plonger le métal dans un lit de poudre agité et la poudre se dépose sur le métal. L'efficacité de la protection dépend de leur résistance chimique intrinsèque dans le milieu et de l'absence de défaut. Leur épaisseur est de l'ordre de 100 à 200 microns.

I.8.1.2.1.2 Les peintures

La peinture est une préparation fluide (liquide, pâteuse ou pulvérulente) qui peut s'étaler en couche mince sur toutes sortes de matériaux pour former, après séchage ou réticulation, un revêtement mince. Pour remplir son rôle, le système de peinture doit être adhérent, continu, imperméable et durable dans le temps. En générale, Il faut appliquer au moins deux types de couches :

- Une couche du fond (primaire) qui doit mouiller parfaitement la surface à peindre et y adhérer fortement ;
- Une couche de finition qui doit résister aux chocs mécaniques, thermiques, abrasions etc.

Les peintures contiennent souvent des poudres de zinc ou aluminium, qui agissent comme anodes, ou des pigments (comme le chromate de zinc) qui peuvent jouer le rôle d'inhibiteur.

L'épaisseur totale des couches de peintures est de l'ordre de 100 à 200 μm .

I.8.1.2.1.3 Revêtement en bitume

Le bitume est un produit qui contient différents hydrocarbures appartenant aux résidus de la distillation du pétrole. Il est utilisé pour la protection des conduites en acier et en fonte, grâce à sa plasticité, il permet de réduire considérablement les risques d'endommagement mécanique provoqués lors de la pose et du transport des tubes. L'épaisseur de ce type de revêtement est d'ordre de 5 mm.

I.8.1.2.1.4 Les inhibiteurs

Un inhibiteur de corrosion est un composé chimique (minéral ou organique) ajouté à faible concentration au milieu corrosif qui sert à ralentir le processus de corrosion d'un métal.

Les inhibiteurs de corrosion constituent un moyen de protection contre la corrosion métallique. Ils présentent l'originalité d'être le seul moyen d'intervention à partir du milieu corrosif, ce qui en fait une méthode de contrôle de la corrosion facile à mettre en œuvre et peu onéreuse, la plupart des inhibiteurs de corrosion sont connus par leurs toxicités donc il n'est pas toujours possible de les ajouter à n'importe quel milieu, ils sont généralement utilisés pour le traitement des eaux (eaux de procédés industriels, eaux de chaudières,...), l'industrie du pétrole (forage, extraction, raffinage, stockage,...), pour le décapage/nettoyage des métaux (assurant une protection temporaire du métal).

En général, les inhibiteurs sont classés en fonction de leur mode d'action. On distingue deux types d'inhibiteurs :

A- Les inhibiteurs anodiques (agissant sur la réaction anodique) : Ce sont des composés salins dont l'anion forme avec le métal qui se corrode un produit insoluble se déposant sur la surface. Pour avoir une protection efficace, il faut que l'inhibiteur soit ajouté avec les quantités convenables.

b- Les inhibiteurs cathodiques (agissant sur la réaction cathodique) : Ce sont des sels dont le cation forme sur la cathode des composés insolubles tels que des hydroxydes ou des sels complexes insolubles. Ils isolent la cathode en empêchant l'arrivée de l'oxygène sur sa surface.

Les inhibiteurs cathodiques sont considérés comme plus sûrs que les inhibiteurs anodiques car ils ne risquent pas de favoriser la corrosion localisée (par piqure).

I.8.2 Critères des revêtements des conduites

Le revêtement utilisé pour protéger l'ensemble de la conduite doit englober les critères suivants :

- Imperméabilité à l'eau et à l'oxygène ;
- Adhérence ou cohésion élevée du revêtement à la structure métallique ;
- Résistance : à l'abrasion et à la pénétration sous charge ;
- Résistivité électrique importante ;
- Faible susceptibilité au phénomène d'électro-osmose et résistance au décollement ;
- Inertie chimique et bactériologique de tous les constituants du système de protection ;
- Maintien des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques aux températures extrêmes d'utilisation.

I.8.3 La protection cathodique

L'application de la méthode de la protection cathodique a pour but de diminuer le potentiel de polarisation du métal à un niveau pour lequel la vitesse de corrosion est réduite d'une façon significative. Le seuil de la protection cathodique correspond à l'immunité tel que représente le diagramme de POURBAIX.

Pour modifier le potentiel du métal à protéger cathodiquement on utilise des anodes installées dans le même milieu électrolyte. Ces anodes peuvent être de deux types :

- Les anodes ayant un potentiel plus électro-négatif que le métal protégé (anode galvanique ou sacrificielle).

- Les anodes couplées à un générateur du courant qui impose une différence de potentiel entre les deux métaux (méthode à courant imposé).

I.9 Contrôle et inspection

Les opérations de maintenances effectuées sur une pipe sont de deux types :

- Intervention qui consiste à l'inspection visuelle et à l'inspection par outil intelligent ;
- Réhabilitation qui consiste à des opérations de réparation par chargement et par collage.

I.9.1 Inspection des canalisations

Les décisions de réhabilitation des canalisations reposent essentiellement sur les résultats des inspections suivantes :

- Mesure du potentiel de la protection cathodique ;
- Mesure de résistance du revêtement ;
- Inspection par outils instrumentés.

I.9.2 Méthodes d'inspection des canalisations

I.9.2.1 Examen visuel

Une équipe de contrôleurs expérimentés inspecte toutes les surfaces intérieures et extérieures de la canalisation, ils signalent toutes les anomalies d'aspect ou de forme qui pourront être corrigées. Lors des mesures des pertes d'épaisseurs, il est indispensable de réaliser une inspection visuelle préliminaire afin de fournir un rapport :

- L'état général des surfaces (produit de corrosion, organismes, pollution) ;
- Les désordres (nature, localisation et ampleur) ;
- Le relevé précis des réparations réalisées antérieurement ;
- Les déformations constatées ;

Les inspections visuelles ont leur intérêt sur le terrain, le personnel des pipelines parcourt l'emprise à la recherche de tout indice tel que : les flaques de pétrole ou la modification de l'environnement.

I.9.2.2 Contrôle non destructif par outils intelligents

Les exploitants des pipelines surveillent leur conduite de très près par le biais de diverse technologie d'outils. Ces derniers incluent des racleurs, des outils intelligents ou jauges d'inspection. Ils sont insérés dans la canalisation et la parcourent poussés par le débit du produit transporté. Ils effectuent de diverses mesures à l'intérieur de la conduite en indiquant entre autres les obstructions et les déformations de la conduite, ainsi que la perte de métal. Ces mesures des pertes imposent dans certains cas le remplacement d'un segment de la canalisation.

I.9.2.2.1 Les outils de configuration « kalliper pig »

Les racleurs de contrôle de géométrie sont généralement équipés d'une couronne circulaire déformable qui s'appuie sur la face interne du pipeline. Lorsque celui-ci n'est pas parfaitement circulaire, la couronne se déforme, cette déformation est enregistrée ainsi que la position du racleur et permet, après dépouillement, de localiser et dimensionner les déformations (ovalisation, enfoncement) de la conduite.

I.9.2.2.2 Les outils de détection de perte de métal

Il s'agit de l'usage essentiel des racleurs instrumentés dans un objectif de lutte contre la corrosion. Deux grandes familles d'outils existent à l'heure actuelle s'appuyant sur deux technologies distinctes :

I.9.2.2.2.1 La fuite de flux magnétique MFL

Cette technologie s'appuie sur de puissants aimants placés dans le racleur. Le flux magnétique longitudinal ainsi généré circule dans la paroi de la conduite entre les deux pôles de l'aimant. Il est calibré de sorte à saturer celle-ci et qu'une partie de ce flux circule dans le fluide et à l'extérieur du conduit. Des capteurs sont placés contre la paroi du tube et baignent dans ce flux. Lorsqu'un manque de métal est présent dans la paroi des tubes, le flux magnétique doit s'échapper un peu plus de la paroi pour pouvoir circuler et les capteurs réagissent à cette augmentation de la fuite de flux magnétique (Magnetic Flux Leakage 'MFL'). Réagissant à des évolutions de signaux magnétiques, cette technologie donne un dimensionnement relatif des pertes de métal par rapport à l'épaisseur supposée des tubes.

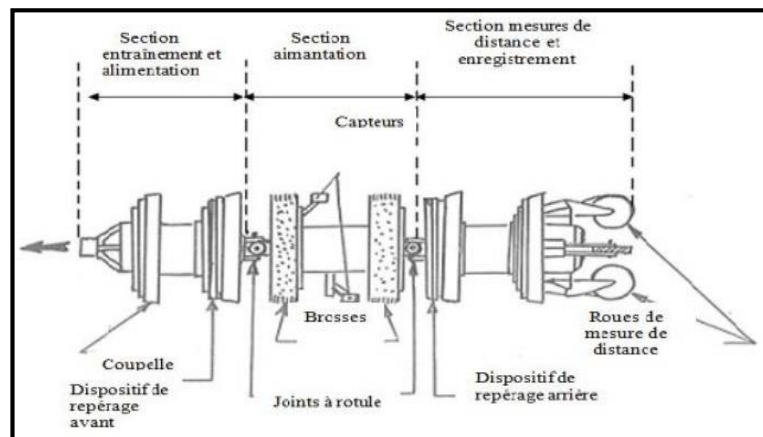


Fig. I.6 : Outils de détection de perte de métal « MFL »

I.9.2.2.2 Les ultrasons (UT)

Cette technologie utilise les temps de parcours d'une onde ultrasonore (perpendiculaire à la surface des tubes) dans le fluide transporté et le métal des tubes pour évaluer la distance entre le capteur et les faces internes et externes des tubes sur lesquelles l'onde se réfléchit partiellement. La différence de ces deux distances permet d'avoir une lecture directe de l'épaisseur du tube mais elle est très sensible à la propreté interne des tubes. Cette technologie nécessite que le fluide transporté puisse transmettre l'onde ultrasonore. Elle est donc inapplicable en milieu gazeux. Ainsi, pour inspecter un pipeline de gaz avec de tels outils, il est nécessaire d'introduire un batch de liquide (eau ou hydrocarbure) dans le pipeline ce qui peut poser de très importants problèmes d'évacuation de ce liquide et de séchage des conduites. Des technologies existent permettant un couplage dit sec pour utiliser les ultrasons en milieu gazeux, mais elles sont complexes, fragiles et relativement peu employées.

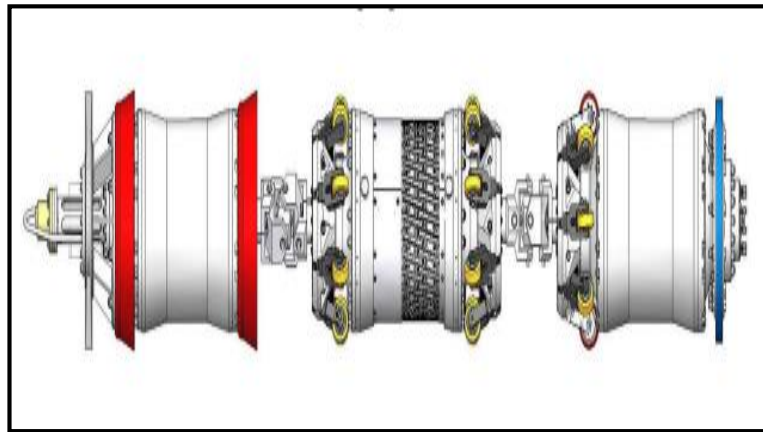


Fig. I.7 : Outils de détection de perte de métal « UT »

I.10 Le nettoyage des conduites

Les pipelines sont nettoyés à intervalles prévus ou lorsque cela est nécessaire pour maintenir le débit en réduisant les frottements et en conservant un diamètre intérieur aussi grand que possible. Un dispositif spécial, appelé «racleur», ou «ramoneur», est introduit dans le pipeline où il est propulsé par le pétrole d'une station de pompage à l'autre. A mesure qu'il avance, il enlève les impuretés, paraffines et autres dépôts accumulés sur les parois. Lorsqu'il atteint une station de pompage, il est récupéré, nettoyé et réintroduit dans la conduite jusqu'à la station suivante. Les outils de nettoyage dit intelligent ou outils conventionnels, peuvent être classés suivant différents critères (forme, matériau, fonction). On distingue deux types :

I.10.1 Outils de nettoyage rigides

Sont composés d'un axe cylindrique le plus souvent en acier sur lequel sont fixés des disques ou des coupelles en caoutchouc synthétique ou en polyuréthane, les matériaux étant connus par leur grande rigidité. Le diamètre des disques ou des coupelles est légèrement supérieur au diamètre intérieur de la conduite. Ces deux aspects permettent un contact et une étanchéité de bonne facture propriétés particulièrement utiles pour le nettoyage de dépôts liquides. Pour plus grande efficacité ces outils sont munis de brosses métalliques.

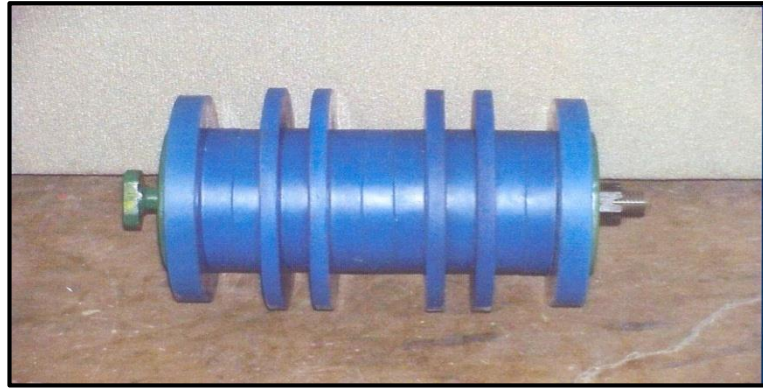


Fig. I.8 : Outils de nettoyage rigide

I.10.2 Outils de nettoyage élastiques

Pour surmonter les inconvénients liés aux outils rigides, il est recommandé d'utiliser les outils élastiques, ces outils sont classés en :

Les outils en forme piston : ont une forme cylindrique allongée. Ils peuvent être en caoutchouc synthétique, en polyuréthane solide ou bien mousse de polyuréthane, ils sont disponibles sous différentes formes mais l'arrière de l'outil possède toujours une forme concave alors que l'avant est profilé.



Fig. I.9 : Outils de nettoyage « forme de piston »

Les outils en forme de sphère : sont les outils plus utilisés pour le nettoyage des dépôts liquides, composés d'une enveloppe en caoutchouc ou en polyuréthane. Leur principal avantage réside dans la facilité de passage des obstacles et la simplicité de leur utilisation.

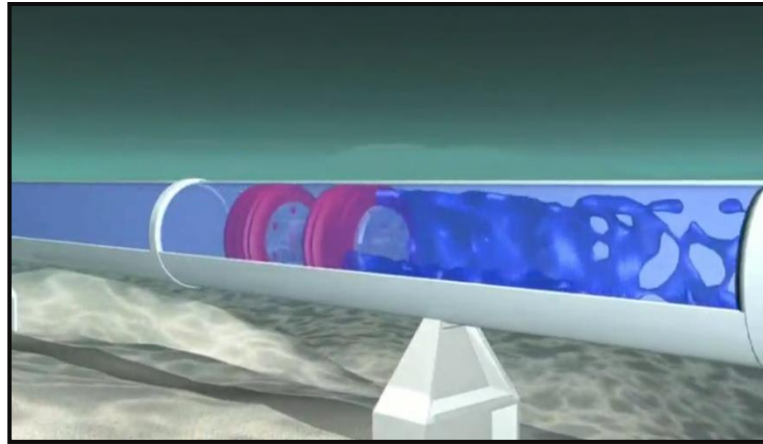


Fig. I.10 : Outils de nettoyage « forme de sphère »

I.10.3 Les hybrides

Sont d'un usage peu répandu, ils ont été introduit pour cumuler les avantages des sphères et des outils rigides (étanchéité supérieur et différence de pression minime). On les trouve dans deux variantes :

- une sphère avec une demi-sphère ;
- une sphère avec deux demi sphère.

I.11 La réhabilitation des pipelines

La réhabilitation est un terme généré qui englobe tous les actions destinés à remettre en état ou améliorer les performances d'une canalisation, plusieurs techniques peuvent être mise en œuvre dans le cadre d'une réhabilitation, on peut les regrouper en trois catégories principales distinctes : le remplacement, la rénovation et les réparations ponctuelles.

I.11.1 Normes de calcul d'un pipeline corrodé

1) **La norme ANSI/ASME B31 G** : Ce code a été développé dans les années 60 au Battelle Memorial Institute (USA) et donne des méthodes semi empiriques pour vérifier la tenue en service de tuyaux corrodés. Les paramètres d'entrée comportent le diamètre extérieur du tuyau (D_{ext}), l'épaisseur (t), la limite d'élasticité minimale requise, la pression de service maximale, l'extension maximale longitudinale de la corrosion et la profondeur du défaut.

Chapitre I : GÉNÉRALITÉS SUR LES PIPELINES

Les formules de calcul de la norme ANSI/ASME B31 G :

La pression maximale de service : $PMS = \frac{2 t k_s \sigma_e}{D_{ext}}$

$$G = 0.893 \frac{L}{\sqrt{D_{ext} t}}$$

On distingue deux cas :

$$G \leq 4$$

Ou

$$G > 4$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{red} = 1.1 PMS \frac{(1 - \frac{A}{A_0})}{(1 - \frac{A}{A_0 M})} \\ \left(\frac{d}{t}\right)_{cr} = \frac{1.1 PMS - P_{op}}{1.1 PMS} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{red} = 1.1 PMS \left(1 - \frac{d}{t}\right) \\ \left(\frac{d}{t}\right)_{cr} = \frac{1.1 PMS - P_{op}}{\frac{2}{3} (1.1 PMS - \frac{P_{op}}{M})} \end{array} \right.$$

Tel que :

t : L'épaisseur de la conduite ;

k_s : Le coefficient de sécurité dépendant la zone ;

σ_e : Limite d'élasticité de l'acier ;

D_{ext} : diamètre extérieur de la conduite ;

A : Aire de défaut ;

A_0 : Aire totale ;

$$\frac{A}{A_0} = \frac{2 d}{3 t} ;$$

M : Facteur de Folias tel que $M = \sqrt{1 + G^2}$;

d : La profondeur maximale du point de corrosion ;

l : La longueur axiale du défaut ;

P_{op} : Pression d'opération.

La P_{red} doit être toujours inférieur à la PMS si ce n'est pas le cas ce qui peut arriver lorsque les défauts sont peu profonds ou les longueurs de corrosion sont faibles. La longueur maximale de la corrosion peut être déterminée par la relation ci-dessous :

$$L = 1,12 \beta \sqrt{D_{ext} t} ;$$

Ou :

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{\frac{d}{t}}{1,1\frac{d}{t}-0,15}\right) - 1} ;$$

2) **La norme ANSI/ASME B31 G modifiée** : Dans le code ASME B31G modifié la contrainte d'élasticité est considérée comme égale à : $(\sigma_e + 10000 \text{ Psi})$, la pression réduite calculée est peu sensible à la forme du défaut utilisé et les résultats sont beaucoup plus conservatifs dans ce cas.

