

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES



Faculté des hydrocarbures et de la chimie  
Département : Transport et équipement pétroliers

**Mémoire de Master**

Présenté par :

*MERAOUNA Chahrazed*

*ACHOUR Lila*

**En vue de l'obtention du diplôme MASTER**

**Filière :** Hydrocarbures

**Option :** Transport et distribution des hydrocarbures

*Thème*

*Analyse structurale probabiliste d'un gazoduc corrodé  
sur la base d'une seule inspection en régime  
stationnaire et transitoire*

Devant le jury composé de :

...

Président

...

Examineur

...

Examineur

**YOUNSI Karim**

Encadreur

*Année universitaire : 2015/2016*

# *Remerciements*

*Nous tenons particulièrement à remercier notre Directeur de mémoire, le Docteur K.YOUNSI pour nous avoir dirigé, conseillé et encouragé durant la réalisation de notre mémoire malgré ses autres occupations. Merci pour votre convivialité même dans les moments difficiles, votre souplesse qui a su nous laisser une large marge de liberté pour mener à bien ce travail de recherche.*

*Nous souhaitons remercier cordialement le Prof. BOUALI, et Mr CHEBOUBA que nous souhaitons le rétablissement le plutôt possible, tous les enseignants qui nous ont fait l'amitié de répondre à certaines de nos questions ainsi que tous les enseignants qui nous ont suivi durant les cinq années.*

*Nos vifs remerciements vont également au président de jury et aux membres de jury.*

*Un grand merci pour nos familles, pour leur soutien moral, leur aide, leur assistance et l'encouragement qu'elles nous ont prodigué.*

*Nous tenons à remercier aussi tous nos amis(es). Nous leur exprimons notre profonde sympathie et nous leur souhaitons beaucoup de bien.*

# *Dédicace*

*À ma chère mère, humble hommage et sincère gratitude pour son sacrifice, son affection, son dévouement durant la réalisation de ce travail et durant toute ma vie.*

*À la mémoire de mon cher défunt père qui était la lumière de mon chemin et que j'aurai tant aimé qu'il soit présent.*

*À mon cher oncle paternel que dieu se protège et Mzakou.*

*À mes grands-mères et mon grand-père*

*À mes adorables sœurs et frère y compris Dodo et Adel.*

*À mes oncles et tantes, spécialement oncle Malek et tante Lina.*

*À mes cousins et cousines.*

*À mes amis (es) et le groupe MASHU.*

*À mon binôme qui est aussi ma meilleure amie, qui m'a supporté toute cette période et à sa famille.*

*Et à tous ceux que je connais.*

*Lila ACHOUR*

## *Liste des figures*

---

### *CHAPITRE I*

Fig. I.1 : Causes de rupture des pipelines (1991-2008)

Fig. I.2 : corrosion interne d'un tube

Fig. I.3: la corrosion externe d'une canalisation

Fig. I.4 : Racleur MFL

### *CHAPITRE II*

Fig. II.1 : Illustration des différents domaines de risque à partir de la probabilité vis-à-vis de la gravité de conséquences.

Fig. II.2 : Distribution de contrainte et de résistance

Fig. II.3 : Illustration des concepts de domaines de défaillance, de sûreté et surface d'état limite dans le cas bidimensionnel

Fig. II.4 : Interprétation géométrique de l'indice de fiabilité de Cornell  $\beta_c$

Fig. II.5 : Interprétation géométrique de l'indice de fiabilité de Hasofer et Lind  $\beta_{HL}$

Fig. II.6 : Principe de la méthode FORM. Les cercles concentriques représentent les iso-valeurs de la densité de probabilité Gaussienne standard.  $\tilde{F}$  est le domaine de défaillance approximé.

### *CHAPITRE IV*

Fig. IV.1 : Dilatation de la conduite

### *CHAPITRE V*

Fig. V.1 : Démarche de l'approche point par point pour le cas d'une seule inspection

Fig. V.2 : La répartition des défauts en fonction de la longueur

Fig. V.3 : Distribution de la loi a priori de la longueur de perte de métal.

Fig. V.4 : Distribution de la loi a priori de la profondeur de perte de métal.

Fig. V.5 : Distribution a posteriori de la vitesse de perte de métal selon la longueur.

Fig. V.6 : Distribution a posteriori de la vitesse de corrosion selon la profondeur.

Fig. V.7 : Distribution de la longueur de perte de métal en tenant compte de l'erreur de mesure.

Fig. V.8 : Distribution de la profondeur de perte de métal en tenant compte de l'erreur de mesure

Fig. V.9 : Distribution de la profondeur de perte de métal pour  $\tau=5 an$

Fig. V.10 : L'enveloppe de la pression d'opération

Fig. V.11 : Distribution de la courbe de charge

Fig. V.12 : Représentation de contrainte  $\cap$  résistance

Fig. V.13 : Représentation graphique de la probabilité de défaillance

Fig. V.14 : Probabilité de défaillance des défauts de corrosion en régime stationnaire pour la 5<sup>ème</sup> année

Fig. V.15 : Représentation plan de la probabilité de rupture et de l'état limite.

Fig. V.16 : Probabilité de défaillance des kilomètres en régime stationnaire pour la 5<sup>ème</sup> année.

Fig. V.17 : Evolution de la profondeur de perte de métal en fonction des années.

Fig. V.18 : Evolution de la longueur de perte de métal en fonction des années.

Fig. V.19 : L'évolution de la probabilité de défaillance du neuvième kilomètre en fonction du temps

Fig. V.20 : Evolution de la pression le long du premier tronçon du gazoduc suite à la fermeture de la vanne *PSI*

Fig. V.21 : Evolution de la pression en début et fin du premier tronçon du gazoduc suite suite à une fermeture de la vanne *PSI*.