Les formules de calcul de la norme **ANSI/ASME B31 G modifiée** :

La pression maximale de service :
$$PMS = \frac{2 t k_s (\sigma_e + 10000 \text{ Psi})}{D_{ext}}$$

On distingue deux cas :

$$\frac{l^2}{\sqrt{D_{ext}} t} < 50$$

Ou

$$\frac{l}{\sqrt{D_{ext}} t} \geq 50$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M_1 = \sqrt{1 + 0,6275 \frac{l^2}{D_{ext} t} - 0,003375 \frac{l^4}{D_{ext}^2 t^2}} \\ P_{\text{réd}} = \frac{PMS \left(1 - \frac{A}{A_0}\right)}{\left(1 - \frac{A}{A_0 M_1}\right)} \\ \left(\frac{d}{t}\right)_{cr} = \frac{PMS - P_{op}}{0,85 \left(PMS - \frac{P_{op}}{M_1}\right)} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} M_2 = 0,032 \frac{l^2}{D_{ext} t} + 3,3 \\ P_{\text{réd}} = \frac{PMS \left(1 - \frac{A}{A_0}\right)}{\left(1 - \frac{A}{A_0 M_2}\right)} \\ \left(\frac{d}{t}\right)_{cr} = \frac{PMS - P_{op}}{0,85 \left(PMS - \frac{P_{op}}{M_2}\right)} \end{array} \right.$$

Avec $\frac{A}{A_0} = 0,85 \frac{d}{t}$

3) **La norme DNV-RP-F101** : c'est le code le plus complet sur l'acceptabilité des défauts de corrosion dans les tuyaux. Il permet de traiter tous les types de chargement pression interne mais aussi un chargement combiné. Selon le code DNV RP-101, la pression ultime ne doit pas dépasser la pression maximale en service, dans le cas contraire, le tuyau corrodé doit être réparé ou remplacé.

I.11.2 La norme DNV PR-F101

Cette norme donne des recommandations pour l'évaluation des défauts de corrosion au niveau d'un pipeline sujet à une pression interne combinée à des contraintes de compression longitudinale. Elle couvre aussi les défauts simples, les défauts en interaction entre eux ainsi que les défauts ayant des formes géométriques complexes.

La pratique est constituée de deux parties A et B, la partie A prend en considération les erreurs de mesure dans les formules, contrairement à la partie B qui est basée sur l'approche "Allowable Stress Design", cette partie-là qu'on va l'utiliser par la suite dans les calculs.

La pression de rupture ou (failure pressure) prend en considération les dimensions du défaut de corrosion, puis pour avoir la pression réduite (safe working pressure), on multiplie cette pression (P_f) par le facteur d'usage F .

- Le facteur d'usage :

C'est le facteur utilisé pour le calcul de la pression réduite, égale au produit de deux facteurs :

$F_1=0,9$: modeling factor ;

F_2 : facteur de sécurité.

I.11.2.1 Les défauts isolés

La perte de métal est considérée comme un défaut isolé. Les défauts adjacents peuvent produire une pression de rupture inférieure à celle produite par un défaut isolé. Dans le cas où il y a des interactions, la formule de la norme n'est plus valable.

On peut considérer la perte de métal comme un défaut isolé si :

- $\phi > 360 \sqrt{\frac{t}{D_{\text{ext}}}}$ ou ϕ est l'angle circonférentiel séparant deux défauts adjacents.
- $s > 2\sqrt{D_{\text{ext}}t}$ ou s est la distance axiale séparant deux défauts adjacents.

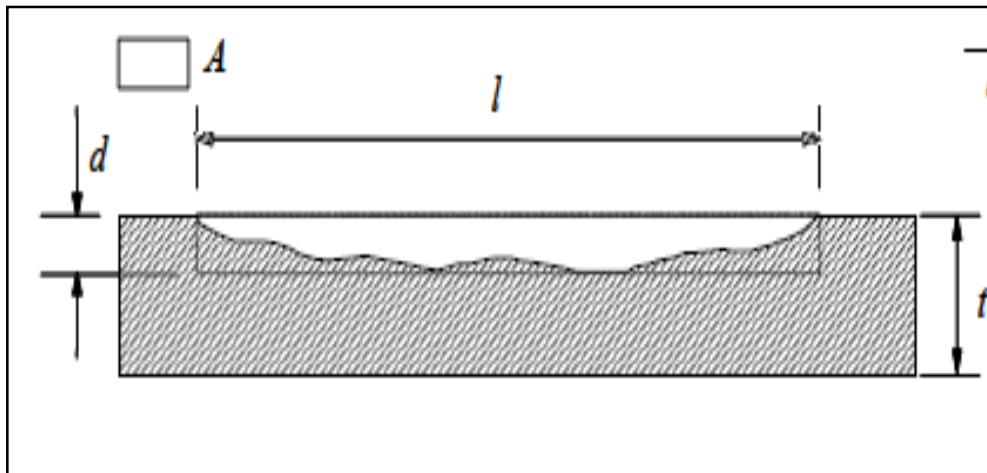


Fig. I.11 : Défaut isolé

- La pression de rupture en tenant compte du défaut de corrosion et sans coefficient de sécurité (Failure pressure) est calculée comme suit :

$$P_f = \frac{2 t \sigma_r}{D_{\text{ext}} - t} \left(\frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{Qt}} \right)$$

Tel que :

$$Q = \sqrt{1 + 0,31 \left(\frac{L}{\sqrt{D_{\text{ext}} t}} \right)^2}$$

- La pression réduite avec coefficient de sécurité (Safe working pressure) :

$$P_{\text{réd}} = F \times P_f$$

d : La profondeur de défaut [mm] ;

t : L'épaisseur de la conduite [mm] ;

D_{ext} : Le diamètre extérieur de la conduite [mm] ;

σ_r : La contrainte de rupture de l'acier [kgf/cm²] ;

F : Le facteur d'usage.

- La perte de métal critique :

$$\left(\frac{d}{t} \right)_{\text{cr}} = \frac{\frac{2tk\sigma_r}{D_{\text{ext}} - t} - P_{\text{op}}}{\frac{2tk\sigma_r}{D_{\text{ext}} - t} - \frac{P_{\text{op}}}{Q}}$$

I.11.2.2 L'interaction entre les défauts

Les règles d'interaction entre les défauts peuvent être utilisées pour savoir si les défauts adjacents interagissent entre eux ou pas, pour cela, il faut connaître au moins :

- La position angulaire de défaut ;
- La distance axiale ;
- Le type de défaut (interne ou externe) ;
- La longueur, la largeur et la profondeur du défaut.

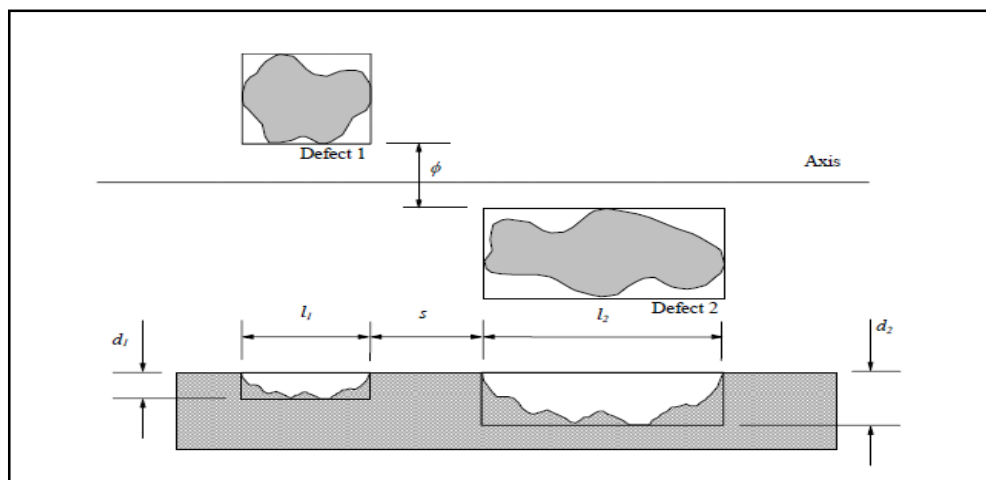


Fig. I.12 : Défaut combiné

- Calcul de la pression réduite du 1^{er} défaut jusqu'au N^{ième} défaut:

$$P_i = \frac{2t\sigma_r F \left(1 - \frac{d}{t}\right)}{D - t \left(1 - \frac{d}{tQ_i}\right)}$$

Tel que $i=1, 2, \dots, N$

$$Q_i = \sqrt{1 + 0,31 \left(\frac{l_i}{\sqrt{D_{ext}t}}\right)^2}$$

l_i : La longueur de chaque défaut.

- La pression réduite combinée du défaut de n à m est calculée comme suit :

$$P_{nm} = \frac{2t\sigma_r F \left(1 - \frac{d_{nm}}{t}\right)}{D_{ext} - t \left(1 - \frac{d_{nm}}{tQ_{nm}}\right)}$$

$$Q_{nm} = \sqrt{1 + 0,31 \left(\frac{l_{nm}}{\sqrt{D_{ext}t}}\right)^2}$$

- La longueur combinée pour tous les défauts :

$$l_{nm} = l_m + \sum_{i=n}^{i=m-1} (l_i + s_i) \quad \text{Tel que } n, m=1, 2, \dots, N$$

- La profondeur effective de défaut combiné :

$$d_{nm} = \frac{\sum_{i=n}^m d_i l_i}{l_{nm}}$$

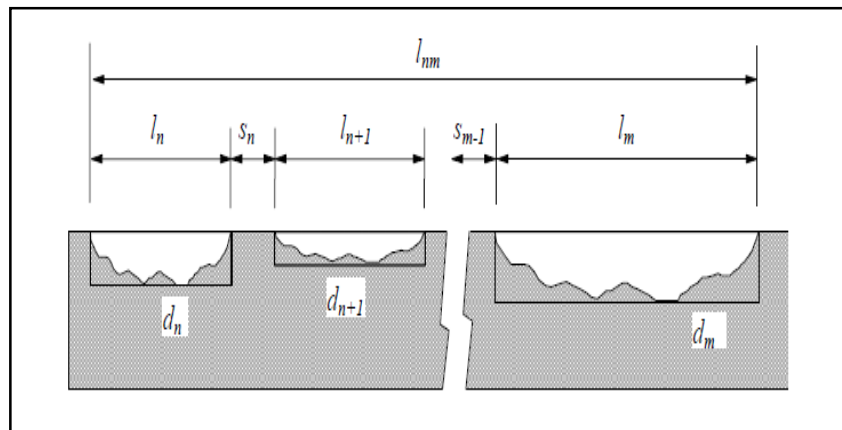


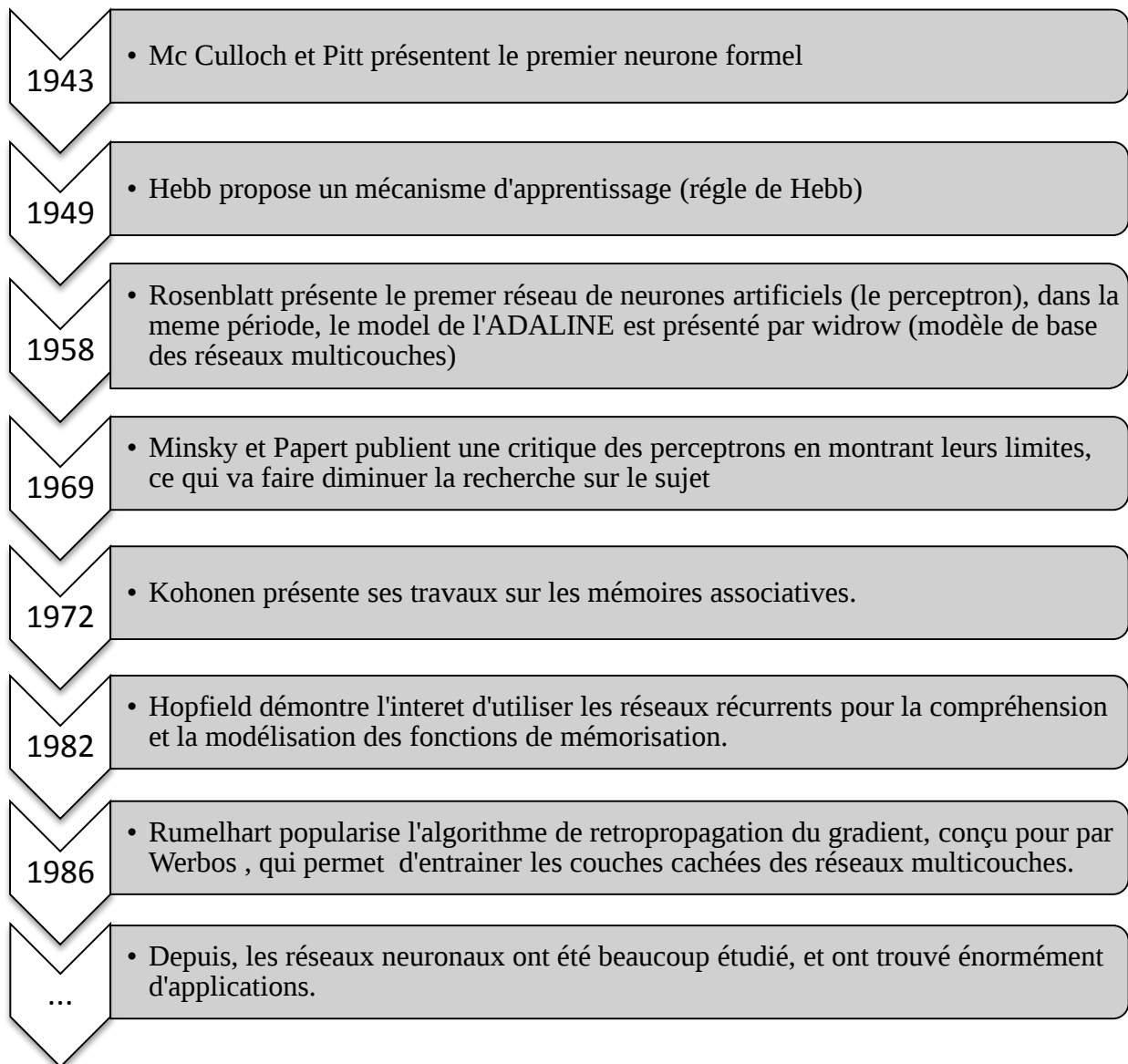
Fig. I.13 : Interaction des défauts combinés

II.1 Introduction

Le datamining est un procédé d'exploitation et d'analyse de grands volumes de données les en rendre compréhensibles. Il permet de découvrir des corrélations significatives en vue de trouver des règles de classement et de prédiction dont la finalité ultime est l'aide à la décision, il consiste aussi de passer des données à la connaissance, il s'agit de fouille visant à découvrir de l'information cachée que les données renferment, il est donc un domaine récent qui se situe à l'intersection des statistiques, de l'apprentissage automatique et des bases de données.

Dans le chapitre suivant, on essayera de présenter une des techniques prédictives, qui est les réseaux de neurones artificiels. Les réseaux de neurones connaissent depuis quelques années, un succès croissant dans divers domaines des sciences de l'ingénieur, ces derniers sont construits sur une architecture semblable, en première approximation, à celle du cerveau humain, ces réseaux de neurones artificiels sont issus de la combinaison entre la neurobiologie comme idées de base, la physique comme champs d'application et les mathématiques et l'information autant que moyens de réalisation.

II.2 Historique



II.3 Le neurone biologique

Le neurone biologique est composé de quatre parties distinctes :

- **Le corps cellulaire**, qui contient le noyau de la cellule nerveuse, c'est en cet endroit que prend naissance l'influx nerveux, qui représente l'état d'activité du neurone;
- **Les dendrites**, ramifications tubulaires courtes formant une espèce d'arborescence autour du corps cellulaire, ce sont les entrées principales du neurone, qui captent l'information venant d'autres neurones;
- **L'axone**, longue fibre nerveuse qui se ramifie à son extrémité, c'est la sortie du neurone et le support de l'information vers les autres neurones;
- **La synapse**, qui communique l'information, en la pondérant par un poids synaptique, à un autre neurone, elle est essentielle dans le fonctionnement du système nerveux.

Dans le cerveau humain, le neurone recueille les signaux des autres à travers les dendrites. Le neurone envoie des pics d'activité électrique à travers l'axone, qui se divise en des milliers de branches. Chaque branche se termine par les synapses qui convertit l'activité de l'axone en compte les effets électriques qui inhibent ou excitent l'activité dans les neurones connectes. Quand un neurone reçoit une entrée excitatrice qui est suffisamment grande par rapport à son entrée inhibitrice, il envoie un pic d'activité électrique vers le bas de son axone.

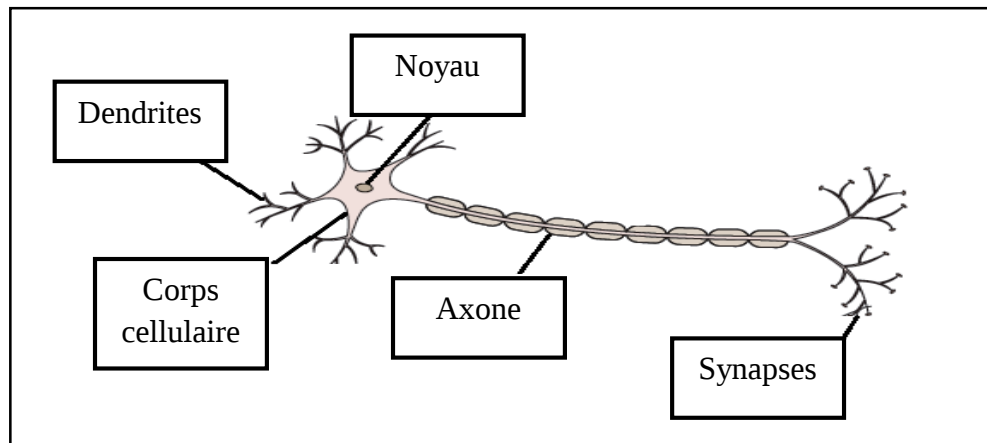


Fig. II.1 : Représentation schématique d'un neurone biologique

II.4 Le neurone artificiel

II.4.1 Représentation mathématique

Les réseaux de neurones formels sont à l'origine d'une tentative de modélisation mathématique du cerveau humain. La modélisation consiste à mettre en œuvre un système de réseau neuronal sous un aspect non pas biologique mais artificiel. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire, il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones en amont ou des capteurs composant la machine dont il fait partie. A chacune de ses entrées est associé un poids représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones en aval. A chaque connexion est associé un poids. Un neurone est donc avant tout un opérateur mathématique, dont on peut calculer la valeur numérique par quelques lignes de logiciel. D'un point de vue mathématique, un neurone formel réalise donc une fonction linéaire.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_p; w_1, w_2, \dots, w_p)$$

Les $\{x_i\}$ sont les entrées, les $\{w_j\}$ sont les poids. Alors que les entrées peuvent être booléennes, binaires (0,1), bipolaire (-1,1) ou réels.

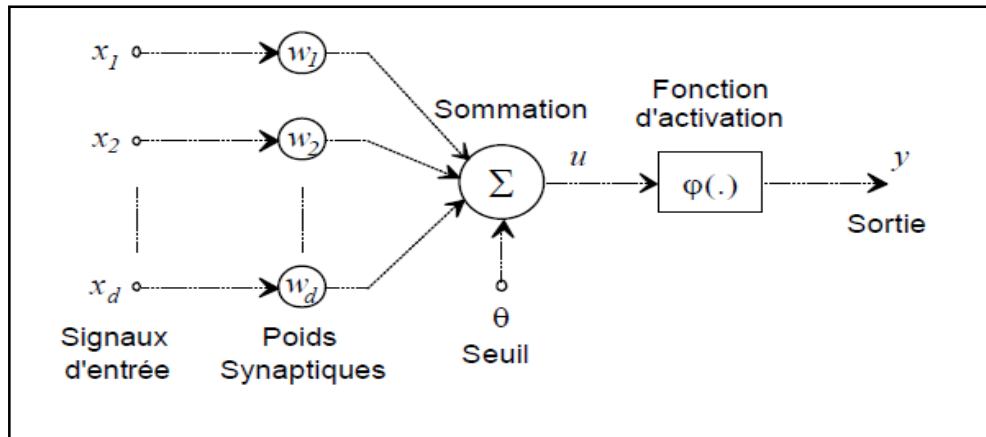


Fig. II.2 : Représentation schématique d'un neurone formel

Le neurone réalise alors trois opérations sur ses entrées :

- Pondération : multiplication de chaque entrée par un paramètre appelé poids de connexion ;
- Sommation : une sommation des entrées pondérées est effectuée ou cette sommation est comparée à un seuil :

$$U = \sum_{i=1}^n w_i x_i - b$$

- Activation : passage de cette somme dans une fonction, appelée fonction d'activation.

La valeur calculée est la sortie du neurone qui est transmise aux neurones suivants :

$$y = f(U) = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i - b\right)$$

Avec :

(b) est appelé biais, il peut être considéré comme la pondération de l'entrée 0 fixée à 1

(U) est appelé potentiel du neurone.

La fonction (f) permet de définir l'état interne du neurone en fonction de son entrée totale.

II.5 La fonction d'activation

Dans sa première version, le neurone formel était donc implémenté avec une fonction à seuil, mais de nombreuses versions existent :

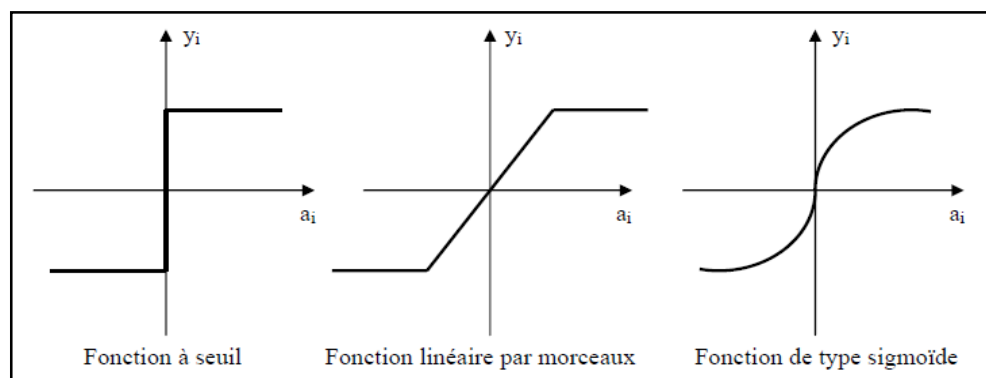


Fig. II.3 : Différents types des fonctions d'activation pour le neurone artificiel

II.5.1 La fonction à seuil

Le seuil introduit une non-linéarité dans le comportement du neurone, cependant, il limite la gamme des réponses possibles à deux valeurs.

II.5.2 La fonction linéaire par morceaux

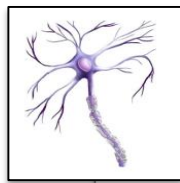
Cette fonction représente un compromis entre la fonction linéaire et la fonction seuil, entre ses deux barres de saturation, elle confère au neurone une gamme de réponses possibles. En modulant la pente de la linéarité, on affecte la plage de réponse du neurone.

II.5.3 La fonction sigmoïde

La fonction sigmoïde se présente comme une approximation continûment dérivable de la fonction d'activation linéaire par morceaux ou de la fonction seuil. Elle présente l'avantage d'être régulière, monotone, continûment dérivable, et bornée entre 0 et 1, elle est définie comme suit :

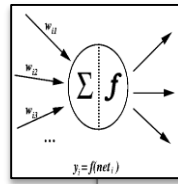
$$\frac{1}{1 + e^{-x}}$$

II.6 Analogie entre le neurone biologique et formel



Neurone Biologique

- Cellule se caractérise par:
 - Des synapses:** points de connection avec les autres neurones, fibres nerveuses ou musculaires;
 - Des dendrites:** les entrées du neurone;
 - L'axone:** la sortie du neurone vers d'autres neurones ou fibres musculaires;
 - Le noyau:** qui active la sortie en fonction des stimulations en entrée.



Neurone Formel

- Par analogie un neurone formel se caractérise par:
 - Les entrées:** des variables sur lesquelles opèrent le neurone;
 - Les poids:** des paramètres correspondant au degré d'influence d'une connection synaptique dans le neurone biologique;
 - **La fonction d'activation:** un opérateur calculant l'état de la sortie du neurone en fonction de son potentiel;
 - **Les sorties:** une fonction pondérée des valeurs d'entrée qui est modulée par une fonction d'activation..

II.7 Bases de fondation des réseaux de neurones

Les réseaux de neurones ont été développés à partir des généralisations des modèles mathématiques de la science cognitive ou de la neurobiologie. Ces approches se basent sur les hypothèses suivantes :

- Le traitement de l'information s'effectue à partir des neurones ;
- Les liaisons entre les neurones permettent la transmission des signaux ;
- Chaque liaison est associée à un poids, qui est multiplié par le signal transmis ;
- Une fonction d'activation (souvent non linéaire pour reproduire le cadre complexe et non linéaire du cerveau humain) est appliquée à l'entrée d'un neurone, afin de déterminer son signal de sortie.

En conséquence, un réseau de neurones se compose d'un grand nombre d'éléments de traitement, appelés neurones. Chaque neurone est connecté à d'autres neurones par une liaison directe. Chacune de ces liaisons a un poids associé. Ces poids de pondération représentent l'information et sont utilisés par le réseau pour modéliser une relation.

II.8 Les réseaux de neurones

Un réseau de neurones peut être considéré comme un modèle mathématique de traitement réparti, composé de plusieurs éléments de calcul non linéaire (neurones), opérant en parallèle et connectés entre eux par des poids.

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit.

Les neurones artificiels sont souvent utilisés sous forme de réseaux qui diffèrent selon le type de connections entre les neurones, une cinquantaine de types peut être dénombrée. Les RNA sont constitués d'un nombre fini de neurones qui sont arrangés sous forme de couches. Les neurones de deux couches adjacentes sont interconnectés par des poids. L'information dans le réseau se propage d'une couche à l'autre, on dit qu'ils sont de type «feed-forward ». Nous distinguons trois types de couches :

- Couche d'entrée : les neurones de cette couche reçoivent les valeurs d'entrée du réseau et les transmettent aux neurones cachés. Chaque neurone reçoit une valeur, sa taille est déterminée par le nombre de variables d'entrée.
- Couches cachées : elle définit l'activité interne du réseau, chaque neurone de cette couche reçoit l'information de plusieurs couches précédentes, effectue la sommation pondérée par les poids, puis la transforme selon sa fonction d'activation qui est en général une fonction sigmoïde. Par la suite, il envoie cette réponse aux neurones de la couche suivante.
- Couche de sortie : elle joue le même rôle que les couches cachées, la seule différence entre ces deux types de couches est que la sortie des neurones de la couche de sortie n'est liée à aucun autre neurone. C'est celle qui fournit les résultats du problème.



Fig. II.4 : Architecture d'un réseau de neurone

II.9 Différents types des réseaux de neurones

Ils existent plusieurs types de réseaux de neurones, nous citons principalement :

II.9.1 Réseaux à une seule couche : la structure d'un réseau monocouche est telle que des neurones organisés en entrée soient entièrement connectés à d'autres neurones organisés en sortie par des poids modifiables.

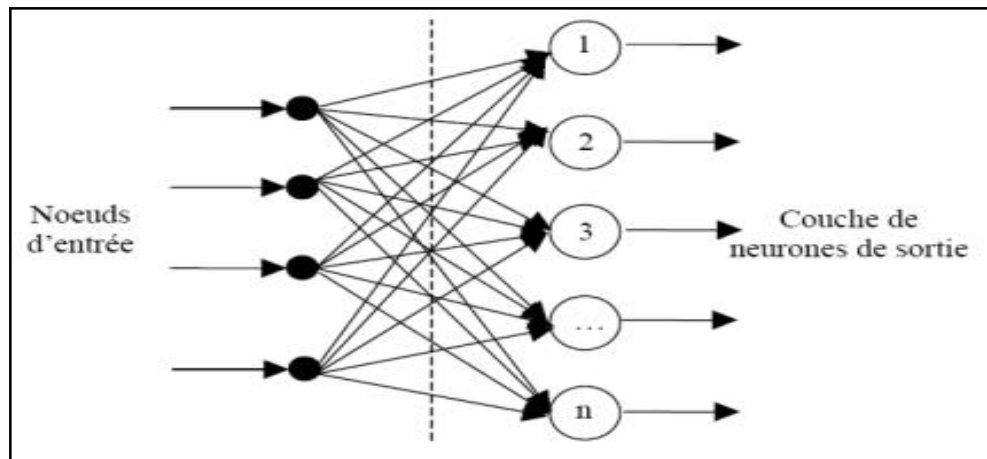


Fig. II.5 : Réseau à une seule couche

II.9.1.1 Perceptron

C'est le premier réseau de neurones mis au point, il a été conçu par Rosemblatt en 1958, il est linéaire et monocouche, avec une fonction d'activation seuil. Le schéma suivant présente un perceptron avec deux entrées X_1 , X_2 , un biais b , les poids synaptiques w_1 , w_2 et la sortie y .

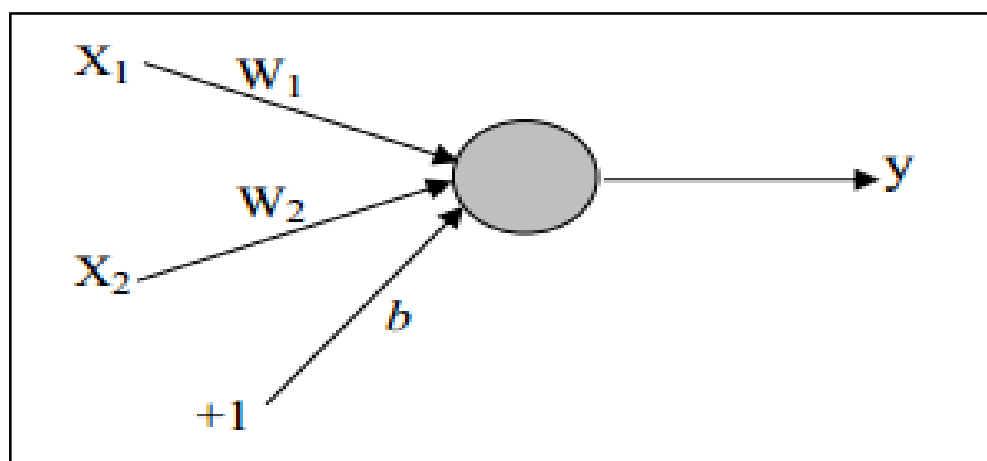


Fig. II.6 : Schéma d'un perceptron

$$y = F \left(\sum_{i=1}^2 w_i x_i + b \right)$$

La fonction d'activation F choisie pour cette section est une fonction d'activation à seuil symétrique définie comme suit :

$$F(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \geq 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases}$$

Ce type de fonction d'activation confère au perceptron des aptitudes de classification. En effet, lorsque la somme pondérée des composantes du vecteur d'entrée est positive ce dernier est assigné à la classe +1, sinon il est assigné à la classe -1. La séparation entre ces deux classes est une ligne droite, appelée frontière de décision, donnée par l'équation :

$$w_1 x_1 + w_2 x_2 + b = 0$$

Le biais b sert à translater la fonction de décision parallèlement à elle-même. De même, les deux poids synaptiques w_1 et w_2 font tourner la droite de décision, durant la phase d'apprentissage, pour la ramener au point de fonctionnement du réseau.

Durant le processus d'apprentissage, le mouvement de la droite de décision dans le cas d'un perceptron monocouche est régi par la règle de correction de l'erreur plus généralement appelée règle d'apprentissage du perceptron :

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \alpha(d_i - y_i(k)x_j)$$

Avec :

α : Constante positive ; k : $k^{\text{ième}}$ itération ;

y_i : Sortie du $i^{\text{ième}}$ neurone; d_i : $i^{\text{ième}}$ sortie désirée ;

w_{ij} : Poids reliant la $j^{\text{ième}}$ composante du vecteur d'entrée au $i^{\text{ième}}$ neurone ;

Si : $d_i = y_i(k)$; donc les poids ne sont pas modifié.

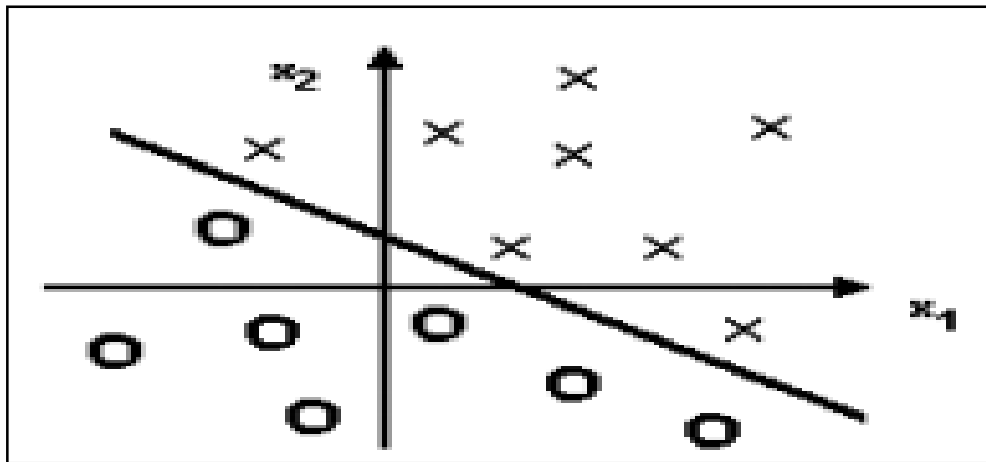


Fig. II.7 : Schéma de classification

II.9.1.2 Le réseau ADALINE

(ADAPtive LINear Element), qui est un réseau à une seule couche, de même structure que le perceptron de Roseblatt avec une fonction d'activation linéaire et une règle d'apprentissage des moindres carrés aussi connue comme la règle Delta. Le réseau ADALINE trouve son application en classification de problème linéairement séparable ou l'approximation linéaire de fonctions.

II.9.2 Réseaux multicouches

Les problèmes rencontrés avec les réseaux à couche unique, ont poussé les chercheurs à développer d'autres réseaux : le réseau de Kohonen 1981, réseau d'Hopfield 1982 et le perceptron multicouches...

II.9.2.1 Réseau de Kohonen

Les réseaux de type auto organisateur (auto adaptative) de Kohonen, appelé aussi SOM « Self Organised Maps » sont des réseaux compétitifs et dynamiques, dans le sens où ils ont tendance à élire un neurone vainqueur et à le favoriser, d'une part, et à créer ou détruire des neurones, d'autre part. Le processus, d'apprentissage n'est donc plus supervisé, on parle d'apprentissage non supervisé ou bien compétitif.

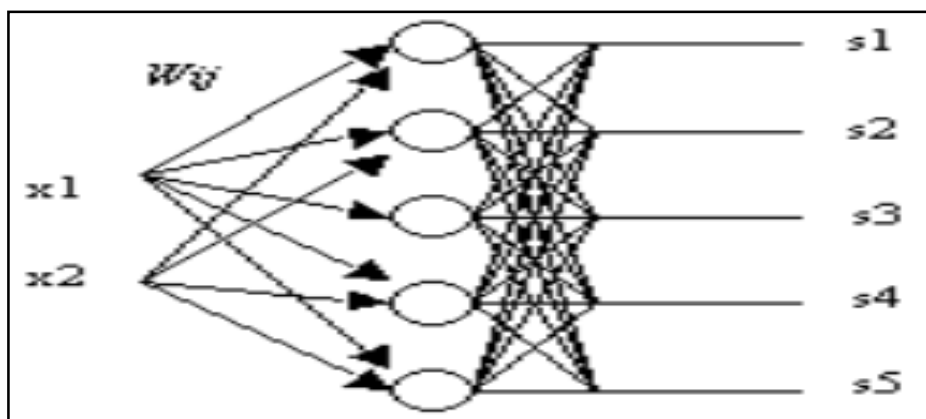


Fig. II.8 : Structure d'un réseau de Kohonen à 2 entrées et 5 neurones concurrents

II.9.2.2 Réseau d'Hopfield

Des réseaux récurrents et entièrement connectés. Dans ce type de réseau, chaque neurone est connecté à chaque autre neurone et il n'y a aucune différenciation entre les neurones d'entrée et de sortie. Ils fonctionnent comme une mémoire associative non linéaire. L'application principale des réseaux de Hopfield est l'entrepôt de connaissances mais aussi la résolution de problèmes d'optimisation. Le mode d'apprentissage utilisé ici est le mode non supervisé.

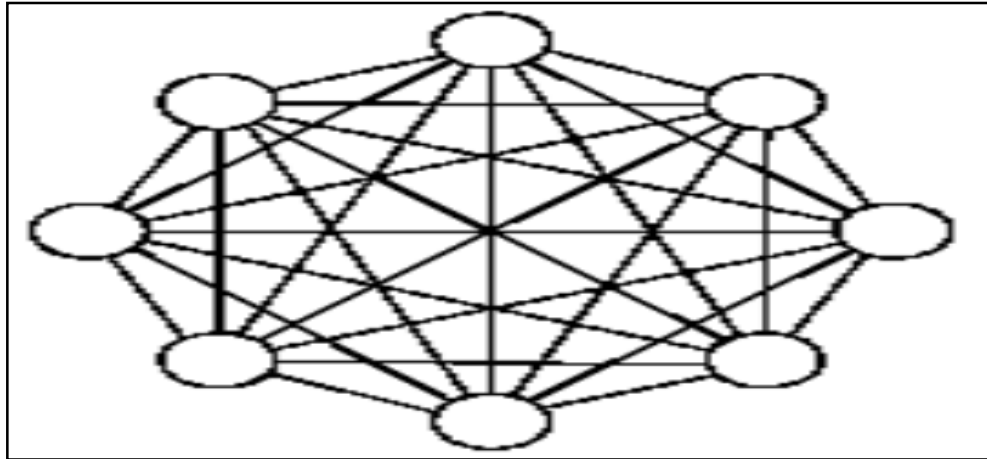


Fig. II.9 : Structure d'un réseau de Hopfield

II.9.2.3 Le perceptron multi couche

C'est une extension du perceptron monocouche, avec une ou plusieurs couches cachées entre l'entrée et la sortie. L'idée principale est de grouper des neurones dans une couche, on place ensuite bout à bout plusieurs couches et on connecte complètement les neurones de deux couches adjacentes. Les entrées des neurones de la deuxième couche sont donc en fait les sorties des neurones de la première couche, les neurones de la première couche sont reliés au monde extérieur et reçoivent tous le même vecteur d'entrée, ils calculent alors leurs sorties qui sont transmises aux neurones de la deuxième couche, etc. Les sorties des neurones de la dernière couche forment la sortie du réseau.

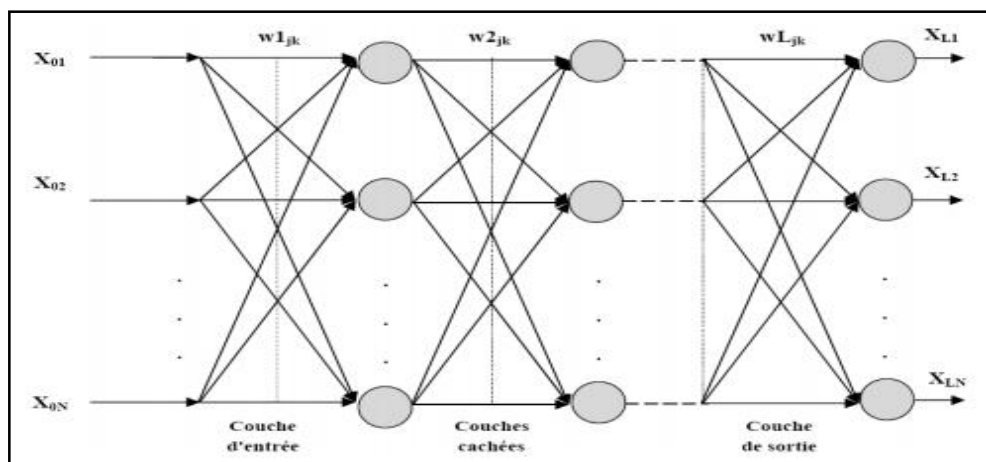


Fig. II.10 : Architecture du perceptron multi couche

Une fois l'architecture du réseau est définie (nombre de couches, de neurones par couche, leur inter connectivité), le réseau passe par une phase d'apprentissage. Pour cela, il utilise un nombre suffisamment conséquent de paires entrée/cible, appelée base d'apprentissage. Son fonctionnement, est basé sur un apprentissage supervisé, c'est-à-dire qu'à chaque nouvelle entrée, le réseau modifie les poids et les biais de façon à ajuster toutes les sorties (valeurs calculées) aux cibles (valeurs des données) et à minimiser les écarts quadratiques entre ces valeurs de sortie simulées et ces valeurs cibles. L'efficacité de l'apprentissage dépend, en effet, d'un grand nombre de paramètres que doit fixer l'utilisateur, le pas du gradient, l'architecture du réseau, le nombre de couches, le nombre de neurones par couche, l'initialisation des poids...etc.