Fig. V.22 : Enveloppe de la pression maximale en transitoire le long du gazoduc.

Fig. V.23 : Distribution de la pression en régime stationnaire et transitoire.

Fig. V.24 : Probabilité de défaillance des défauts de corrosion en régime transitoire pour la 5<sup>ème</sup> année.

Fig. V.25 : Probabilité de défaillance des kilomètres en régime transitoire pour la 5<sup>ème</sup> année.

Fig. V.26 : Probabilité de défaillance d'un défaut de corrosion de type piqure localisé au milieu et à la fin du gazoduc

Fig. V.27 : Probabilité de défaillance d'un défaut de corrosion de type cratère localisé au milieu et à la fin du gazoduc

Fig. V.28 : Détermination du point de conception par la méthode FORM : vue en dessus.

Fig. V.29 : Représentation de l'évolution de la perte de métal critique et de la profondeur de la perte

Fig. V.30 : Représentation de l'évolution de la perte de métal critique et de la profondeur de la perte de métal en régime transitoire d'un défaut de corrosion type cratère.

Fig. V.31 : Nombre de défaut à réparer sur 25 ans selon le régime transitoire.

Fig. V.32: Nombre de défaut à réparer sur 25 ans selon le régime stationnaire

Fig. V.33 : Nombre de défaut à réparer sur 25 ans en considérant que tous les défauts de la première année ont été réparés selon le régime stationnaire.

Fig. V.34 : Nombre de défaut à réparer sur 25 ans en considérant que tous les défauts de la première année ont été réparés selon le régime transitoire.

## *Liste des tableaux*

---

Tab V.1 : Caractéristiques du défaut situé au PK8.9562

Tab V.2 : Echantillon de contrainte d'élasticité

Tab V.3 : Echantillon de l'épaisseur

Tab V.4 : Echantillon de  $G$

Tab V.5 : Echantillon de la  $PMS$

Tab V.6: Caractéristiques des défauts du neuvième kilomètre.

Tab V.7 : Les coefficients des modèles de la courbe

Tab V.8 : Probabilité de défaillance du neuvième kilomètre avant et après réparation ainsi que le nombre de réparation en régime transitoire

## *Nomenclature*

---

$\mu_{pr}$  : Moyenne de la loi a priori

$\sigma_{pr}$  : Ecart type de la loi a priori [*mm/an*]

$\mu_{vr}$  : Moyenne de la vraisemblance [*mm/an*]

$\sigma_{vr}$  : Ecart type de la vraisemblance [*mm/an*]

$V_{min}$  : Vitesse minimale de la perte de métal [*mm/an*]

$V_{max}$  : Vitesse maximale de la perte de métal [*mm/an*]

$T_{exp}$  : Durée d'exploitation jusqu'à l'inspection [*an*]

$l'$  : Perte de métal dans le sens longueur [*mm*]

$d'$  : Perte de métal dans le sens profondeur [*mm*]

$\mu_{pos}$  : Moyenne de la loi a posteriori [*mm/an*]

$\sigma_{pos}$  : Ecart type de la loi a posteriori [*mm/an*]

$\mu_{l'}$  : Moyenne de la perte de métal dans le sens longueur [*mm*]

$\sigma_{l'}$  : Ecart type de la perte de métal dans le sens longueur [*mm*]

$\mu_{d'}$  : Moyenne de la perte de métal dans le sens profondeur [*mm*]

$\sigma_{d'}$  : Ecart type de la perte de métal dans le sens profondeur [*mm*]

$\mathcal{E}$  : Erreur de mesure

$\mu_{\mathcal{E}}$  : Moyenne de l'erreur de mesure [*mm*]

$\sigma_{\mathcal{E}}$  : Ecart type de l'erreur de mesure [*mm*]

$\mu_l$  : Moyenne de la perte de métal dans le sens longueur en tenant compte de l'erreur de mesure [*mm*]

$\sigma_l$  : Ecart type de la perte de métal dans le sens longueur en tenant compte de l'erreur de mesure [*mm*]

$\mu_d$  : Moyenne de la perte de métal dans le sens profondeur en tenant compte de l'erreur de mesure [*mm*]

$\sigma_d$  : Ecart type de la perte de métal dans le sens profondeur en tenant compte de l'erreur de mesure [*mm*]

$\mu_{d(cr)}$  : Moyenne de la perte de métal critique [*mm*]

$\sigma_{d(cr)}$  : Ecart type de la perte de métal critique [*mm*]

$\tau$  : Le temps [*an*]

$\mu_{d(\tau)}$  : Moyenne de la perte de métal dans le sens profondeur en fonction du temps [ $mm$ ]

$\sigma_{d(\tau)}$  : Ecart type de la perte de métal dans le sens profondeur en fonction du temps [ $mm$ ]

$\sigma_e$  : Contrainte d'élasticité [ $kgf/cm^2$ ]

$\mu_e$  : Moyenne de la contrainte d'élasticité [ $kgf/cm^2$ ]

$\sigma_e$  : Ecart type de la contrainte d'élasticité [ $kgf/cm^2$ ]

**COV** : Coefficient de variation

**t** : Epaisseur [ $mm$ ]

$\mu_t$  : Moyenne de l'épaisseur [ $mm$ ]

$\sigma_t$  : Ecart type de l'épaisseur [ $mm$ ]

**PMS** : Pression maximale de service [ $bar$ ]

$k_s$  : Coefficient de sécurité

$D_{ex}$  : Diamètre extérieur du gazoduc [ $mm$ ]

$P_{op(x)}$  : Pression d'opération au point x en régime permanent [ $bar$ ]

**X** : Position du défaut [ $m$ ]

**L** : Longueur du gazoduc [ $m$ ]

$P_{ref}$  : Pression de refoulement de la station [ $bar$ ]

$P_{asp}$  : Pression d'aspiration de la station [ $bar$ ]

**M** : Facteur de Folias pour la norme B31G

$\left(\frac{d}{t}\right)_{cr}$  : Perte de métal critique [%]

$\mu_M$  : Moyenne de la fonction d'état limite [ $mm$ ]

$\sigma_M$  : Ecart type de la fonction d'état limite [ $mm$ ]

$P_{déf}$  : Probabilité de défaillance

$\beta$  : L'indice de fiabilité

$P_{déf/km}$  : Probabilité de défaillance par kilomètre

**P** : Pression d'opération en régime transitoire [ $bar$ ]

$\emptyset$  : Loi normale standard réduite.

## **Introduction :**

Les pipelines sont l'un des moyens les plus utilisés pour le transport de gaz dans le monde. Ils s'avèrent coûteux et parfois difficiles à mettre en œuvre selon les caractéristiques des terrains traversés. Au contraire de leur investissement initial, leur utilisation est relativement peu coûteuse par rapport à d'autres formes de transport concurrent, au moins sur de petites et moyennes distances.

Pendant le service, la durée de vie du pipeline dépend d'un certain nombre de facteurs, conditions de fonctionnement, les défauts de construction, la corrosion et les mouvements du sol. Dans notamment, la corrosion constitue une cause importante engendrant la défaillance d'un pipeline. Malgré le grand progrès dans les techniques de protection cathodique et des procédés de revêtement interne et externe, la corrosion des pipelines reste parmi les principales difficultés auxquelles se heurte la gestion des réseaux de gaz.

Les défaillances des pipelines peuvent avoir d'énormes impacts négatifs sur les entreprises, l'environnement et la société. Donc, leur fiabilité est une préoccupation majeure dans le domaine de l'ingénierie, la littérature existante se concentre en grande partie sur les influences de la corrosion sur les défaillances de pipelines et le mécanisme de défaillance du point de vue matériel.

En raison de la dégradation, les pipelines sont soumis à divers opérations d'inspection.

La haute résolution des techniques actuelles d'inspection en ligne, permet à l'opérateur une évaluation précise de l'intégrité du pipeline. Les équipements basés sur ces techniques peuvent localiser tous les types de défauts le long de la ligne. Ces inspections permettent non seulement la localisation des défauts de corrosion mais également leurs dimensions, ce qui révèle en fait la nature de la corrosion et la sévérité du danger.

Pour un contrôle efficace, une inspection supplémentaire répétée permet de préciser le diagnostic, mais surtout l'évolution dans le temps des dégradations et donc la possibilité d'une évaluation à long terme de l'état de la conduite. Cependant, un bon nombre des canalisations se trouvent inspectées une seule fois, cas pratique de notre gazoduc.

Deux principales méthodes sont généralement appliquées pour éviter la défaillance d'un pipeline. La première est déterministe. La seconde est connue sous l'approche probabiliste, où le caractère

stochastique des variables de la structure et de l'environnement est considéré, et la probabilité de défaillance du pipeline est évaluée aux différents stades de fonctionnements.

Nous présenterons dans ce travail une approche de calcul de probabilité de défaillance pour le gazoduc GZ2, en tenant compte des différents régimes d'écoulement stationnaire et transitoire, suivant une démarche défaut par défaut dans le cas d'une seule inspection en s'appuyant sur une technique d'inférence bayésienne.

Pour se faire, nous adopterons une analyse fiabilité structurale, cette approche implique l'utilisation d'estimations probabilistes sur la base de techniques de la mécanique de rupture pour calculer la probabilité de défaillance.

On abordera également l'impact du régime d'écoulement transitoire causé par la fermeture brusque d'une vanne sur le risque de défaillance, ainsi que des exemples d'applications afin d'évaluer la probabilité de défaillance du gazoduc dans les deux régimes d'écoulements.

# *Les modes de dégradation des pipelines et méthodes de détection des défauts*

## **I.1 Dégradation par corrosion:**

### **I.1.1 Introduction :**

La corrosion est le phénomène de dégradation le plus répandu dans les unités industrielles. Il est à l'origine de la majorité des défaillances d'équipements sous pression.

On estime que la corrosion détruit un quart de la production annuelle mondiale d'acier, ce qui représente environ 150 millions de tonnes par an ou encore 5 tonnes par seconde.

La corrosion engendre, aussi bien pour les particuliers que pour les sociétés industrielles et les états, des coûts de renouvellement très importants, des conséquences techniques fâcheuses, et des risques pour l'homme lui-même. La corrosion sévit dans tous les domaines d'activité, mais c'est peut-être dans les industries gazières et pétrolières qu'elle montre le plus son caractère pernicieux : généralement enterrés, inaccessibles à l'examen, assurant leur fonction de production, de transport et de distribution, se faisant même oublier, les ouvrages gaziers baignent dans un milieu particulièrement agressif du fait de son hétérogénéité et du grand nombre d'impuretés qu'il contient.

La figure suivante résume les différentes causes de défaillance des pipelines :

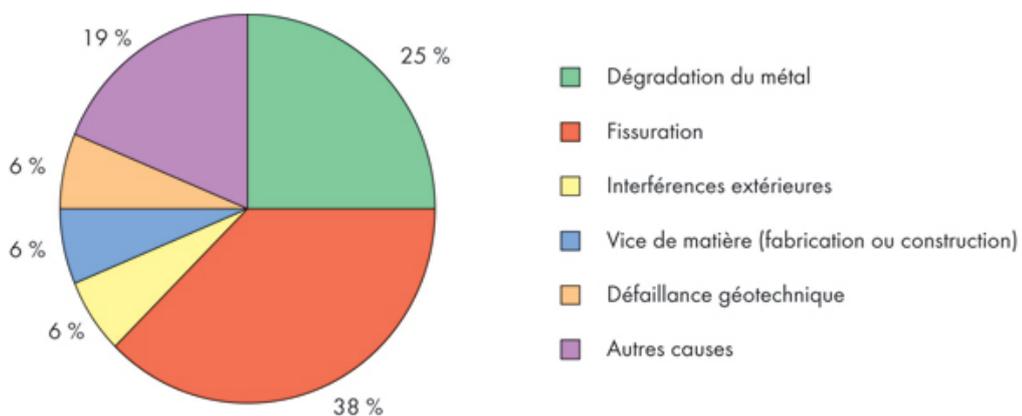


Fig I.1 : Causes de rupture des pipelines (1991-2008)