II.10 L'apprentissage

L'apprentissage est le processus du calcul qui permet de mettre à jour les poids des neurones à partir d'une ou plusieurs mesures. Tout réseau de neurones requiert une phase d'apprentissage dont l'objectif est de fournir une méthode au réseau, afin qu'il puisse ajuster ses paramètres lorsqu'on lui présente des exemples à traiter. On distingue habituellement trois types d'apprentissage : supervisé, non supervisé et hybride.

II.11 Les types d'apprentissage

II.11.1 L'apprentissage supervisé

Un apprentissage est dit supervisé lorsqu'on force le réseau à converger vers un état final précis au même temps que l'on présente un motif. Ce genre d'apprentissage est réalisé à l'aide d'une base constituée de plusieurs exemples de type entrée- sortie.

Dans un apprentissage supervisé, on présente au réseau de neurone les entrées et les sorties désirées correspondantes ensuite le réseau s'adapte par une comparaison entre le résultat qu'il a calculé en fonction des entrées fournies et la réponse attendue en sortie. Ensuite le réseau va modifier ses poids progressivement jusqu'à ce que l'erreur entre les sorties du réseau et les résultats désirées soit minimisée.

II.11.2 L'apprentissage non supervisé

Dans l'apprentissage non supervise, le réseau modifie ses paramètres en tenant compte seulement des informations locales, Aucun résultat désiré n'est fourni au réseau.

L'apprentissage consiste à détecter les similarités et les différences dans l'ensemble d'apprentissage. Les poids et les sorties du réseau convergent, en théorie, vers les représentations qui capturent les régularités statistiques des données. Ce type d'apprentissage est également dit compétitif et l'avantage de ce type d'apprentissage réside dans sa grande capacité d'adaptation reconnue comme une auto organisation, « self-organizing ».

II.11.3 L'apprentissage hybride

Ce type d'apprentissage est plus rare et est encore mal exploré. L'apprentissage hybride est une technique similaire à l'apprentissage supervisé à la différence qu'au lieu de fournir des résultats désirés au réseau, on lui accorde plutôt un grade(ou score) qui est une mesure du degré de performance du réseau après quelques itérations.

Certains auteurs utilisent le terme d'apprentissage hybride pour parler d'un couplage supervisé non supervisé ; dans ce cas, il s'agit d'un réseau qui met en parallèle ou en série un réseau entraîné en mode supervisé et un autre en mode non supervisé.

II.12 Les algorithmes d'apprentissage

L'algorithme d'apprentissage est la méthode mathématique qui va modifier les poids de connexions afin de converger vers une solution qui permettra au réseau d'accomplir la tâche désirée. L'apprentissage est une méthode d'identification paramétrique qui permet d'optimiser les valeurs des poids du réseau.

Plusieurs algorithmes itératifs peuvent être mis en œuvre, parmi lesquels, on note : l'algorithme de rétro propagation, la Méthode Quasi-Newton, Algorithme de BFGS...

II.12.1 L'algorithme de rétro propagation

L'algorithme de rétro propagation (ARP) ou de propagation arrière « back propagation » est l'exemple d'apprentissage supervisé le plus utilisé.

La technique de rétro propagation du gradient (Back propagation en anglais) est un algorithme itératif conçu pour minimiser un critère quadratique d'erreur entre la sortie obtenue d'un réseau multicouche et la sortie désirée. Cette minimisation est réalisée par une configuration des poids adéquate. L'algorithme nécessite une fonction continue, non linéaire et différentiable comme une fonction de transfert. Le principe de la rétro propagation peut être décrit en trois étapes fondamentales : acheminement de l'information à travers le réseau ; rétro propagation des sensibilités et calcul du gradient ; ajustement des paramètres par la règle du gradient approximé. Il est important de noter que l'ARP souffre des limitations inhérentes à la technique du gradient à cause du risque d'être piégé dans un minimum local. Il suffit que les gradients ou leurs dérivées soient nuls pour que le réseau se retrouve bloqué dans un minimum local. Ajoutons à cela la lenteur de convergence surtout lorsqu'on traite des réseaux de grande taille (c'est à dire pour lesquels le nombre de poids de connexion à déterminer est important).

II.12.2 L'algorithme de BFGS

L'algorithme de BFGS du nom de ses inventeurs : Broyden, Fletcher, Goldfarb et Shanno prend implicitement en compte les dérivées secondes et s'avère donc nettement plus performante que la méthode de rétro propagation. Le nombre d'itérations est nettement plus faible et les temps de calcul réduits d'autant.

L'algorithme de BFGS est une règle d'ajustement des paramètres qui a l'expression suivante :

$$b^k = b^{k-1} \mp U_K M_K \nabla J(b^{k-1})$$

Où M_K est une approximation, calculée itérativement, de l'inverse de la matrice Hessienne.

L'approximation de l'inverse du HESSIEN est modifiée à chaque itération suivant la règle suivante :

$$M_k = M_{K+1} + \left[1 + \left(\frac{\gamma_{K-1}^T M_{K-1} \gamma_{K-1}}{\delta_{K-1}^T \gamma_{K-1}} \right) \right] \frac{\delta_{K-1}^T \delta_{K-1}}{\delta_{K-1}^T \gamma_{K-1}} \mp \frac{\delta_{K-1} \gamma_{K-1}^T M_{K-1} + M_{K-1} \gamma_{K-1} \delta_{K-1}^T}{\delta_{K-1}^T \gamma_{K-1}}$$

Avec :

$$\gamma_{K-1} = \nabla J(b^K) \mp \nabla J(b^{K-1}) \text{ Et } \delta_{K-1} = b^K \mp b^{K-1}$$

Nous prenons pour valeur initiale de M la matrice identité. Si, à une itération, la matrice calculée n'est pas définie positive, elle est réinitialisée à la matrice identité.

Une méthode quasi newtonienne, n'est efficace que si elle est appliquée au voisinage d'un minimum. D'autre part, la règle du gradient simple est efficace lorsqu'on est loin du minimum et sa convergence ralentit considérablement lorsque la norme du gradient diminue (c'est à dire lorsqu'on s'approche du minimum). Ces deux techniques sont donc complémentaires. De ce fait, l'optimisation s'effectue en deux étapes : utilisation de la règle du gradient simple pour approcher un minimum, et de l'algorithme de BFGS pour l'atteindre.

II.13 Architecture des réseaux de neurones

Suivant la logique d'inter connexion choisie, les réseaux de neurones se distinguent en deux grandes familles : les réseaux non bouclés (statiques) et les réseaux bouclés (dynamique).

II.13.1 Réseaux de neurones non bouclés (feed-forward)

Un réseau de neurones non bouclé réalise une (ou plusieurs) fonction algébrique de ses entrées par composition des fonctions réalisées par chacun de ses neurones. Dans un tel réseau, le flux d'information circule des entrées vers les sorties sans retour en arrière. Si l'on représente le réseau comme un graphe dont les nœuds sont les neurones et les arêtes les « connexions » entre ceux-ci, le graphe d'un réseau non bouclé est acyclique. Tout neurone dont la sortie est une sortie du réseau est appelé « neurone de sortie ». Les autres, qui effectuent des calculs intermédiaires, sont des « neurones cachés ».

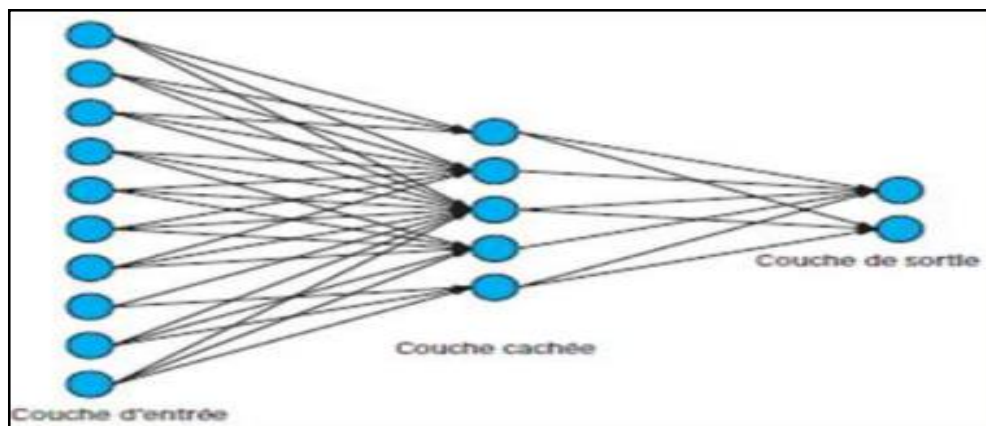


Fig. II.11 : Réseaux de neurone non bouclés

II.13.2 Réseaux de neurones bouclés (feed-back)

L'architecture la plus générale pour un réseau de neurones est le « réseau bouclé », dont le graphe des connexions est cyclique : lorsqu'on se déplace dans le réseau en suivant le sens des connexions, il est possible de trouver au moins un chemin qui revient à son point de départ (un tel chemin est désigné sous le terme de « cycle »). La sortie d'un neurone du réseau peut donc être fonction d'elle-même ; cela n'est évidemment concevable que si la notion de temps est explicitement prise en considération.

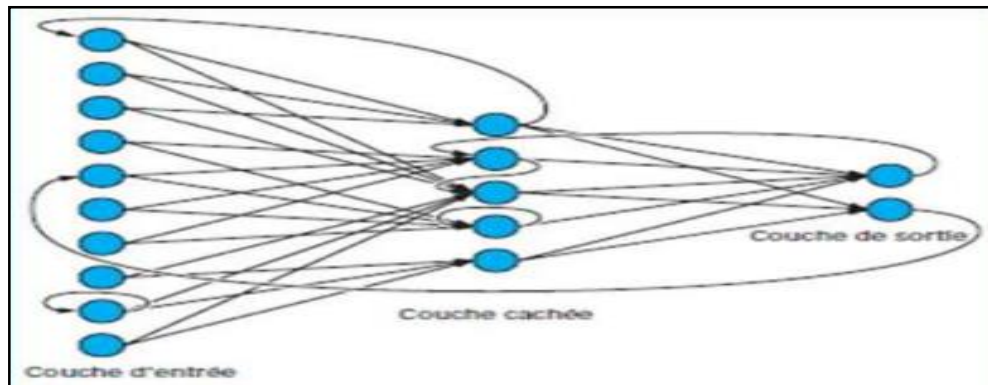


Fig. II.12 : Réseaux de neurones bouclés

II.14 Étapes de construction d'un réseau de neurones

Les neurones peuvent être organisés de différentes manières, c'est ce qui définit l'architecture et le modèle du réseau. L'architecture la plus courante est celle dite du perceptron multicouche. Avant de pouvoir utiliser les capacités de classification d'un réseau de neurones, il faut le construire. Ceci se déroule en quatre étapes :

1. La construction de la structure du réseau (généralement empirique).
2. La constitution d'une base de données de vecteurs représentant au mieux le domaine à modéliser. Celle-ci est scindée en deux parties : une partie servant à l'apprentissage du réseau (on parle de base d'apprentissage) et une autre partie aux tests de cet apprentissage (on parle de base de test).
3. Le paramétrage du réseau par apprentissage. Au cours de l'apprentissage, les vecteurs de données de la base d'apprentissage sont présentés séquentiellement et plusieurs fois au réseau. Un algorithme d'apprentissage ajuste les poids du réseau afin que les vecteurs soient correctement appris. L'apprentissage se termine lorsque l'algorithme atteint un état stable.
4. La phase de reconnaissance qui consiste à présenter au réseau chacun des vecteurs de la base de test. La sortie correspondante est calculée en propageant les vecteurs à travers le réseau. La réponse du réseau est lue directement sur les unités de sortie et comparée à la réponse attendue. Une fois que le réseau présente des performances acceptables, il peut être utilisé pour répondre au besoin qui a été à l'origine de sa construction.

II.15 Avantages et inconvénients des réseaux de neurones

II.15.1 Avantages

- Rapidité ;
- Très utile lorsque le diagnostic doit être conduit en ligne ;
- Un réseau de neurones robuste surtout vis-à-vis du bruit ;
- Un réseau de neurones apprend par l'exemple, donc il suffit d'une seule base d'exemple pour effectuer le reste des calculs ;

II.15.2 Inconvénients

- L'apprentissage peut être difficile ;
- Nécessaire d'introduire des données sur toutes les conditions de fonctionnement ;
- L'apprentissage est gourmand en temps de calcul ;
- Un réseau de neurones ne fonctionnera pas forcément correctement hors de sa plage d'apprentissage.

III.1 Introduction

Depuis sa création en décembre 1963, l'entreprise nationale SONATRACH a toujours assurée l'acheminement des hydrocarbures (pétrole brut, gaz naturel, GPL et condensat) à partir des champs de production vers ses clients (complexes GNL et GPL, raffineries, ports pétroliers pour l'exportation,...etc).

En 2005 et en application des dispositions de la loi n°05-07 du 19 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 28 avril 2005, modifiée et complétée, relative aux hydrocarbures, l'entreprise nationale SONATRACH a organisé sa capacité de transport en système de transport par canalisation, chacun des systèmes regroupant une ou plusieurs canalisations par produit et ayant les mêmes points de départ et d'arrivée.

Actuellement, SONATRACH dispose de 22 systèmes de transport par canalisation, répartis comme suit :

- 07 pour le pétrole brut ;
- 02 pour les gaz de pétrole liquéfiés (GPL) ;
- 03 pour les liquides de gaz naturel (Condensat) ;
- 10 pour le Gaz naturel.

L'entreprise nationale SONATRACH-Spa a aussi entamé des opérations de réorganisation de ses systèmes comptables pour tenir des comptes de résultats séparés pour chacun des systèmes de transport par canalisation. L'exploitation et la maintenance de ces systèmes de transport est confiée à l'Activité Transport par Canalisation (TRC).

III.2. Description du réseau de transport de pétrole brut

L'Activité Transport par Canalisation gère un réseau de transport composé de 12 oléoducs cet organisé en 07 systèmes de transport par canalisation (STC) répartis comme suit :

04 systèmes de transport par canalisation situés au Sud de Haoud El Hamra, à savoir :

- STC OH1 « In Amenas – Haoud El Hamra » ;
- STC OD1/OD3/OH2 « El Borma – Baguel – Mesdar – Haoud El Hamra » ;
- STC OH3/OH4 « HassiBerkine – Haoud El Hamra » ;
- STC OT1 « In Amenas – Frontière Algéro-Tunisienne ».

03 systèmes de transport par canalisation situés au Nord de Haoud El Hamra, à savoir :

- STC OB1/OG1 « Haoud El Hamra – Bejaia – Alger » ;
- STC OK1 « Haoud El Hamra – Skikda » ;
- STC OZ1/OZ2 « Haoud El Hamra –Arzew».

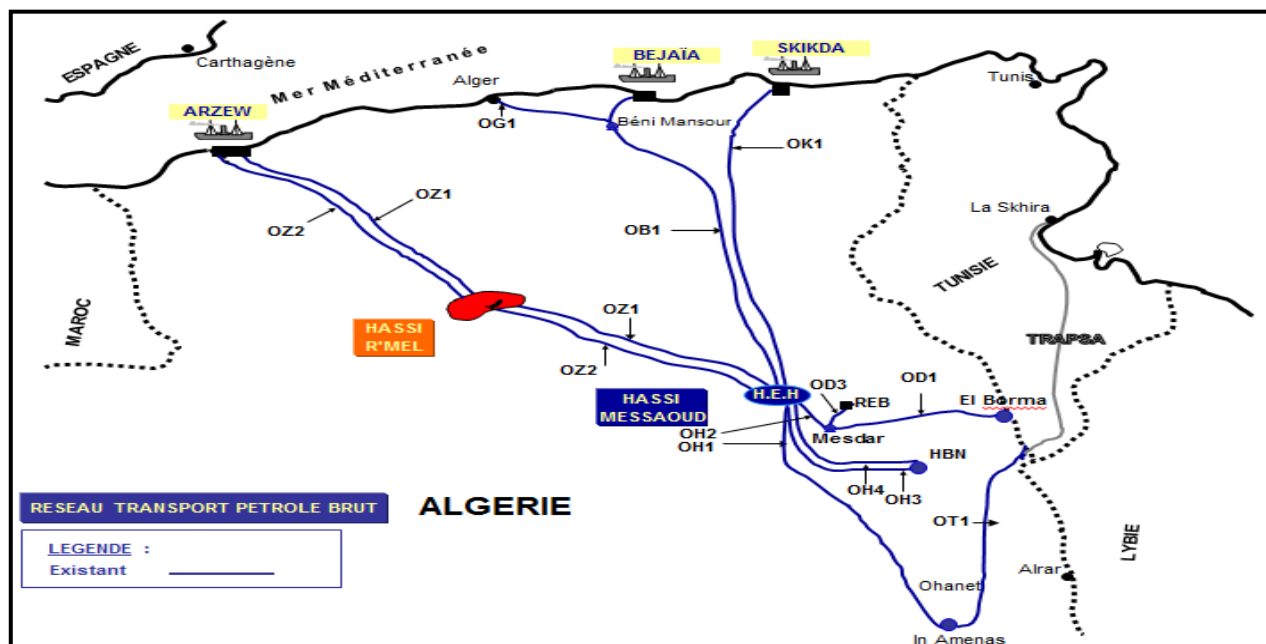


Fig. III.1 : Carte de réseau du transport de pétrole brut

L'Activité Transport par Canalisation dispose également un Centre de Dispatching des Hydrocarbures Liquides (CDHL), point de départ de tous les oléoducs du nord, il reçoit le pétrole brut de tous les champs de production du sud.

Son rôle est la collecte de toutes les quantités de pétrole au niveau de Haoud El Hamra et d'autre région de sud, ces quantités sont ensuite distribuées vers les centres de consommation comme les raffineries et à l'exportation. Avant son expédition sur chaque ouvrage, le pétrole brut collecté est décanté et comptabilisé.

III.3 Description du STC OD1/OD3/OH2 « El Borma – Rhour el Baguel – Mesdar – Haoud El Hamra »

Le STC OD1/OD3/OH2 « El Borma – Rhour el Baguel – Mesdar – Haoud El Hamra » est composé de trois (03) oléoducs, destinés pour le transport du pétrole brut collecté des champs de production El Borma, Bir El Msana (BMS), Mesdar, Bir R'Baa Nord (BRN) et Rhour el Baguel.

- Oléoduc OD1/20'' « El Borma – Mesdar » ;
- Oléoduc OD3/20'' « Rhour el Baguel – Mesdar » ;
- Oléoduc OH2/26'' « Mesdar – Haoud El Hamra ».

Pour les besoins de notre étude l'oléoduc OH2 sera présenté ci-après.