La figure propose une ventilation des ruptures signalées sur des pipelines réglementés par l'ONÉ (Office National de l'Énergie « Canada ») [1] et leurs principales causes de rupture. La corrosion, qui comprend la fissuration et la dégradation du métal, a été la principale cause de rupture des

pipelines relevant de l'ONÉ de 1991 à 2008. La fissuration englobe : la fissuration due à l'hydrogène, la fissuration par corrosion sous tension et la fatigue par corrosion. La dégradation du métal comprend la corrosion interne et externe.

### **I.1.2 Définition :**

La corrosion est le phénomène non voulu, suivant lequel les métaux ont tendance, sous l'action d'agents atmosphériques ou de réactifs chimiques à retourner à leur état original d'oxyde, sulfure, carbonate...plus stable par rapport au milieu considéré et ainsi à subir une détérioration de leur propriétés.

La corrosion, du latin 'corrodere', signifie ronger, attaquer. La corrosion d'un métal est donc l'oxydation de cet élément à l'état d'ion métallique : il s'agit d'une réaction d'oxydo - réduction [2]. Si le métal M est oxydé à l'état de cation  $M^{n+}$ , il se produit donc :



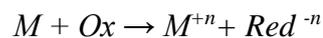
réaction anodique, pôle négatif avec perte d'électrons

Cette réaction électrochimique exige la présence d'un oxydant **Ox** susceptible de capter les électrons, soit :



réaction cathodique, pôle positif, avec gain d'électrons.

La réaction de corrosion du métal se traduit donc par le bilan :



*Remarque* : l'oxydation d'un métal peut avoir lieu dans une atmosphère sèche par exemple avec O<sub>2</sub> ou Cl<sub>2</sub> (corrosion sèche) ou en présence d'humidité (corrosion humide).

### **I.1.3 Pertes de métal dues à la corrosion interne :**

Les pertes de métal sont provoquées le plus souvent par des attaques chimiques de la surface interne de la conduite (figure I.2). Ce type de corrosion est favorisé par la présence de sulfure d'hydrogène et de dioxyde de carbone dans le gaz et la présence de bactéries sulfato - réductrices (BSR) dans le cas des oléoducs.



Fig I.2 : corrosion interne d'un tube.

La protection des pipelines contre la corrosion interne se fait principalement par envoi d'inhibiteurs de corrosion et biocides mélangés au fluide.

#### **I.1.4 Pertes de métal dues à la corrosion externe :**

Pertes de métal provoquées le plus souvent par des phénomènes de type électrochimique et chimique de la surface externe de la conduite.

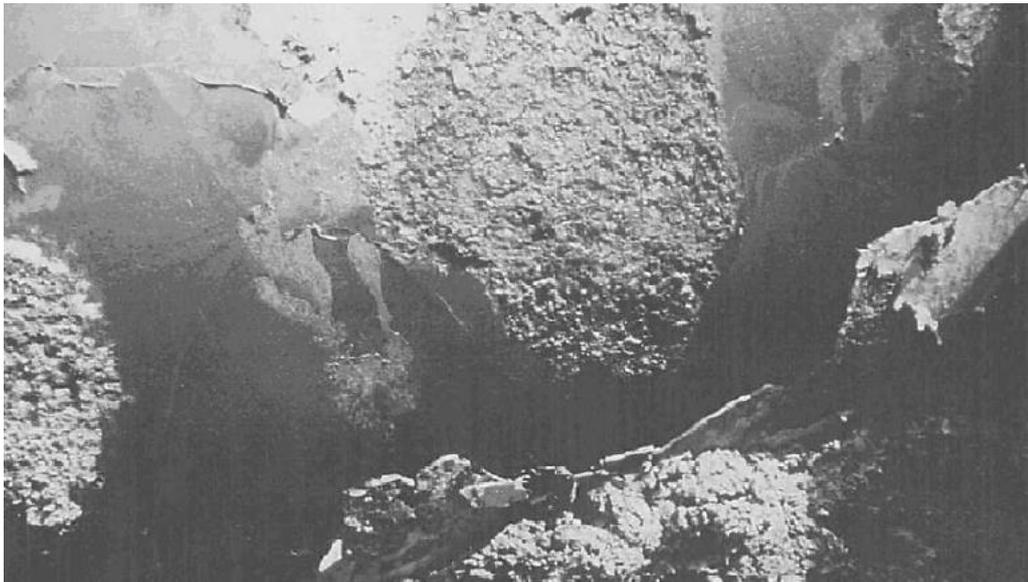


Fig I.3: la corrosion externe d'une canalisation.

Les principaux facteurs favorisant ce type de corrosion sont :

- Les défauts de revêtement de la conduite.
- Les insuffisances du système de protection cathodique.
- L'agressivité du sol (sol de faible résistivité électrique).

La protection des pipelines contre la corrosion externe se fait par

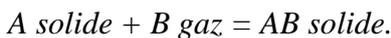
- le revêtement des canalisations
- la protection cathodique.