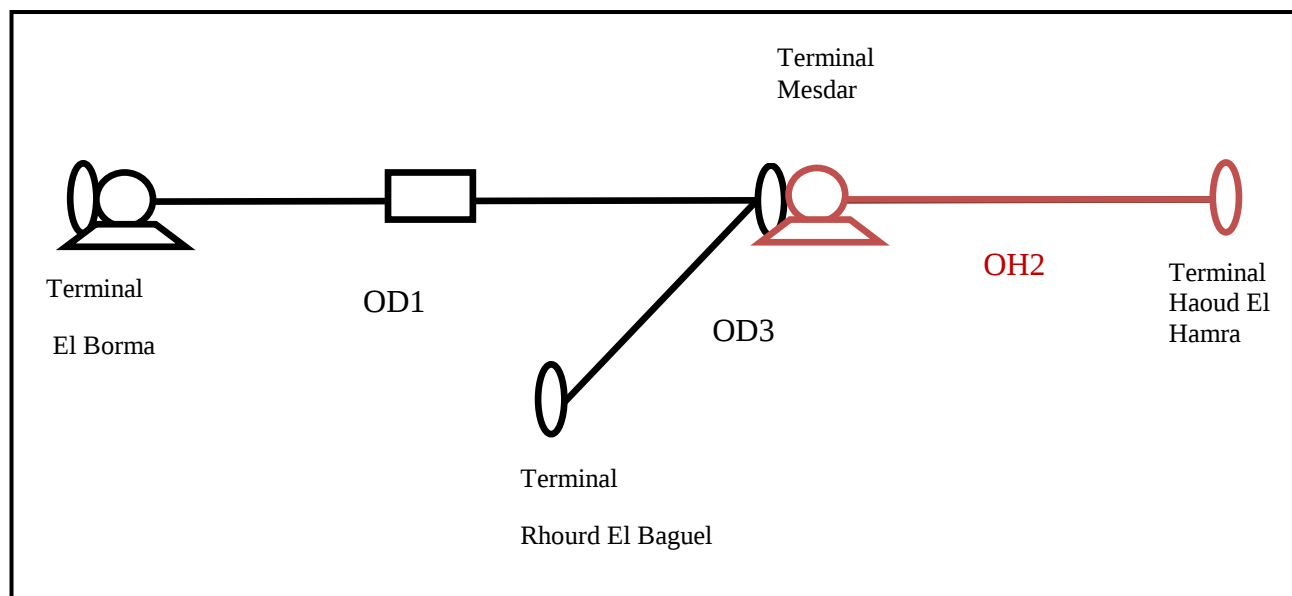


Fig. III.2 : Schéma descriptif du système de transport par canalisation (OD1, OD3, OH2)

III.4 Description de l'oléoduc OH2 « Mesdar – Haoud El Hamra »

L'oléoduc OH2 26'' a été mis en service en 1972, fait partie du système de transport par canalisation Pétrole Brut OD1/OD3/OH2 « El Borma, Rhour El Baguel, Mesdar, Haoud El Hamra » destiné à l'évacuation du pétrole brut issu des champs de production suivants : d'El Borma, de Rhour El Khrouf (RKF), de Rhour El Baguel (REB), de Bir Rébaa Nord (BRN), de Mesdar (DP) à partir de la station de départ de Mesdar jusqu'au Centre de Stockage de Haoud El Hamra.

III.4.1 Tracé de l'oléoduc OH2

L'oléoduc OH2 est destiné pour le transport du pétrole brut du terminal départ Mesdar jusqu'au Centre de Dispatching des Hydrocarbures Liquides (CDHL) de Haoud El Hamra.

L'oléoduc OH2 est composé d'une canalisation de 108,36 km de longueur, d'un diamètre de 26", traversant des obstacles « oueds, routes nationales, dunes de sables, ... etc ».

Toutes les zones traversées sont classées en catégories : I, II et III selon la réglementation Algérienne de sécurité pour les pipelines de transport des hydrocarbures liquides.

Le tracé de l'oléoduc OH2 est présenté ci-dessous :

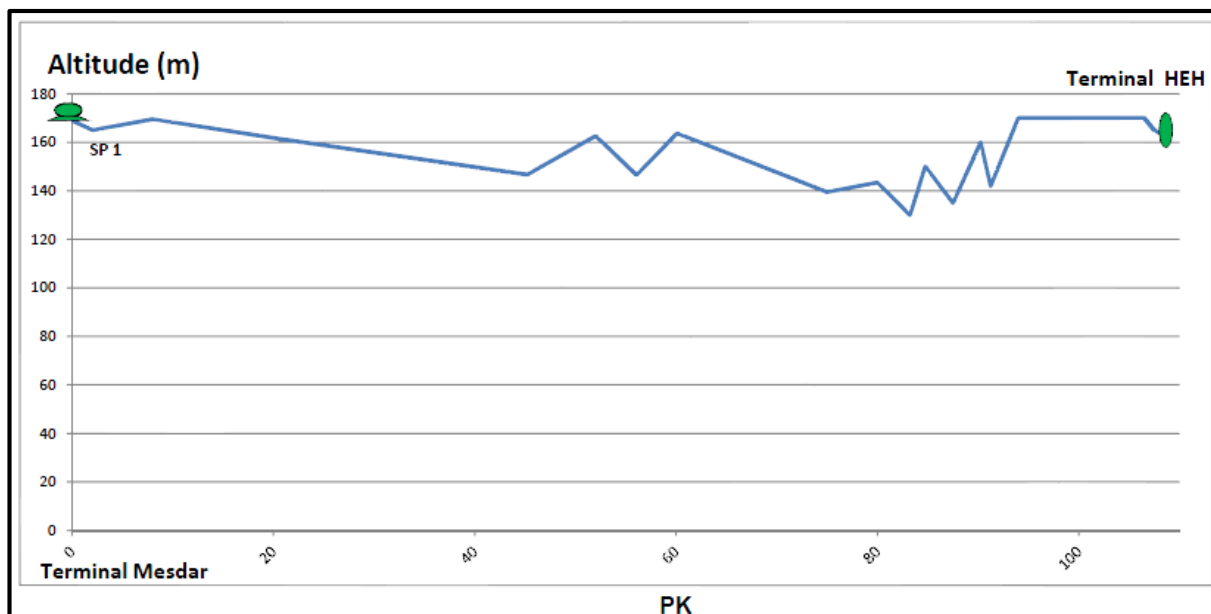


Fig. III.3 : Le profil hydraulique de l'OH2

III.4.2 Caractéristique de l'oléoduc OH2

Les caractéristiques des tubes existants sont :

- Nuance de l'acier du tube : API5L X52
- Longueur : 108,36 Km
- Diamètre en pouce : 26
- Pression Maximale de service recommandée : 63 bars
- Rugosité absolue du tube : 0,0457 mm
- Hauteur du recouvrement : 1m
- Date de mise en service de l'OH2 : 10 Avril 1972
- Postes de sectionnement : 02

III.4.3 Postes de sectionnement

L'oléoduc OH2 est équipé de deux (02) postes de sectionnement repartis le long de la ligne à des intervalles d'environ 20 km, permettant d'isoler une section donnée de la ligne en cas de fuite ou d'éclatement pour parer à tout risque de décroissance de la pression de service.

Les vannes de ces postes de sectionnement se ferment automatiquement en cas de :

- Rupture de la canalisation ;
- Basse pression dans la canalisation ;
- Haute pression dans la canalisation.

Les vannes de sectionnement sont munies aussi d'un by-pass pour équilibrer les pressions.

III.4.4 Terminal départ Mesdar

Le Terminal départ Mesdar reçoit du pétrole brut provenant des champs de production El Borma, Bir El Msana (BMS), Mesdar, BirR'Baa Nord (BRN) et Rhourd El Baguel par l'intermédiaire des canalisations :

- OD1/20'' « El Borma – Mesdar » ;
- OD2/20'' « BirR'Baa Nord – Mesdar » ;
- OD3/20'' « Rhourde El Baguel – Mesdar » ;
- Mesdar/10''.

Le terminal départ de Mesdar est constitué essentiellement d'un parc de stockage et d'une station de pompage délivrant une pression maximale de service recommandée de 63 bars.

III.4.5 Parc de stockage

Le parc de stockage dispose de 03 bacs à toit flottant d'une capacité totale de 48 800 m³, répartis comme suit :

Référence	Design [m ³]	Utile [m ³]	Hauteur [m]	Diamètre [m]	Date mise en service
S1	14 400	11 777	14,64	36,58	1969
S2	14 400	11 736	14,64	36,58	1969
S3	20 000	16 184	18,69	39,20	1997
Total	48 800	39 697			

Tab. III.1 : Capacité de stockage du parc de stockage Mesdar

III.4.6 Station de pompage

La station de pompage composée principalement de :

Turbopompes	Turbine	Nombre	2
		Constructeur	MAN
		Type	THM 1203
		Puissance	2 x 5,6 MW
	Pompe	Nombre	2
		Constructeur	TEXTRON
		Type	DVDS 14x14x17 1/2
		Débit [m³/h]	2800
		Assemblage	Parallèle
Boosters	Moteur	Nombre	3
		Constructeur	ABB
		Type	4HXR 355LC4
		Puissance	250 KW
	Pompe	Nombre	3
		Constructeur	FLOWERVE
		Type	WUC 1400 4M1L
		Débit [m³/h]	1400
Turboalternateur		Nombre	2 TA + 1GE
		Constructeur	NUOVO PIGNONE / SDMO
		Puissance	2x2, 1 MW + 450 KVA
Consommation			Gaz naturel & gasoil

Tab. III.2 : Les caractéristiques de la station de pompage Mesdar

Les paramètres d'exploitation de l'oléoduc OH2 sont les suivant :

Capacité Design [MTA]	18
Capacité réelle [MTA]	12
Facteur de marche [jours]	330
Pression Maximale de service d'origine « recommandée » [bars]	63
Pression Maximale de service actuelle « recommandée » [bars]	40

Tab. III.3 : Paramètres d'exploitation de l'OH2

Les débits usuels de l'oléoduc OH2 sont les suivant :

Phase	Débit [m³/h]	Capacité [MTA]	Nombre de machines en marche
1	947	6	2
2	1894	12	2

Tab. III.4 : Les débits usuels de l'OH2

III.4.7 Protection cathodique

Le système de protection cathodique est conçu pour atténuer les effets de la corrosion sur l'oléoduc, sur les postes de sectionnement et sur la tuyauterie enterrée des postes de coupure et des terminaux départ et arrivée.

Un rapport entre les potentiels de l'ouvrage et celui du sol de $[- 0.85]$ Voltes ou plus en valeur absolue, en se référant à une électrode de référence sulfate de cuivre CuSO_4 , est indicatif d'une protection cathodique totale.

Il est rare de rencontrer des lectures de potentiels polarisés d'une valeur négative au-dessus de $[- 1.20]$ Voltes.

Le système de protection cathodique est conçu pour assurer la protection des installations du gazoduc pendant une période minimale de vingt ans « 20 ans ». Il existe cinq (05) postes de protection cathodique, servant à assurer la protection de l'OH2.

III.5 Caractéristiques de l'acier X52

Depuis plus de 25 ans, les industries de la métallurgie et de la sidérurgie développent de nouveaux types d'aciers, appelés Aciers à Haute limite d'Elasticité (acier HLE), afin de diminuer le prix de revient des pipelines. Ces métaux, qui possèdent de bonnes propriétés mécaniques permettent de diminuer l'épaisseur des pipelines, donc de minimiser la quantité de matériau nécessaire à leur élaboration. Le coût de fabrication d'un pipeline étant essentiellement déterminé par cette quantité, l'usage d'aciers HLE permet de réaliser de fortes économies.

Les tableaux suivant reflètent la composition chimique et les caractéristiques mécaniques de l'acier X52 type API 5L, tubes de conduite PSL1 et PSL2 :

III.5.1 Propriétés chimique

API 5L - PSL1	Carbone C (max)	Manganèse Mn (max)	Phosphore P (max)	Soufre S (max)	Titan Ti (max)
X52	0,26	1,40	0,030	0,030	0,04
API 5L - PSL2	Carbone C (max)	Manganèse Mn (max)	Phosphore P (max)	Soufre S (max)	Titan Ti (max)
X52	0,22	1,40	0,025	0,015	0,04

Tab. III.5 : Propriétés chimique de l'acier X52 (tube PSL1 ET PSL2)

III.5.2 Propriétés mécaniques

API 5L – PSL1	Résistance à la rupture [N/mm ²] (minimum)	Limite élastique [N/mm ²] (minimum)
X52	455	359
API 5L - PSL2	Résistance à la rupture [N/mm ²] (min-max)	Limite élastique [N/mm ²] (min-max)
X52	455-758	359-531

Tab. III.6 : Propriétés mécaniques de l'acier X52 (tube PSL1 ET PSL2)

III.6 Inspection de la ligne OH2

La canalisation de la ligne OH2 a été victime du phénomène de corrosion, la gravité réside dans la vitesse dont elle a évoluée, lors de ce contexte la SONATRACH a prévu un contrat avec la société Canadienne PII, pour établir une inspection en ligne de la canalisation, cela a été réalisé en 2001.

L'outil intelligent pivot de l'opération d'inspection est un « MagneScan RH » permettant un sondage ultrasonique de l'épaisseur des parois (Fig. III.4) :

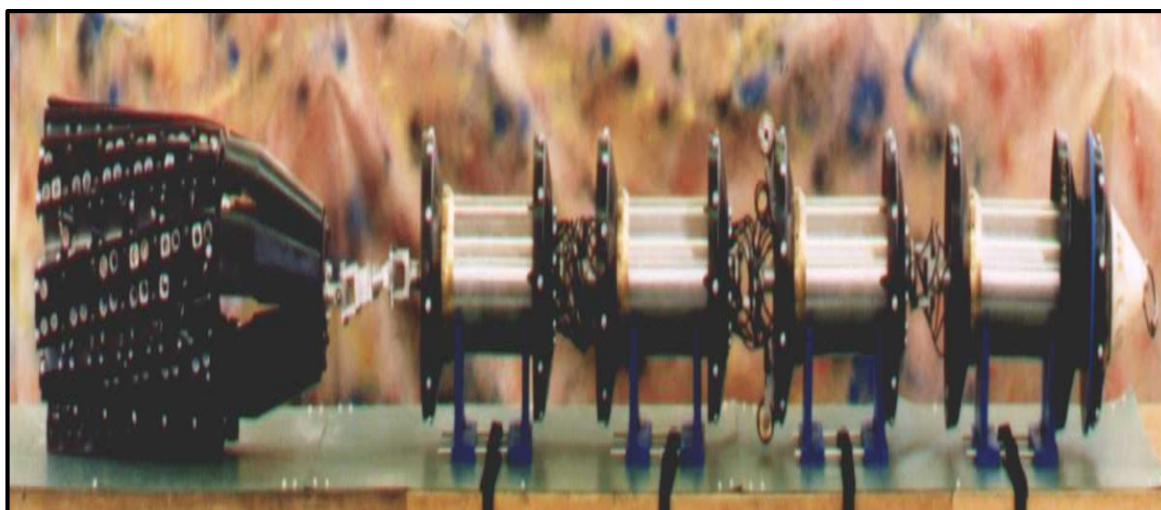


Fig. III.4 : MagneScan RH

Le principe de fonctionnement de l'outil utilisé lors de l'inspection est envisagé sur l'illustration suivante :

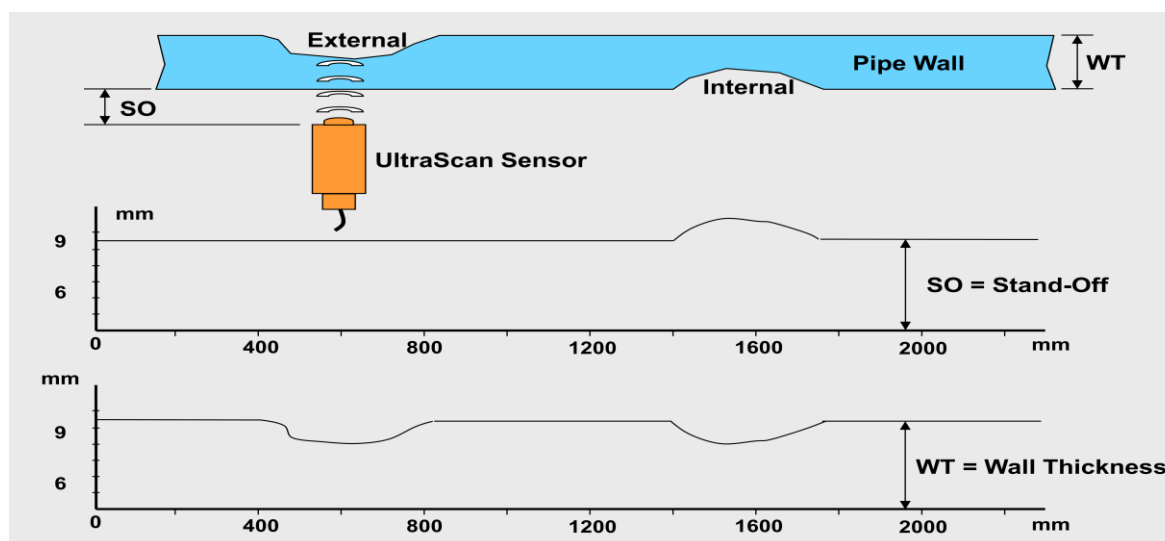


Fig. III.5 : Principe de fonctionnement de magnesian RH

III.6.1 Technique de détection des défauts

L'outil d'inspection interne dont la PII se sert pour déterminer l'épaisseur de la paroi de la conduite mesure l'épaisseur à l'aide d'une technique utilisant le temps de réflexion d'ultrasons.

Le mesurage faisant appel à cette technique se base sur l'intervalle entre la réflexion des ultrasons renvoyés par la surface de la paroi interne de la conduite (écho d'entrée) et celle de l'écho renvoyé par la surface de la paroi externe (écho de paroi extérieure).

L'écho d'entrée peut être accompagné d'impulsions mineures qui, si elles sont mesurées, peuvent être mal interprétées comme étant des échos de paroi extérieures et donner une mesure invalide de l'épaisseur de la paroi. Pour éviter de telles erreurs, la PII programme l'outil d'inspection interne de mesurage ultrasonique avant chaque inspection, de façon que seules les impulsions correspondant à un intervalle de temps spécifié soient mesurées et enregistrées.

Les impulsions mineures attribuables à l'écho d'entrée devraient s'inscrire à l'extérieur de cet intervalle et ne seraient donc pas enregistrées. Toutefois, dans le cas d'une conduite affectée par une corrosion externe en profondeur, lorsque l'écho de paroi extérieure se trouve à l'extérieur de l'intervalle de mesurage et n'est pas enregistré, il est impossible de calculer avec précision l'épaisseur de la paroi et le défaut est indiqué comme étant associé à une atténuation d'écho. En présence de corrosion interne, l'accumulation de sédiments dans les cavités peut influencer sur le mesurage de l'épaisseur de la paroi. Comme les sédiments dispersent le faisceau d'ultrasons et font écran entre le faisceau et la paroi de la conduite, il est impossible de mesurer avec exactitude la profondeur de la corrosion interne, si bien que le défaut est aussi indiqué comme étant associé à une atténuation d'écho.

La PII a reconnu que l'atténuation d'écho a une incidence sur le mesurage de l'épaisseur de la paroi lorsque la conduite est affectée par une corrosion externe en profondeur et par une corrosion interne assortie de sédimentation.

Critères de détection de l'outil utilisé « Pertes de métal » :

- Profondeur minimale 1 mm ;
- Longueur minimale 10 mm ;
- Largeur minimale 8 mm.

III.6.2 Résultats d'inspection

Dans le rapport initial que la PII a remis en 2001, l'inspection par MagneScan RH a identifié les défauts suivants :

- 417 défauts internes de corrosion ;
- 2530 défauts externes corrosion ;
- 301 défauts de fabrication (lamination) ;
- 80 bosses ;
- 7 dépôts ;
- 1 Collier de réparation ;
- 1 pièce de réparation.