### **I.1.5. Processus de la corrosion :**

#### **Corrosion chimique (sèche) :**

Elle s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase gazeuse. Le processus d'oxydo-réduction de la corrosion chimique se déroule dans le domaine atomique avec le milieu ambiant sans présence d'électrolyte. Donc la corrosion purement chimique ne fait pas intervenir le passage d'un courant électrique. Les agents corrosifs que renferme l'air sont l'oxygène, de la vapeur d'eau et des vapeurs acides (anhydride carbonique CO<sub>2</sub> et sulfureux SO<sub>2</sub>, hydrogène sulfureux H<sub>2</sub>S etc.), mais la plus grande proportion revient au CO<sub>2</sub>.

La réaction chimique du métal avec le milieu ambiant sans intervention du courant électrique nécessite généralement des températures élevées, la réaction qui se produit est de la forme :



#### **Corrosion électrochimique :**

La corrosion électrochimique se produit lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal soit dans le milieu qui l'entoure (ou les deux). Cette hétérogénéité va produire une différence de potentiel entre différents points du métal, si ce matériau se trouve dans un milieu électrolysable, il y aura formation des piles qui vont débiter dans la masse métallique, car elles sont en court-circuit, les zones anodiques sont corrodées.

#### **Corrosion biochimique (bactérienne) :**

En milieu anaérobie, certaines bactéries secrètent, par leur métabolisme, des substances acides et corrosives attaquant directement les aciers dans l'endroit de contact, en plus, elles consomment l'hydrogène produit au niveau des microcathodes, permettant ainsi à la corrosion de se poursuivre.

Le développement de ce type de corrosion dépend du pH, la température et de la teneur en oxygène.

La corrosion biologique se manifeste souvent sous forme de tubercules très rapprochées qui provoquent éventuellement des corrosions cavernes.

Deux types de bactéries sont particulièrement bien connus :

- bactéries sulfato-réductrices :
- bactéries oxydant le soufre.

### **Erosion :**

Ce type de corrosion est produit par le mouvement du fluide sur la surface d'un métal et se rencontre principalement dans les gazoducs. Les particules fines, qui se déplacent à la vitesse du gaz rabotent la surface interne de la conduite, provoquant ainsi la destruction des films protecteurs et la réduction de l'épaisseur (l'effet du débit de gaz est dû à l'enlèvement des ions métalliques et des couches protectrices à mesure qu'ils se forment, ce qui accroît la force d'entraînement de corrosion chimique et peut empêcher la formation d'une couche protectrice) [3].

#### **I.1.6 La corrosion uniforme :**

C'est l'aspect de corrosion le plus rencontré dans la pratique, mais c'est l'aspect aussi le moins dangereux, car le métal est attaqué sur toute la surface et avec la même vitesse de corrosion. Les causes peuvent être chimiques, électrochimiques ou encore mécaniques.

L'attaque de la surface sera très importante si cette dernière est rugueuse. A l'échelle macroscopique, on ne distingue pas les lieux cathodiques des lieux anodiques, la surface entière de métal est simultanément cathode et anode.

La corrosion uniforme peut être évitée par l'utilisation d'un revêtement ou par l'addition d'inhibiteur de corrosion ou encore par l'application de la protection cathodique.

#### **I.1.7 Corrosion localisée**

La corrosion localisée est basée sur le même principe que celui de la corrosion uniforme, bien que le potentiel d'entraînement puisse être assuré par des mécanismes différents. Elle est caractérisée par la distinction claire des endroits anodiques et cathodiques. En outre, la cathode peut être plus grande de plusieurs ordres de grandeur que l'anode, ce qui augmente considérablement la vitesse de corrosion de l'anode. Donc, ce type de corrosion se manifeste par une attaque localisée pouvant entraîner des dommages très importants (perforation de conduite), sans que le métal présente dans son ensemble une perte de poids significative [4].

Différents types de mécanismes de corrosion localisée existent, y compris:

**Corrosion par piqûres :** c'est un type de corrosion qui se produit à la surface du métal par formation des trous, et qui peuvent progresser rapidement en profondeur. Dans les tubes en acier, l'origine des piqûres est liée à la présence d'hétérogénéité, qui en surface, détermine la formation de piles locales. Bien que la quantité d'acier corrodée soit faible, ce type de corrosion est très dangereux, car il se produit en profondeur et peut conduire à la perforation des conduites même épaisses. L'hétérogénéité de la surface est due à des défauts du film passif (revêtement) qui

favorisent la mise à nu locale d'acier, il en résulte la formation d'une micro-pile entre l'acier mis à nu qui joue le rôle d'anode (donc se corrode) et l'acier passif qui constitue la cathode.

**Corrosion galvanique** : appelée aussi corrosion bimétallique. Elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux en contact et entraîne une corrosion du métal le moins noble (anode) avec une résistance à la corrosion du métal le plus noble (cathode).

**Corrosion inter-granulaire (inter-cristalline)** : c'est une attaque sélective aux joints de grains des cristaux de l'acier, causée par des différences physico-chimiques entre le centre et les bords du grain.

**Corrosion par crevasse** : appelée aussi corrosion caverneuse, elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux zones d'une structure métallique. C'est un phénomène qui se développe dans des zones confinées, telles que les interstices et les recoins. Il y a alors une attaque des parties métalliques les moins accessibles à l'oxygène.

**Corrosion sous contrainte (stress corrosion)** : il s'agit d'un type de corrosion qui se produit sous l'action commune d'une contrainte mécanique de traction et d'un milieu corrosif. En l'absence de la contrainte, le phénomène ne se produit pas.

Le réarrangement cristallin provoque dans ces conditions la circulation d'électrons, entraînant une polarisation de l'acier.

La corrosion sous contrainte se manifeste sous forme de fissures qui peuvent être inter-granulaires ou transe-granulaires.

Les contraintes peuvent être d'origine résiduelle, provenant des opérations de mise en forme et des traitements thermiques, ou d'origine externe, qui résultent des conditions d'utilisation.

**Corrosion par érosion** : on rencontre le phénomène de l'érosion principalement dans les conduites de gaz. Ce phénomène est dû au déplacement des particules solides, sable et produits de corrosion à la vitesse du gaz, qui « rabotent » la surface interne de la conduite, provoquant une réduction de l'épaisseur. Le phénomène de l'érosion est particulièrement intense au niveau des coudes à faible rayon de courbure

**Fragilisation par l'hydrogène** : l'hydrogène est un élément qui peut aisément se diffuser dans les métaux et altérer leurs propriétés mécaniques. Ce phénomène a des conséquences pratiques considérable, car il a de multiples occasions de pénétrer dans des aciers (élaboration, décapage,

soudage, dépôts galvanique, utilisation en milieu humide, hydrogène sulfuré, etc.) et il en résulte parfois, des ruptures catastrophiques immédiates ou différées. Selon les moyens de s'en prémunir, il existe trois types de fragilisations :

- fragilisation par décarbonatation
- la formation de soufflures
- la fragilisation par l'hydrogène dissous en présence de contrainte.

**Fatigue-corrosion** : très comparable à la corrosion sous contrainte, le phénomène de fatigue-corrosion apparaît sous l'action conjuguée de l'environnement et d'une sollicitation cyclique. Il se manifeste par un abaissement de la résistance du matériau (acier) à la fatigue.

**Corrosion électriques ou corrosion par les courants vagabonds (courants parasites)** : si un courant électrique continu peut avoir pour effet de protéger cathodiquement une structure lorsqu'il circule dans un sens convenable, il peut provoquer sa corrosion lorsqu'il circule dans le sens opposé. Mais en général, les courants vagabonds se propagent dans le sol où les liquides selon un chemin autre que celui prévu. Donc, ils peuvent entrer dans une structure conductrice enterrée ou immergée puis en ressortir plus loin, provoquant une corrosion par dissolution anodique. Ces courants circulant de façon non maîtrisée, sont variables en direction et en intensité et pour cette raison, ils ont reçu la nomination de courants vagabonds.

## **I.2 Inspection :**

Les pipelines sont des outils essentiels de transport massif de fluides (liquides, liquéfiés ou gazeux) sur de grandes distances comme sur de petites liaisons. Ils allient débit important et discrétion et confirment année après année qu'ils sont le mode le plus sûr et le plus écologique de transport des hydrocarbures, notamment.

Toutefois, si leur enfouissement permet cette discrétion dans la performance, il est aussi problématique dès lors qu'il faut envisager d'assurer la maintenance de ces ouvrages de transport. Ceci est en particulier le cas pour vérifier l'efficacité des mesures préventives mises en œuvre pour faire face aux diverses menaces auxquelles est soumise une canalisation enterrée ou sous-marine : milieu agressif, endommagement par des tiers ou par des éléments de terrain, fluide transporté corrosif, ...

Il a donc été développé des outils qui permettent d'inspecter les pipelines de l'intérieur.

Ces outils sont appelés racleurs ou pistons. Lorsqu'ils comportent des éléments de mesure et d'enregistrement, ils sont qualifiés d'instrumentés ou d'intelligents.

### **I.2.1 Anatomie d'un racleur :**

Un racleur instrumenté se compose généralement de quatre sections fonctionnellement distinctes : une unité de traction qui assure l'entraînement du racleur par le fluide transporté, une alimentation électrique embarquée, un système de mesure et un système d'acquisition et d'enregistrement des mesures.

Ces différents systèmes sont regroupés dans des éléments reliés entre eux par des cardans assurant la flexibilité de l'ensemble. Cette flexibilité est nécessaire pour que les racleurs puissent évoluer dans les coudes des canalisations à inspecter. Plus le diamètre de la canalisation est faible, plus il est nécessaire d'étirer les racleurs en longueur et de multiplier le nombre d'éléments afin d'embarquer tous les modules. Ceci conduit à des racleurs pouvant atteindre six mètres de longueur.

Enfin, les racleurs sont équipés d'une ou plusieurs roues codeuses qui permettent d'enregistrer la distance parcourue dans la canalisation afin de positionner ultérieurement les signaux relevés. Ils sont aussi souvent équipés d'un pendule qui permet de connaître l'orientation de l'outil à tout instant [5].