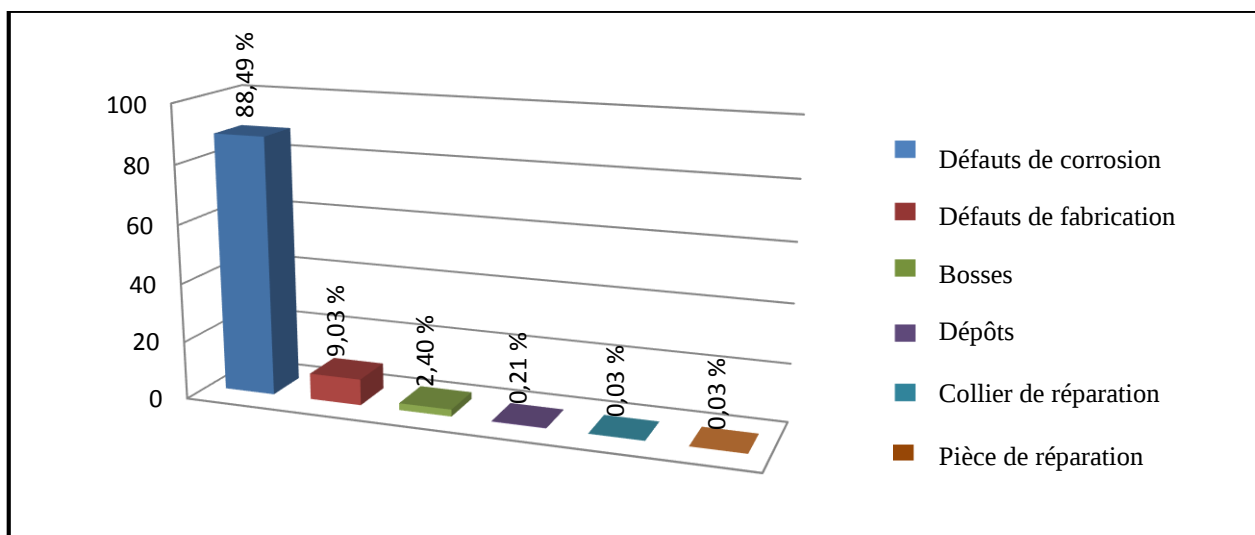


Fig. III.6 : Résultats d'inspection de l'OH2 sous forme d'histogramme

VI.1 Problématique

L'ouvrage OH2 26'' est conçu pour une capacité de design qui peut atteindre 18MTA, et une pression maximale de service varie entre (77,38 – 183,54) bars, après réalisation d'une inspection en ligne en 2001, la SONATRACH a déclassée le pipe due à des considérations qu'on ignore. Nous essayerons par la suite d'évaluer les performances de cette ligne (capacité de design/capacité actuelle) après inspection et en tenant compte des défauts de corrosion détectés, pour cela nous aboutissons à développer un modèle approprié permettant à l'exploitant une approche qui lui offre la propriété de réparation des défauts de corrosion sans être obligé de passer ni par un calcul hydraulique (pour la détermination des pressions d'opération) ni par les normes de calcul des pressions réduites des points de corrosion, cette approche est basée sur la technique des réseaux de neurones artificiels.

IV.2 Partie I : Evaluation des performances de la ligne lors de sa capacité de design

Pour se faire et préalablement à l'établissement de notre modèle des RNA, nous avons procédé à des simulations hydrauliques et un calcul des pressions réduites selon la norme DNV, permettant d'obtenir une base de données d'un certain nombre d'échantillons, ces derniers servent à entraîner notre réseau :

IV.2.1 Détermination des pressions d'opération

L'équation suivante permet de définir la pression de chaque point de la conduite :

$$P_{opi} = P_{ref} - \left[\left(\frac{0,0826 \lambda q^2}{D_{int}^5} L + (Z_i - Z_0) \right) \rho g 10^{-5} \right]$$

Ou :

- P_{ref} : la pression de refoulement du terminal départ ;
- L : longueur de la conduite ;
- λ : coefficient de friction ;
- q : débit volumique de la ligne ;
- D_{int} : diamètre intérieur de la conduite ;
- Z_i : altitude du point i du tracé ;
- Z_0 : altitude du point de départ de la station ;
- ρ : masse volumique du produit ;
- g : la force de gravité = 9,81 m/s.

• Paramètres d'exploitation

Les contraintes d'exploitation suivantes ont été prises en considération pour l'étude du procédé et le calcul des gradients hydrauliques pour les différents débits (régimes) d'exploitation :

- Pression maximale de refoulement de la station de pompage Mesdar : 61,8 bars ;
- Pression maximal d'arrivée au niveau de HEH : 5 bars ;
- Facteur de charge : 330 jours/an ;
- Débit de la ligne : 18 MTA.

• Calcul hydraulique

Le calcul des pertes de charge dans la ligne est fait en considérant le produit liquide et monophasique et en utilisant le logiciel PIPEPHASE version 9.2 (Détails de calcul en annexe I).

Les paramètres des simulations sont :

- Formule de calcul de pertes de charges en régime turbulent : Moody.
- Limite du régime turbulent type tube lisse: Nombre de Reynolds $3000 < Re < Re_I$
- Le fluide est supposé être newtonien.
- Condition isothermes tout le long de la ligne.

Pour aboutir au calcul des pressions d'opération, on a recours à la détermination des altitudes du tracé, une interpolation linéaire de chaque partie de la ligne, nous a permis l'extraction de plusieurs équations qui ont servis par la suite la déduction des altitudes de n'importe quel point voulu, le profil obtenu par les données de SONATRACH et celui obtenu par l'interpolation réalisée sont illustrés ci-dessous, on remarque que ces deux derniers coïncident dans presque tous les points :

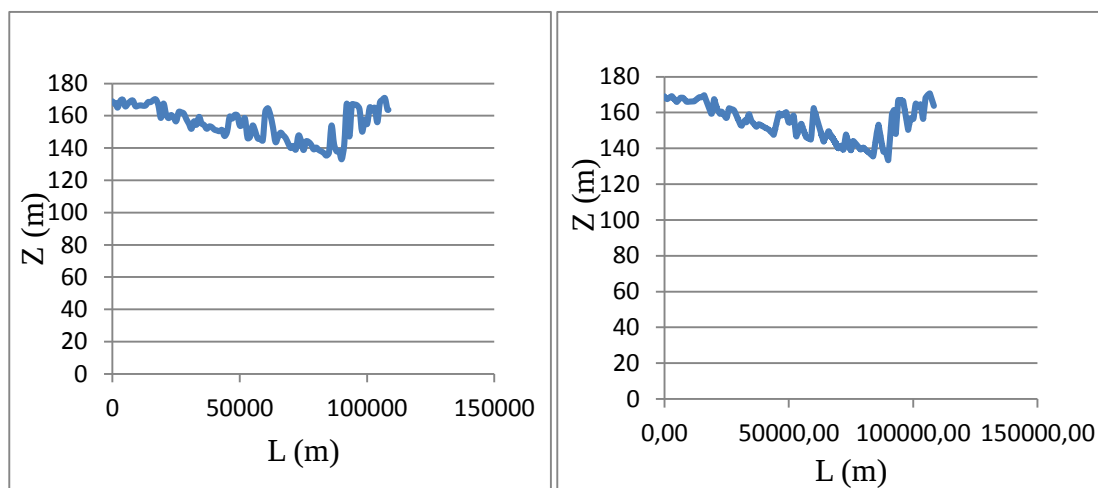


Fig. IV.1 : Profil en long communiqué par SH – Profil en long d'interpolation

IV.2 .2 Résultats de la simulation hydraulique 1

Données		
Masse volumique ρ	[kg/m ³]	818,79
Viscosité cinématique ν	[m ² /s]	1,88×10 ⁻⁶
Rugosité e	[mm]	0,0457
Débit q	[MTA]	18
	[m ³ /s]	0,7709
Diamètre extérieur D_{ext}	[mm]	660,4
Pression de refoulement P_{ref}	[bars]	60,81
Elévation du point de départ Z_o	[m]	169,01

Tab. IV.1 : Données de calcul hydraulique (Partie I)

Chapitre IV : ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE L'OH2

L	D _{int}	Z _i	$\varepsilon \times 10^{-4}$	Re I	Re II	Re	λ	P _{op}
[m]	[mm]	[mm]	[mm]					[bars]
11,4	644,3	168,99	1,4186	1 487 282,49	25 439 477,62	675 800,00	0,014	60,7983
23,24	646,9	168,97	1,4186	1 494 143,62	25 551 605,70	675 800,00	0,014	60,8004
37,47	641,9	168,94	1,4186	1 480 952,64	25 336 008,62	675 800,00	0,014	60,7929
81,66	645,9	168,87	1,4186	1 491 504,25	25 508 475,01	667 400,00	0,014	60,7757
118,29	646,1	168,81	1,4186	1 492 032,08	25 517 100,70	667 400,00	0,014	60,7606
186,85	646,1	168,70	1,4186	1 492 032,08	25 517 100,70	667 400,00	0,014	60,7319
187,62	646,1	168,70	1,4186	1 492 032,08	25 517 100,70	667 400,00	0,014	60,7316
187,77	646,1	168,70	1,4186	1 492 032,08	25 517 100,70	667 400,00	0,014	60,7316
290,33	646,5	168,53	1,4186	1 493 087,80	25 534 352,75	667 400,00	0,014	60,6897
312,51	645,9	168,50	1,4186	1 491 504,25	25 508 475,01	667 400,00	0,014	60,6789
314,26	646,1	168,49	1,4186	1 492 032,08	25 517 100,70	667 400,00	0,014	60,6788
314,33	645,9	168,49	1,4186	1 491 504,25	25 508 475,01	667 400,00	0,014	60,6782
383,87	646,3	168,38	1,4186	1 492 559,93	25 525 726,61	667 400,00	0,014	60,6504
581,88	645,9	168,06	1,4186	1 491 504,25	25 508 475,01	667 400,00	0,014	60,5660
606,23	645,9	168,02	1,4186	1 491 504,25	25 508 475,01	667 400,00	0,014	60,5558
651,31	646,1	167,94	1,4186	1 492 032,08	25 517 100,70	667 400,00	0,014	60,5380
1138,72	649,9	167,50	1,4186	1 502 065,20	25 681 031,45	667 400,00	0,014	60,3427
1161,22	649,7	167,52	1,4186	1 501 536,93	25 672 401,50	667 400,00	0,014	60,3276
1268,27	650,1	167,61	1,4186	1 502 593,49	25 689 661,62	662 500,00	0,014	60,2686
1997,26	649,7	168,26	1,4186	1 501 536,93	25 672 401,50	662 500,00	0,014	59,8346
2272,29	649,7	168,51	1,4186	1 501 536,93	25 672 401,50	662 500,00	0,014	59,6724
2386,43	650,1	168,61	1,4186	1 502 593,49	25 689 661,62	662 500,00	0,014	59,6129
2433,64	649,7	168,65	1,4186	1 501 536,93	25 672 401,50	662 500,00	0,014	59,5773
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
106633,79	652	170,60	1,4186	1507613,42	25771659,43	662500,00	0,014	7,3717
106636,58	652,2	170,60	1,4186	1508141,95	25780291,95	662500,00	0,014	7,5354
106737,39	652	170,70	1,4186	1507613,42	25771659,43	662500,00	0,014	7,3120
106743,13	651,6	170,70	1,4186	1506556,42	25754395,06	662500,00	0,014	6,9758

Tab. IV.2 : Résultats de simulation hydraulique (Partie I)

IV.2.3 Détermination des pressions réduites (norme DNV)

$$P_{\text{réd}} = P_x \left(\frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{t \left(\sqrt{1 + 0,31 \frac{l^2}{D_{\text{ext}} t}} \right)}} \right)$$

Ou :

- $P_x = \frac{2tF\sigma_r}{D_{\text{ext}} - t}$;
- σ_r : contrainte de rupture de l'acier ;
- F : facteur d'usage ($F = 0,648$) ;
- t : épaisseur de la paroi ;
- D_{ext} : diamètre extérieur du pipe ($D_{\text{ext}} = 660,4$ mm) ;
- l : longueur axiale du point de corrosion ;
- d : profondeur de point de corrosion ;

IV.2.4 Résultats de calcul des pressions réduites (norme DNV)

t	d	l	P _{réd} (DNV)
[mm]	[mm]	[mm]	[bars]
16,1	1,4	66	147,351358
13,3	2,0	20	121,198331
18,5	1,6	25	169,949836
14,5	1,4	277	132,379006
14,5	1,4	154	132,379006
14,3	1,4	222	130,512676
14,3	1,6	151	130,512676
14,3	1,4	157	130,512676
14,1	2,0	307	128,647501
14,5	1,8	1416	132,379006
14,5	1,6	23	132,379006
14,5	1,8	341	132,379006
14,1	2,4	308	128,647501
14,3	2,0	105	130,512676
14,3	1,8	198	130,512676
14,3	1,4	79	130,512676
10,5	1,7	228	95,270657
10,7	1,5	253	97,1152224
10,3	1,5	1170	93,4272266
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
8,4	3,8	164	75,9710429
8,4	2,2	1228	75,9710429
8,4	2,4	1807	75,9710429
8,4	2,6	1846	75,9710429
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
8,8	1,4	30	79,6375691
8,8	2,4	346	79,6375691
8,4	1,6	611	75,9710429
8,8	2,4	6994	79,6375691
8,6	1,4	764	77,8037435
8,6	1,8	38	77,8037435

Tab. IV.3 : Résultats de calcul des pressions réduites (norme DNV)

IV.3 Présentation de l'approche « Réseau de neurones »

La construction de notre modèle (réseau de neurones artificiels) est réalisée à l'aide du logiciel **MATLAB** au TOOLBOX (commande **nn toolbox**), ce dernier nécessite la génération d'une base de données d'un certain nombre d'échantillons, ces derniers servent à l'entraîner, en introduisant les paramètres qui influent sur le phénomène étudié comme entrées du réseau et un codage descriptif de (1, 2 et 3) qui décrit la sortie qu'on veut atteindre, dans notre cas : la priorité de réparation du défaut détecté (selon l'ERF « Estimated Reparation Factor »), pour se faire, les démarches suivantes sont poursuivies :

- Collection des données : inclut la collecte des paramètres nécessaires pour faire le calcul des pressions, puis le traitement de ces derniers pour l'aboutissement à des variables distinctes utilisées ensuite comme entrées et sorties du réseau « Inputs and Targets ».
- Apprentissage du réseau : en choisissant son architecture (nombre de couches cachées), cette étape implique la génération d'une base de données nécessaire pour l'entraînement du réseau de neurones en livrant une erreur minimale.
- Test et validation du réseau entraîné : évaluation des performances de ce dernier (pour ce faire une fraction de la base de données est utilisée).
- Utilisation du réseau entraîné pour la simulation et la prévision.

IV.3.1 Architecture du réseau

Le réseau utilisé renferme les caractéristiques suivantes :

- Une couche d'entrée : comprend 110 défauts de corrosion sous forme de vecteur de taille 12 (12 paramètres), le nombre de neurones en entrée est donc égale au nombre des paramètres agissant sur le point de corrosion.
- Une couche de sortie : comprend une seule sortie présentée sous forme descriptif ;
- Apprentissage du réseau : nécessité d'entraîner le réseau pour des performances meilleurs, une base de données représente 110 point de corrosion est utilisée pour cela comme exemple d'apprentissage.
- Couches cachées : on a opté pour une seule couche cachée, notre choix était basé sur les théories de « Napolitano » ainsi que « Sorsa et Al » qui ont démontré qu'une seule couche cachée est suffisante pour l'architecture des RDN à la classification, cela donne de meilleures performances et un temps de calcul réduit.

IV.4 Application et construction du modèle

IV.4.1 Collecte et génération des données

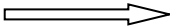
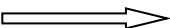
Inputs « les entrées du réseau de neurones » : sont les paramètres qui influent sur la sortie qu'on

veut déterminée :
$$ERF = \frac{P_{op}}{P_{red}} ;$$

Entrées du réseau :

- t : épaisseur de la paroi ;
- P_{ref} : la pression de refoulement du terminal départ ;
- D_{ext} : diamètre extérieur du pipe ;
- q : débit de la ligne ;
- l : longueur axiale du point de corrosion ;
- Z_i : altitude du point i du tracé ;
- Z_o : altitude du point de départ de la station ;
- ρ : masse volumique du produit ;
- d : profondeur de point de corrosion ;
- L : longueur de la conduite ;
- σ_r : la contrainte de rupture de l'acier ;
- F : le facteur d'usage ;

Outputs « les sorties du réseau de neurone » : dans notre cas, il existe une seule sortie qui est le coefficient EFR (ou la pression est calculées selon la norme DNV), transformé sous forme de codage descriptif :

- | | | |
|---|---|---------|
| - « réparation d'urgence » avec ERF > 1 ; |  | « 1 » ; |
| - « réparation programmée » avec 0,85 < ERF < 1 ; |  | « 2 » ; |
| - « réparation reportée » avec ERF < 0,85 . |  | « 3 ». |

IV.4.2 Entraînement du réseau

Une base de données qui contienne 110 points de corrosion avec les paramètres agissants sur le coefficient de réduction de pression EFR (selon la norme DNV) est fournie au réseau, l'ERF est connu (calculé) donc la criticité de réparation est connue. Le tableau suivant comprend les douze paramètres agissant sur l'ERF, ainsi que le résultat obtenu (Targets), cela est utilisé pour entraîner le réseau.

Chapitre IV : ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE L'OH2

t	d	l	P _{ref}	D _{ext}	q	Z ₀	Z _i	ρ	F	σ _r	L	Targets
[mm]	[mm]	[mm]	[bars]	[mm]	[m³/s]	[m]	[m]	[kg/m³]		[kgf/mm²]	[m]	
16,1	1,4	66	60,81	660,4	0,7709	169,01	168,99	818,79	0,648	4550	11,4	3
13,3	2	20	60,81	660,4	0,7709	169,01	168,97	818,79	0,648	4550	23,24	3
18,5	1,6	25	60,81	660,4	0,7709	169,01	168,94	818,79	0,648	4550	37,47	3
14,5	1,4	277	60,81	660,4	0,7709	169,01	168,87	818,79	0,648	4550	81,66	3
14,5	1,4	154	60,81	660,4	0,7709	169,01	168,81	818,79	0,648	4550	118,29	3
14,3	1,4	222	60,81	660,4	0,7709	169,01	168,70	818,79	0,648	4550	186,85	3
14,3	1,6	151	60,81	660,4	0,7709	169,01	168,70	818,79	0,648	4550	187,62	3
14,3	1,4	157	60,81	660,4	0,7709	169,01	168,70	818,79	0,648	4550	187,77	3
14,1	2	307	60,81	660,4	0,7709	169,01	168,53	818,79	0,648	4550	290,33	3
14,5	1,8	1416	60,81	660,4	0,7709	169,01	168,50	818,79	0,648	4550	312,51	3
14,5	1,6	23	60,81	660,4	0,7709	169,01	168,49	818,79	0,648	4550	314,26	3
14,5	1,8	341	60,81	660,4	0,7709	169,01	168,49	818,79	0,648	4550	314,33	3
14,1	2,4	308	60,81	660,4	0,7709	169,01	168,38	818,79	0,648	4550	383,87	3
14,3	2	105	60,81	660,4	0,7709	169,01	168,06	818,79	0,648	4550	581,88	3
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
9	1,8	1239	60,81	660,4	0,7709	169,01	168,06	818,79	0,648	4550	7654,27	2
8,8	1,4	451	60,81	660,4	0,7709	169,01	168,01	818,79	0,648	4550	7687,39	3
9	1,4	817	60,81	660,4	0,7709	169,01	166,63	818,79	0,648	4550	8597,25	3
9	1,4	24	60,81	660,4	0,7709	169,01	166,02	818,79	0,648	4550	9000,73	3
9	1,4	25	60,81	660,4	0,7709	169,01	166,10	818,79	0,648	4550	10073,8	3
9,2	1,2	307	60,81	660,4	0,7709	169,01	166,15	818,79	0,648	4550	10638,05	3
8,8	2,6	305	60,81	660,4	0,7709	169,01	166,15	818,79	0,648	4550	10648,39	2
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
8,8	1,6	33	60,81	660,4	0,7709	169,01	166,25	818,79	0,648	4550	11830,68	3
9	1,6	82	60,81	660,4	0,7709	169,01	166,25	818,79	0,648	4550	11839,65	3
8,8	2	125	60,81	660,4	0,7709	169,01	166,32	818,79	0,648	4550	12053,91	3

Tab. IV.4 : Base de données 1 « Entraînement »

Les paramètres d'entraînement sont comme suit :

- Nom du réseau : Net1
- Fonction de transfert :TANSIG
- Nombre couches cachées : 1
- Nombre de neurones cachés :10