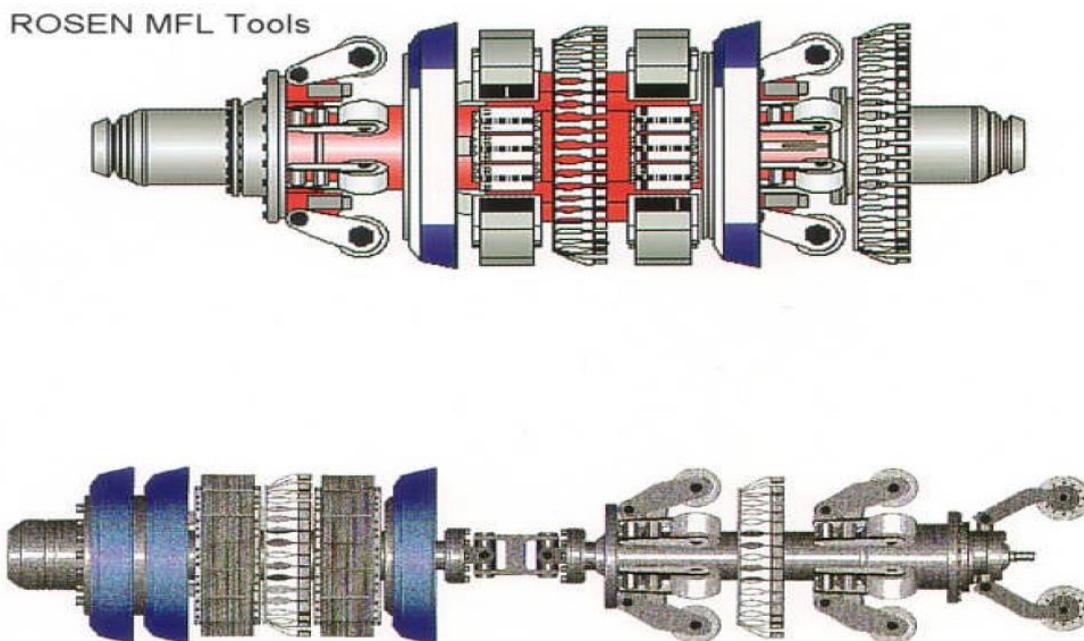


Fig I.4 : Racleur MFL

### **I.2.2 Les différents types de racleurs :**

Outre les racleurs dits instrumentés, il existe des racleurs sans aucun équipement de mesure qui servent, soit à nettoyer les canalisations, soit à isoler les uns des autres différents produits incompatibles. Les racleurs d'isolement, sont généralement équipés de coupelles particulières assurant à la fois leur propulsion et leur étanchéité. Les racleurs de nettoyage sont équipés de brosses, il en existe une grande variété pouvant traiter des problèmes spécifiques : élimination de paraffines, d'oxydes, de sédiments, ...

Pour ce qui est des racleurs instrumentés, on distinguera plusieurs types répondant à des finalités d'inspection différentes, on trouve ainsi, principalement : des racleurs de contrôle de la géométrie des tubes, des racleurs de détection des pertes de métal, des racleurs de contrôle d'étanchéité et des racleurs spécialisés dans la recherche de fissures longitudinales.

#### **La recherche de manques de métal :**

Il s'agit là, 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.

- Détection par flux magnétique ou technique MFL (magnetic flux leakage)
- Détection par ultrasons ou technique UT (ultrasonics technique)

### **Les ultrasons :**

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 [6].

### **I.2.3 La technique MFL :**

Le concept original d'utiliser un racleur pour inspecter un pipeline est venu de Shell Research en 1963 et il breveta l'idée d'une inspection sur la base des courants de Foucault outil.

Tuboscope acheta le brevet et a changé la conception à un système MFL (flux de fuite magnétique) sur la base des techniques d'inspection de tube de forage existants. En dehors de cette recherche, le premier outil MFL a été créé et il a été appelé l'outil 90 ° [7].

Cette technique utilise de puissant aimant induisant un flux magnétique dans la paroi de la conduite. Des capteurs placés entre les pôles détectant tout changement d'intensité résultant d'une perte de métal ou d'un changement d'épaisseur.

La puissance du flux magnétique requise est relativement élevée. Les premiers outils MFL ont particulièrement souffert de cet inconvénient surtout pour les grands diamètres. La firme TUBOSCOPE qui a commercialisé le premier outil intelligent de détection de perte de métal, a choisi d'utiliser l'outil électro-aimant, tous les autres constructeurs ont opté pour les aimants permanents. British Gaz a ainsi réussi à multiplier par dix la puissance des aimants permanents en développant de nouveaux matériaux magnétiques tels que le NIB (neodymium-iron-bore). Un autre axe ayant favorisé le développement des techniques MFL concerne les progrès réalisés dans la technologie des capteurs.

Les premiers capteurs étaient très larges et donnaient lieu à des pertes de contact avec la paroi à chaque changement de direction de la conduite (particulièrement au niveau des zones de courbures).

Les capteurs actuels se sont considérablement améliorés au point où la détection des pertes de métal est même possible au niveau des cordons de soudures et sur la face intérieure et extérieure de la canalisation. Ils peuvent même être adaptés pour mesurer l'épaisseur absolue de la conduite, la quantité des données enregistrées s'est considérablement accrue [5].

- **Le MFL transverse :**

Cette technologie s'appuie sur de puissants aimants placés dans le racleur. Le flux magnétique longitudinal ainsi généré circule dans la paroi du tube 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 tube. 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 ou 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.

Pour détecter les fissures longitudinales on utilise des champs magnétiques orientés perpendiculairement à l'axe des tubes de façon à ce que le flux magnétique « voit » le flanc des fissures. Celles-ci provoquent alors des réductions suffisantes de la section de la paroi métallique pour générer une augmentation détectable de la fuite du flux magnétique. Ces outils permettent actuellement la détection des grandes fissures ou des fissures très ouvertes (espacement important entre les deux flancs de fissure) [8].

**I.2.4 Emploi des racleurs pour la maintenance des pipelines :**

En premier lieu il est important de noter qu'un pipeline doit disposer d'équipement particulier pour pouvoir être inspecté par des racleurs instrumentés. Il s'agit notamment d'équipements permettant le lancement et la réception des racleurs. Ces «gares de racleur» peuvent parfois être fournies temporairement par des prestataires extérieurs. Il faut aussi que les rayons des coudes présents dans le pipeline permettent le passage du racleur. Cette condition n'est pas toujours remplie dans des réseaux construits avant l'existence de racleurs instrumentés.

Ces racleurs instrumentés regroupent donc un ensemble d'outils aptes à détecter la plupart des défauts susceptibles d'être présents à la surface (interne ou externe) des pipelines. De plus ce sont des outils d'inspection qui permettent de couvrir l'intégralité de la surface d'une canalisation.

Après l'inspection de la conduite par un racleur, un exploitant de réseau dispose donc d'un ensemble de signaux correspondant à des défauts localisés et dimensionnés, dans les limites des capacités de l'outil employé bien sûr.

Dans un premier temps, un certain nombre de ces défauts pourront apparaître comme inacceptables au regard des conditions d'exploitation : ils seront réparés sans délais ou bien les conditions d'exploitation seront adaptées, au moins temporairement.