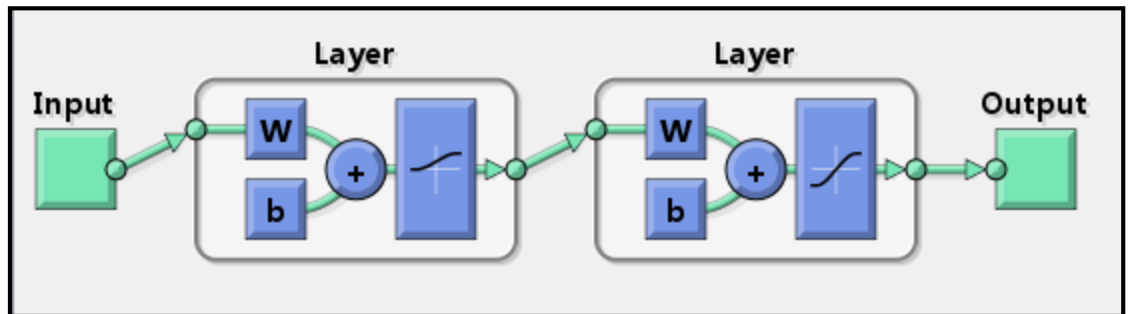


Fig. IV.2 : Réseau de neurones « Net1 »

IV.4.2.1 Résultats d'entraînement

Après entraînement du réseau à plusieurs reprises une itération était suffisante pour générer les performances suivantes (but de 0,0001) :

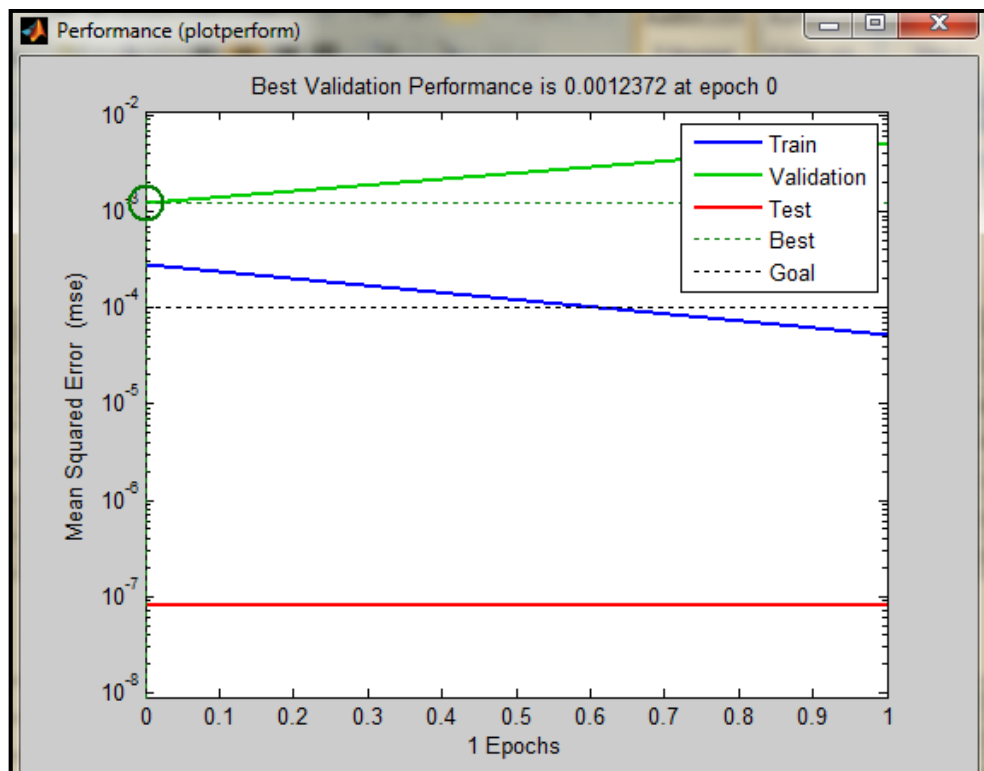


Fig. IV.3 : Performances du réseau « Net1 »

La regression linéaire entre les sorties livrées au réseau « Targets » , et les sorties du réseau « Net1_Outputs », donne de bons coefficients de regression R, les graphes ci-dessous montrent la regression accomplie dans chaque étape jusqu'au validation et test du réseau :

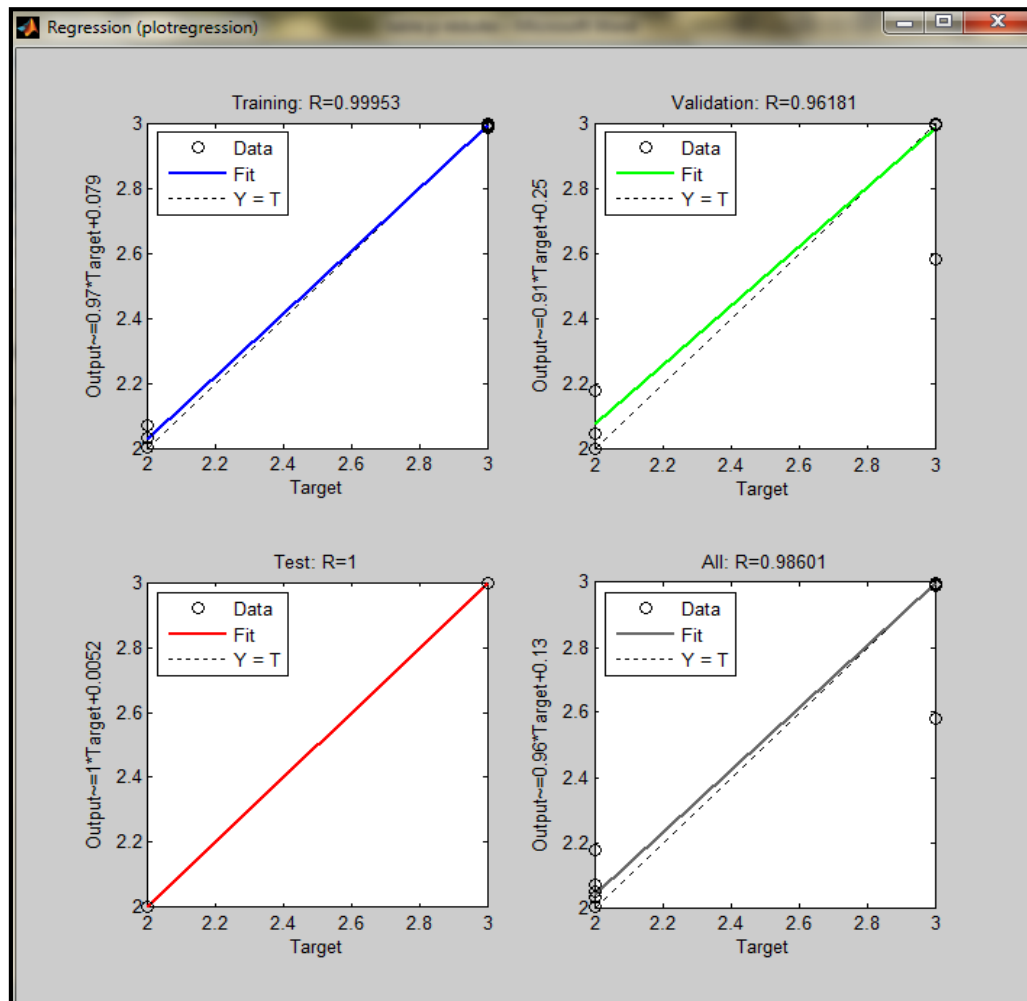


Fig. IV.4 : Regression du « Net1 »

Chapitre IV : ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE L'OH2

Les sorties données par le réseau ainsi que l'erreur entre « Targets » et « Net1_Outputs », sont repérés sur le tableau ci-dessus :

Targets	Net1-Outputs	Erreur
3	3	0
3	3	0
3	3	0
3	3	0
3	3	0
3	3	0
3	3	0
3	3	0
3	3	0
3	3	9,73E-13
3	3	0
3	3	0
3	3	0
3	3	0
3	3	0
.	.	.
.	.	.
.	.	.
3	3	1,24E-14
3	3	5,40E-13
3	2,9888	0,011206
3	3	6,48E-11
3	2,0983	0,9017
3	3	6,13E-14
2	2,1526	-0,15261
.	.	.
.	.	.
.	.	.
3	2,8927	0,10734
3	3	2,49E-14
3	3	5,15E-14
3	3	8,79E-14
3	3	6,22E-14
3	3	5,97E-09
3	3	2,53E-09

Tab. IV.5 : Résultats d'entraînement

- **Calcul de l'erreur quadratique moyenne MSE « Mean Squared Error »**

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{Erreur})^2}{N} = \frac{\sum_{i=1}^{110} (\text{Erreur})^2}{110} = 0,00771551$$

Ou :

Erreur = Targets–Net1_Outputs ;

N : Nombre de cas dans la base de données égale à 110 ;

- **Coefficients de régression (Fig. IV.4)**

$R_{\text{entraînement}} = 0,99953$; $R_{\text{validations}} = 0,96181$; $R_{\text{test}} = 1$;

$R_{\text{total}} = 0,98601$;

- **Interprétation des résultats**

La valeur du coefficient de régression R entre les sorties du réseau et les objectifs « Targets » est très proche de 1, et l'erreur MSE est faible, ces résultats permettent de dire que l'apprentissage est acceptable (pas de problème d'interpolation).

IV.4.3 Test et simulation du réseau « Net1 »

Une autre base de données est introduite au réseau de neurones, cela nous a permis de tester la fiabilité de ce dernier :

t	d	l	P _{ref}	D _{ext}	q	Z ₀	Z _i	ρ	F	σ _r	L	Targets
[mm]	[mm]	[mm]	[bars]	[mm]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[kg/m ³]		[kgf/mm ²]	[m]	
8,4	1,8	1366	60,81	660,4	0,7709	169,01	160,54	818,79	0,648	4550	23003,48	3
8,4	1,4	209	60,81	660,4	0,7709	169,01	159,75	818,79	0,648	4550	23407,47	3
8,4	1,4	322	60,81	660,4	0,7709	169,01	159,59	818,79	0,648	4550	23492,69	3
8,4	1,4	439	60,81	660,4	0,7709	169,01	159,37	818,79	0,648	4550	23606,62	3
8,4	1,4	596	60,81	660,4	0,7709	169,01	159,19	818,79	0,648	4550	23699,46	3
8,2	1,6	311	60,81	660,4	0,7709	169,01	159,08	818,79	0,648	4550	23755,61	3
8,2	1,4	595	60,81	660,4	0,7709	169,01	158,63	818,79	0,648	4550	23986,61	3
8,2	1,6	98	60,81	660,4	0,7709	169,01	158,50	818,79	0,648	4550	24053,86	3
8,4	1,6	852	60,81	660,4	0,7709	169,01	158,07	818,79	0,648	4550	24277,75	3
8,2	1,2	673	60,81	660,4	0,7709	169,01	157,87	818,79	0,648	4550	24381,05	3
8	1,6	220	60,81	660,4	0,7709	169,01	157,67	818,79	0,648	4550	24480,06	3
7,8	1,6	817	60,81	660,4	0,7709	169,01	156,94	818,79	0,648	4550	24856,11	2
8,2	1,6	244	60,81	660,4	0,7709	169,01	157,18	818,79	0,648	4550	25090,48	3
8,2	1,4	602	60,81	660,4	0,7709	169,01	157,36	818,79	0,648	4550	25120,59	3
8,4	1,4	39	60,81	660,4	0,7709	169,01	158,06	818,79	0,648	4550	25242,69	3
8,4	1,6	251	60,81	660,4	0,7709	169,01	158,07	818,79	0,648	4550	25245,39	3
8,4	1,6	196	60,81	660,4	0,7709	169,01	158,08	818,79	0,648	4550	25246,93	3
8,4	1,4	128	60,81	660,4	0,7709	169,01	158,10	818,79	0,648	4550	25249,66	3
8,4	1,4	802	60,81	660,4	0,7709	169,01	158,12	818,79	0,648	4550	25252,51	3
8,4	3	1542	60,81	660,4	0,7709	169,01	158,30	818,79	0,648	4550	25285,31	2

Tab. IV.6 : Base de données2 « Test »

IV.4.3.1 Résultats de la simulation 1

Targets	Net1-Outsim1	Erreursim1
3	2,9917	0,0082632
3	3	2,88E-10
3	3	2,77E-10
3	3	3,04E-10
3	3	3,45E-10
3	3	6,74E-10
3	3	1,60E-09
3	3	1,82E-08
3	2,9999	5,35E-05
3	3	3,67E-09
3	3	4,30E-07
2	2,042	-0,042013
3	3	3,76E-06
3	3	5,55E-08
3	3	4,12E-09
3	3	2,80E-08
3	3	3,48E-08
3	3	4,19E-09
3	3	1,39E-08
2	2	-1,44E-09

Tab. IV.7 : Résultats de simulation par Net1 (Partie I)

- **Calcul de l'erreur quadratique moyenne MSE**

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{Erreur})^2}{N} = \frac{\sum_{i=1}^{13} (\text{Erreursim})^2}{20} = 9,16688 \times 10^{-5}$$

- **Interprétation des résultats**

Les sorties générées par le réseau après simulation sont presque identiques à ceux déterminées par le calcul, l'erreur quadratique moyenne MSE est très faible, ce qui implique la grande précision de notre réseau et nous amène à l'adopter comme approche fiable pour la décision des priorités de réparation après inspection, en cas de l'ouvrage OH2 et cas similaires.

IV.5 Résultats des performances de la ligne (Partie I)

Notre modèle des réseaux de neurones nous a permis d'extraire les résultats suivants :

- 1 points de priorité de réparation « 1 » ;
- 18 points de priorité de réparation « 2 » ;
- 2928 points de priorité de réparation « 3 ».

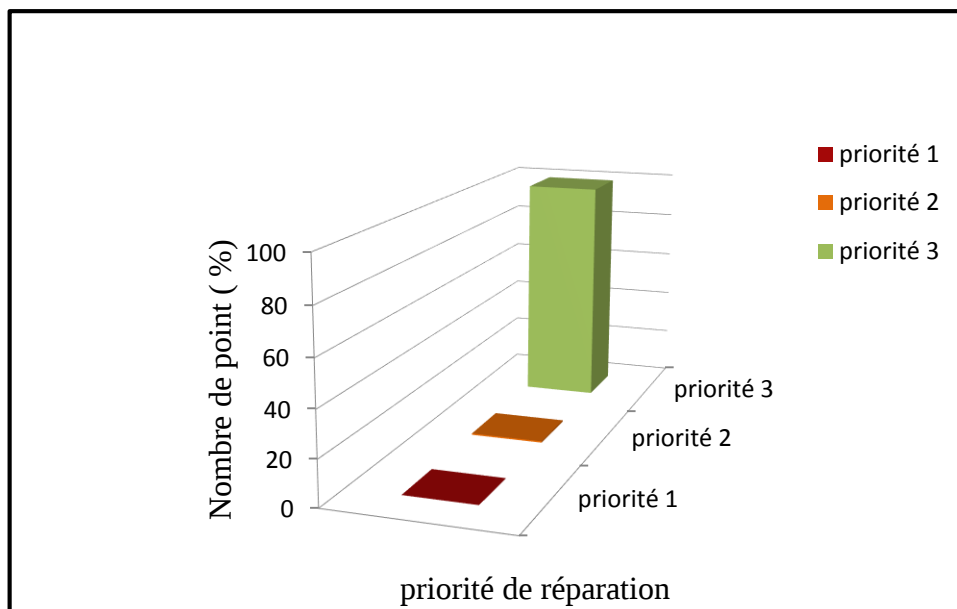


Fig. IV.5 : Représentation de pourcentage de points de corrosion selon la priorité de réparation

De plus, un calcul hydraulique permettant la détermination des pressions opératoires, un calcul selon la norme DNV (pression réduite ou nouvelle PMS) et les valeurs de la pression maximale de design de chaque point de la conduite (calculée par la formule de BARLOW) a fournis l'illustration suivante :

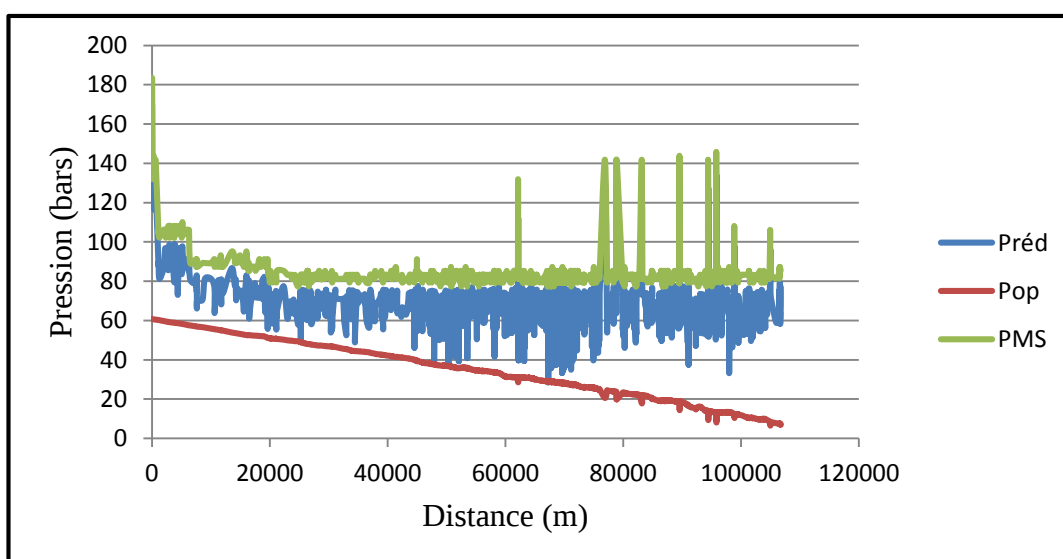


Fig. IV.6 : Courbe de la pressions (PMS, P_{op} et P_{réd}) au long de la conduite

Le graphe ci-dessus montre une chute de pression de plusieurs points de la conduite due à la corrosion, et les résultats obtenus par notre réseau présentent la nécessité de réparation de pas mal d'endroits tout au long du pipe, ce qui a amené la SONATRACH à déclasser ce dernier.

IV.6 Partie II : Evaluation des performances de la ligne après déclassement

IV.6.1 Détermination des pressions d'opération

- **Paramètres d'exploitation**

Les contraintes d'exploitation suivantes ont été prises en considération pour l'étude du procédé et le calcul des gradients hydrauliques pour les différents débits (régimes) d'exploitation :

- Pression maximale de refoulement de la station de pompage Mesdar : 30,68 bars.
- Pression maximal d'arrivée au niveau de HEH : 5 bars.
- Facteur de charge : 330 jours/an.
- Débit de la ligne : 12 MTA.

- **Calcul hydraulique**

Le calcul des pertes de charge dans la ligne est fait en considérant le produit liquide et monophasique et en utilisant le logiciel PIPEPHASE version 9.2.

Les paramètres des simulations sont :

- Formule de calcul de pertes de charges en régime turbulent : Moody.
- Limite du régime turbulent type tube lisse: Nombre de Reynolds $3000 < Re < Re_I$
- Le fluide est supposé être newtonien.
- Condition isothermes tout le long de la ligne.

IV.6.2 Résultats de la simulation hydraulique 2

Données		
Masse volumique ρ	[kg/m ³]	818,79
Viscosité cinématique ν	[m/s ²]	$1,88 \times 10^{-6}$
Rugosité e	[mm]	0,0457
Débit q	[MTA]	12
	[m ³ /s]	0,5151
Diamètre extérieur D_{ext}	[mm]	660,4
Pression de refoulement P_{ref}	[bars]	30,68
Elévation du point de départ Z_o	[m]	169,01

Tab. IV.8 : Données de calcul hydraulique (partie II)

Chapitre IV : ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE L'OH2

L	D _{int}	Z _i	$\varepsilon \times 10^{-4}$	Re I	Re II	Re	λ	P _{op}
[m]	[mm]	[m]	[mm]					[bars]
11,4	644,3	168,99	1,4186	1487282,49	25439477,62	449700,00	0,015	30,6788953
23,24	646,9	168,97	1,4129	1494143,62	25551605,70	449700,00	0,015	30,6777961
37,47	641,9	168,94	1,4239	1480952,64	25336008,62	449700,00	0,015	30,6765435
81,66	645,9	168,87	1,4151	1491504,25	25508475,01	441500,00	0,015	30,6720639
118,29	646,1	168,81	1,4146	1492032,08	25517100,70	441500,00	0,015	30,6683222
186,85	646,1	168,7	1,4146	1492032,08	25517100,70	441500,00	0,015	30,6610784
187,62	646,1	168,7	1,4146	1492032,08	25517100,70	442000,00	0,015	30,6608978
187,77	646,1	168,7	1,4146	1492032,08	25517100,70	442000,00	0,015	30,6608626
290,33	646,5	168,53	1,4138	1493087,80	25534352,75	442000,00	0,015	30,6506747
312,51	645,9	168,5	1,4151	1491504,25	25508475,01	442000,00	0,015	30,6475586
314,26	646,1	168,49	1,4146	1492032,08	25517100,70	440800,00	0,015	30,6480649
314,33	645,9	168,49	1,4151	1491504,25	25508475,01	440800,00	0,015	30,6479343
383,87	646,3	168,38	1,4142	1492559,93	25525726,61	440800,00	0,015	30,6407141
581,88	645,9	168,06	1,4151	1491504,25	25508475,01	440800,00	0,015	30,6196278
606,23	645,9	168,02	1,4151	1491504,25	25508475,01	440800,00	0,015	30,6171211
651,31	646,1	167,94	1,4146	1492032,08	25517100,70	440800,00	0,015	30,6131946
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
106633,79	652	170,6	1,4018	1507613,42	25771659,43	440800	0,015	6,65476726
106636,58	652,2	170,6	1,4014	1508141,95	25780291,95	440800	0,015	6,69076189
106737,39	652	170,7	1,4018	1507613,42	25771659,43	440800	0,015	6,62351731
106743,13	651,6	170,7	1,4027	1506556,42	25754395,06	440800	0,015	6,54871524

Tab. IV.9: Résultats de simulation hydraulique (Partie II)

IV.6.3 Résultats de calcul des pressions réduites (norme DNV)

t	d	l	P _{réd} (DNV)
[mm]	[mm]	[mm]	[bars]
16,1	1,4	66	147,351358
13,3	2,0	20	121,198331
18,5	1,6	25	169,949836
14,5	1,4	277	132,379006
14,5	1,4	154	132,379006
14,3	1,4	222	130,512676
14,3	1,6	151	130,512676
14,3	1,4	157	130,512676
14,1	2,0	307	128,647501
14,5	1,8	1416	132,379006
14,5	1,6	23	132,379006
14,5	1,8	341	132,379006
14,1	2,4	308	128,647501
14,3	2,0	105	130,512676
14,3	1,8	198	130,512676
14,3	1,4	79	130,512676
10,5	1,7	228	95,270657
10,7	1,5	253	97,1152224
10,3	1,5	1170	93,4272266
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
8,4	3,8	164	75,9710429
8,4	2,2	1228	75,9710429
8,4	2,4	1807	75,9710429
8,4	2,6	1846	75,9710429
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
8,8	1,4	30	79,6375691
8,8	2,4	346	79,6375691
8,4	1,6	611	75,9710429
8,8	2,4	6994	79,6375691
8,6	1,4	764	77,8037435
8,6	1,8	38	77,8037435

Tab. IV.10 : Résultats de calcul des pressions réduites (norme DNV)

IV.6.4 Résultats de la simulation 2

Les résultats fournis par le réseau de neurone, pour les données de cette deuxième partie sont repérées ci-dessous (fraction de données) :

Out 2	Net1-Outsim2	Erreursim2
3	2,9786	0,0214
3	2,9333	0,0667
3	2,9485	0,0515
3	2,8675	0,1325
3	2,9977	0,0023
3	2,9794	0,0206
3	2,8296	0,1704
3	2,912	0,088
3	2,8977	0,1023
3	2,9369	0,0631
3	2,9426	0,0574
3	2,9475	0,0525
3	2,8882	0,1118
3	2,9018	0,0982
3	2,9521	0,0479
3	2,8674	0,1326
3	2,9256	0,0744
3	2,8183	0,1817
3	2,9938	0,0062
3	2,9789	0,0211
3	2,8609	0,1391
3	2,909	0,091

Tab. IV.11 : Résultats de simulation par Net1 (Partie II)

- **Calcul de l'erreur quadratique moyenne MSE**

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{Erreur})^2}{N} = \frac{\sum_{i=1}^{13} (\text{Erreursim})^2}{22} = 0.001256$$

IV.7 Résultats des performances de la ligne (Partie II)

Notre modèle des réseaux de neurones nous a permis d'extraire les résultats suivants :

- 2947 points de priorité de réparation « 3 ».

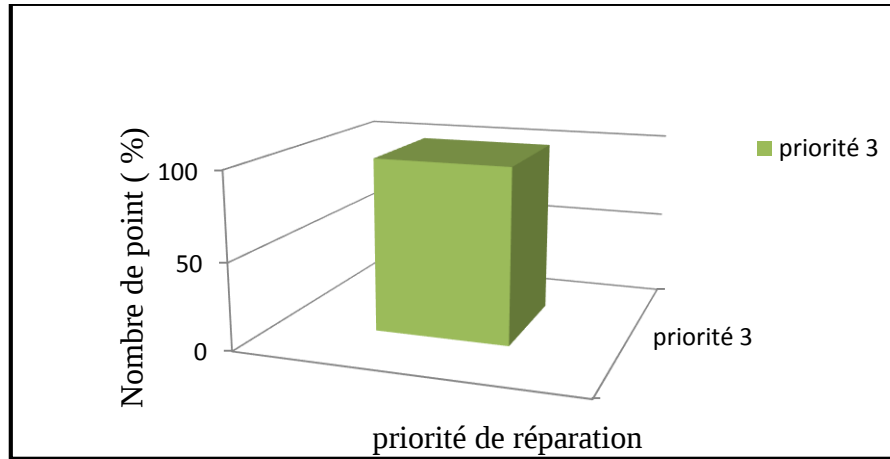


Fig. IV.7 : Représentation de pourcentage de points de corrosion selon la priorité de réparation

De plus, nos simulations et calculs offrent le graphe suivant :

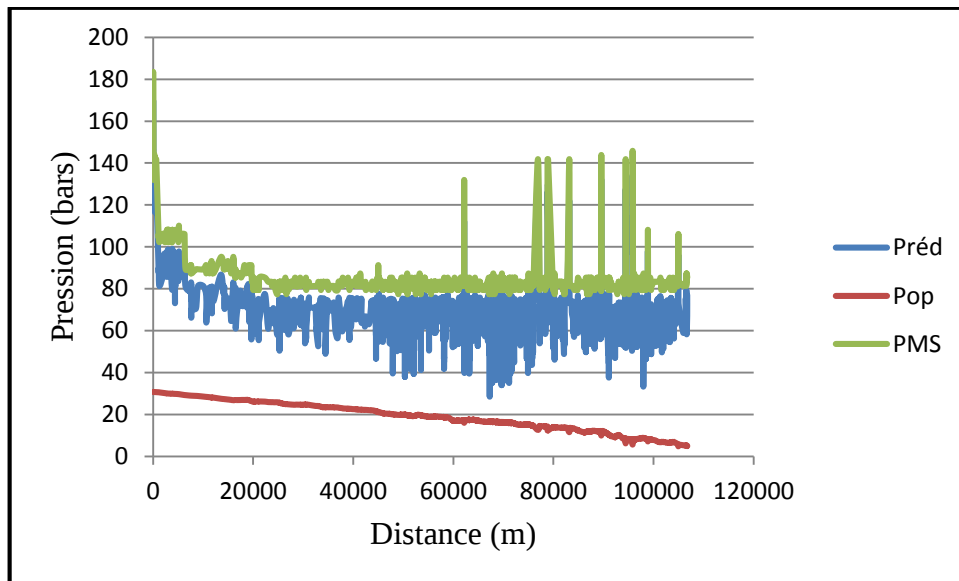


Fig. IV.8 : Courbe des pressions (PMS, P_{op} et $P_{réd}$) au long de la conduite

- **Interprétation des résultats**

Après analyse des données et déduction des pressions d'opérations et réduites (nouvelle PMS), nous remarquons l'absence des points nécessitant une réparation d'urgence et de deuxième degré, cela est soutenu par la (Fig. IV.8) qui montre le bon fonctionnement du pipe à une pression de refoulement de 30,68 bars ($P_{op} < P_{réd}$).

IV.8 Conclusion

L'évaluation des performances de la ligne OH2, était établie en deux parties en adoptant une approche des RNA :

La première consiste à vérifier le fonctionnement à pleine capacité en présence de la corrosion, l'utilisation de l'approche des réseaux de neurones, nous a permis de réduire le temps de calcul, en donnant directement le résultat attendu (criticité de défaut selon sa priorité de réparation) en entraînant le réseau et après obtention des résultats très satisfaisantes, l'approche des réseaux de neurones (Net1) est conçue d'être utilisée comme modèle informatisé permettant la soustraction de criticité des défauts de corrosion repérés sur la ligne OH2 et cas similaires (en particulier en deuxième partie), ce qu'on peut extraire après l'analyse réalisée est la présence d'un risque soit de rupture, soit d'éclatement de la canalisation en plusieurs endroits, le déclassement de la ligne était un choix fatal.

En deuxième partie, l'adoption de réseau de neurones (Net1), était directe, ce qui a livré des résultats permettant de juger le fonctionnement de la ligne après déclassement, selon les résultats obtenus nous avons trouvés qu'il n'y a plus de risque ni de rupture ni d'éclatement mais il est toujours recommandé de prévoir la réparation des quelques points de corrosion à long terme, notre pipe OH2 travail en toute sécurité pour une pression de refoulement de 30,68 bars.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Après accomplissement des différentes étapes de notre travail, qui est la réalisation d'une étude détaillée concernant les performances d'un oléoduc (OH2) dévalué par l'effet de la corrosion, avant et après déclassement, pour y parfaire, on avait recours à une des techniques éprouvés dans le domaine industriel : « les réseaux de neurones ».

A l'issu de l'étude achevée, on admit que l'évaluation des performances d'une canalisation de transport des hydrocarbures est une démarche indispensable qui permet d'éviter les risques menaçants l'environnement et les humains.

A partir des résultats obtenus dans la partie de calcul, on admet qu'un réseau de neurones « Net1 » est efficace pour la quantification et la classification des défauts de corrosion sans avoir appel à des calculs ni hydrauliques ni par les normes de détermination des pressions réduites.

RECOMMANDATIONS

On recommande à la SONATRACH d'approuver un modèle des réseaux de neurones fiable pour le diagnostic des défauts de corrosion sur l'oléoduc OH2 et cas similaire, cela permettra aux exploitants de réduire le temps de calcul et offre une approche de jugement des priorités de réparations des défauts.

On recommande aussi de réaliser des études similaires à la nôtre pour tous les pipelines Algériens, cela permettra aux ingénieurs de la SONATRACH le traitement des bases de données énormes.

On recommande également la possibilité d'augmenter la capacité de l'ouvrage OH2 en cas d'accroissement de production des champs de ravitaillement.

BIBLIOGRAPHIE

1. DJEDID Ibrahim : **Étude sur les défaillances des aciers API-5LX60 pour pipeline**, mémoire de fin d'étude 2013, Université ABOU BEKR BELKAID, TELMCEN.
2. AMMAR Mohamed Yassine : **Mise en œuvre des réseaux de neurone pour la modélisation de cinétique réactionnelles en vue de la transports BATCH/continu**, thèse de Doctorat 2007.
3. KADOUS Djamil : **Utilisation des réseaux de neurones artificiels comme outil de dataming : génération de modèle comportemental d'un processus physique à partir de données**, mémoire de fin d'étude 2012, ABOU BEKR BELKAID, TELMCEN.
4. BELLAHCENE Tassadit : **Étude de nocivité des défauts dans les canalisations sous environnement hydrogène**, thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri TIZI OUZOU.
5. OUKACINE Nacima : **Utilisation des réseaux de neurones pour la reconstitution de défauts en évaluation non destructive**, mémoire de Magister 2012, Université de Mouloud Mammeri TIZI OUZOU.
6. AGGOUNE Fateh : **Évaluation de l'endommagement des tubes dans leurs conduites d'exploitation**, mémoire de Magister 2010, Université MENTOURI CONSTANTINE.
7. CECIL Adam : **Inspection des pipelines par racleurs instrumentés : société du pipeline méditerranée- Rhône**.
8. WIRA Patrice : **Réseaux de neurones : architectures et application**, Université de Haut Alsace-Labo 2009.
9. **Spécifications and requirements for intelligent pig inspection of pipelines**, Version 3.2, January 2005.
10. Cours de Réhabilitation M^r YOUNSI.
11. Cours de Construction des pipelines M^r BOUALI.
12. Cours de Contrôle et monitoring M^r TIKOUBAINI.
13. Brochure de Transport par pipelines M^r BENMOUNAH.

14. Recommended Practice DNV-RP-F101: **Corroded Pipelines**, October 2004.
15. BERNARD Gosselin : **Application de réseaux de neurones artificiels à la reconnaissance automatique de caractère manuscrits**, année académique 95-96.
16. MICHAEL A. Arbib: **The handbook of brain theory and neural networks**.

1. FORMULE DE BASE :

La différence de pression entre deux points d'une conduite de longueur L est donnée par la formule suivante :

$$\Delta P = (iL + \Delta Z)\rho g 10^{-5}$$

$$\Delta P = \left[\left(\frac{8 \lambda q^2}{g \pi^2 D_{\text{ext}}^5} \right) L + (Z_i - Z_0) \right] \rho g 10^{-5}$$

Ou :

i: La pente hydraulique du profil;

L : La longueur de la conduite[m];

ΔZ : Différence d'altitudes entre les deux points;

ρ : Masse volumique du fluide[kg/m³];

λ : Coefficient de friction ;

q: Débit volumique [m³/s] ;

D_{ext} : Diamètre intérieur de la conduite ;

$g = 9.81$ [m/s²] ;

2. NOMBRE DE REYNOLDS :

On détermine le régime d'écoulement du fluide dans la conduite par le nombre de REYNOLDS :

$$Re = \frac{V D_{\text{ext}}}{\nu} = \frac{4 q}{\pi D_{\text{ext}} \nu}$$

Ou :

V: vitesse moyenne d'écoulement [m/s];

ν : viscosité cinématique du fluide [m²/s] ;

Dans les écoulements des oléoducs, on trouve seulement le régime turbulent qui se divise en 03 zones :

- Zone de tubes lisses $2320 < Re \leq Re I$
- Zone de frottement mixte $Re I < Re \leq Re II$
- Zone de frottement quadratique $Re > Re II$

Ou : $Re I$ et $Re II$ sont déterminés par les formules ci-dessous :

$$Re I = \frac{59.5}{\varepsilon^{8/7}}$$

$$Re II = \frac{665 - 765 \log \varepsilon}{\varepsilon}$$

Tel que : $\varepsilon = \frac{e}{D_{ext}}$: La rugosité relative de la conduite exprimée en fonction de la rugosité équivalente « e » et du diamètre « D_{ext} ».

3. COEFFICIENT DE FRICTION « λ » :

- Pour la zone de tubes lisses le coefficient de friction est donné par la formule de BLASIUS :

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$$

- Pour la zone de frottement mixte le coefficient est donné par la formule d'ALTCHOUL :

$$\lambda = 0.11 \left(\varepsilon + \frac{68}{Re} \right)^{0.25}$$

- Pour la zone de frottement quadratique le coefficient de friction est donné par :

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{68}{Re} \right)^{0.25}$$

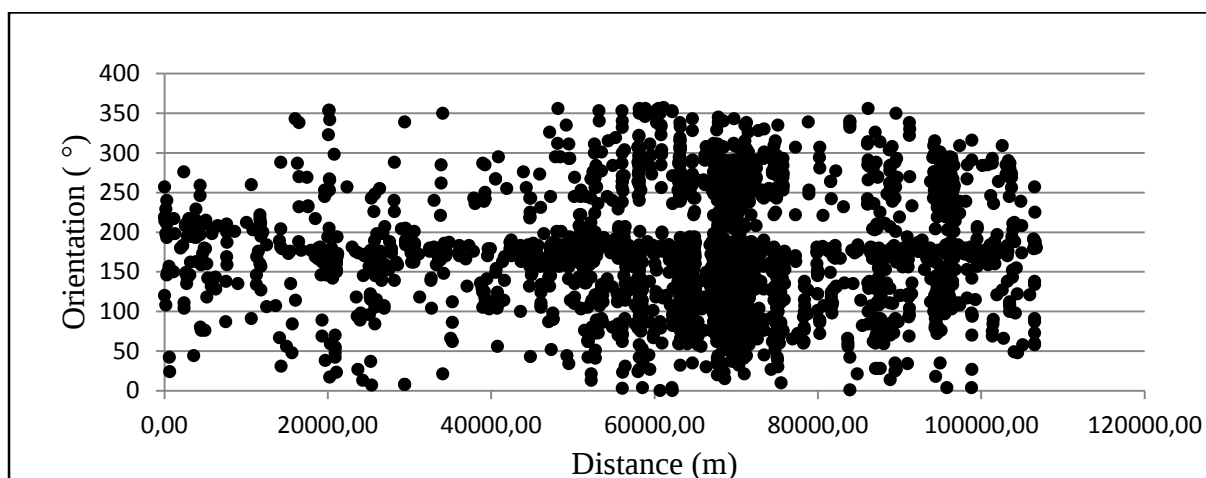
1. DISTRIBUTION DES PERTES DE METAL AU LONG DE LA CONDUITE :

Fig. III.6 : Distribution de la perte de métal (l'orientation en fonction de la distance)

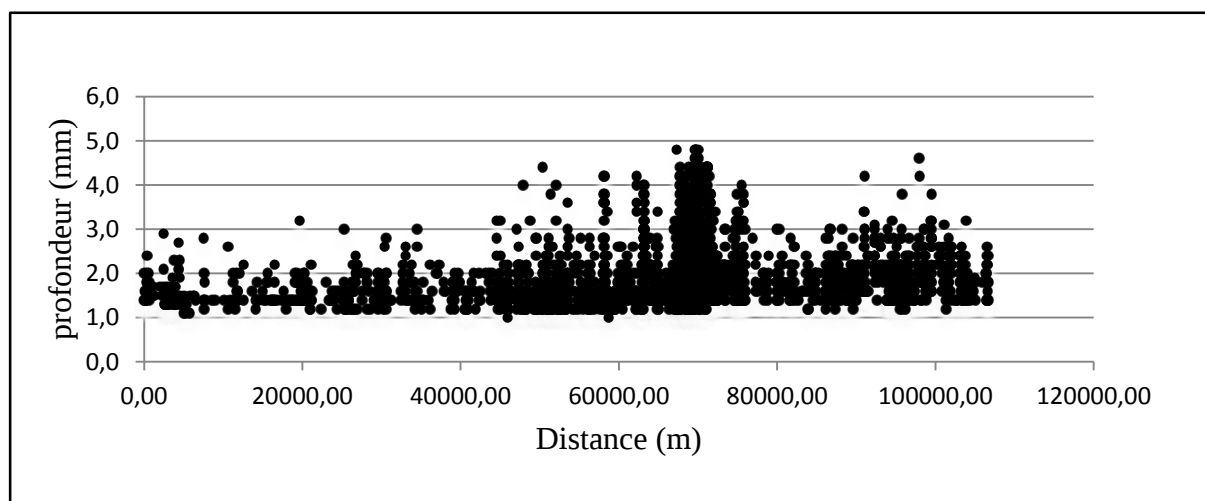


Fig. III.7 : Distribution de la perte de métal (la profondeur en fonction de la distance)