L'ensemble des signaux fournissent par ailleurs une indication de l'efficacité des moyens de prévention mis en place. Des évolutions adaptées pourront être décidées si nécessaire.

Enfin, un certain nombre de défauts seront laissés en ligne car ils ne mettent pas en danger l'intégrité de la ligne. Cependant, la modélisation de la progression de ces défauts permettra d'évaluer leur durée de vie potentielle et un arbitrage devra alors être pris entre la réparation anticipée et la nécessité de refaire une inspection de la ligne avant le délai calculé. Il peut ainsi être intéressant de réparer à l'avance des défauts acceptables en l'état si cela permet de repousser de quelques années une coûteuse inspection par racleur.

# *Fiabilité structurale et analyse de risque*

---

## **Introduction :**

Tout industriel doit être en mesure d'assurer la fiabilité et la sûreté de ses installations. L'enjeu est considérable puisqu'il intéresse la sécurité des biens et des personnes, la disponibilité, la performance des installations et l'économie du procédé.

La démarche, appelée de sûreté de fonctionnement, permet d'apprécier l'ensemble de ces problèmes à travers l'évaluation des couples risques  $\times$  conséquences. Cette appréciation peut se faire soit de façon déterministe, soit de façon probabiliste.

La méthode probabiliste s'applique bien lorsque les événements à modéliser sont relativement nombreux et intéressent des matériels tels que pompes, turbines, robinets, sectionneurs dont les taux de défaillance sont connus de façon satisfaisante. Elle a fait ses preuves dans les études probabilistes de sûreté, ou dans les études d'optimisation de la maintenance par la fiabilité, couramment pratiqués, notamment dans les centrales nucléaires.

Par contre, cette méthode atteint ses limites lorsqu'il s'agit de considérer des événements rares, voire extrêmement rares, tels que ruptures de tuyauteries, d'enceintes ou de réservoirs. Or, bien que rares, ces événements peuvent conduire à des conséquences extrêmement graves. Il est donc important de les évaluer.

Ainsi, dans le domaine industriel, l'abord de ces problèmes est fait essentiellement d'une démarche déterministe, et l'utilisation de facteurs de sécurité qui rassemble les paramètres incertains, démarche toujours d'actualité, même si elle est remise en question par l'émergence de la démarche probabiliste ou fiabilité des structures.

La théorie de la fiabilité des structures ne considère plus les paramètres incertains comme des valeurs fixes incluant une marge respectable, mais comme des variables aléatoires caractérisées par leur densité de probabilité. Ainsi, tous les risques sont pris en compte, même ceux d'événements très rares, mais ils sont pondérés par leur probabilité d'occurrence. La démarche probabiliste s'appuie donc sur un modèle de dégradation déterministe dans lequel les différentes sources d'incertitude sont modélisées sous forme de variables aléatoires. Elle constitue donc un prolongement rationnel de l'approche déterministe.

L'utilisation de ce nouveau concept permet, d'une part, un traitement clair des incertitudes et présente, d'autre part, l'intérêt d'évaluer une probabilité quantifiée de la ruine de la structure, tout en démontrant la liaison implicite qui peut exister entre marges, coefficient de sécurité et niveau de fiabilité. Enfin, avec ces concepts, il est possible de réaliser des études de sensibilité, permettant d'identifier les paramètres les plus influents et d'évaluer l'impact des différentes sources d'incertitudes sur le risque de ruine de la structure, offrant ainsi l'opportunité d'engager des analyses décisionnelles où l'on recherche le meilleur compromis coût-sûreté.

## **II.1 Définition de la fiabilité :**

Selon la définition (IEC, 50 (191), 1991) [9] pour le néologisme fiabilité traduction du terme anglo-saxon Reliability: «*La fiabilité est une caractéristique d'un dispositif exprimée par la probabilité qu'il accomplisse une fonction requise dans des conditions données, pendant un temps donné*».

La fiabilité est caractérisée par quatre éléments :

- la probabilité : elle est définie par le rapport entre le nombre de cas favorables à la réalisation d'un événement et le nombre de tous les cas possibles.
- l'accomplissement d'une fonction requise : la fonction pourra être une structure qui supporte une charge constante ou variable.
- des conditions données relativement à l'environnement et l'utilisation : ces conditions sont les contraintes physique, chimique, électrique et mécanique subies par le dispositif du fait de son environnement : conditions ambiantes, actions provoquées par l'interface avec les dispositifs voisins.
- le temps : c'est le temps exprimé au sens large. Ce sera bien souvent, un nombre de cycles, une distance parcourue et d'une façon générale, un âge ou une grandeur qui exprime la durée de vie.

## **II.2 Fiabilité des structures :**

La variabilité sur la structure provient de la nature incertaine des phénomènes mis en jeu sur la structure. Cette variabilité peut avoir plusieurs origines : les aléas ont principalement deux origines, aléas intrinsèques (contrainte de fonctionnement) et aléas extrinsèques (contrainte de qualité).

### **II.2.1 Aléas intrinsèques :**

Les aléas intrinsèques qui peuvent affecter la qualité du produit sont attachés principalement aux contraintes de fonctionnement (forces internes, mouvement..) et les contraintes de qualité (nature des matériaux, qualité de surface, précision des mesures...). Premièrement, l'incapacité à maîtriser la modélisation des forces internes dans les matériaux est une source majeure de l'incertitude. Deuxièmement, pour des raisons de coûts, l'assurance des matières premières au même niveau de qualité s'avère difficile. À cet effet, des variations dans les caractéristiques d'un même matériau sont constatées. Afin de prendre en considération cette variabilité, les fournisseurs offrent des produits avec des intervalles de tolérances.

La dispersion dans les propriétés des matériaux est représentée par des variations dans les caractéristiques des matériaux :

- le module d'Young  $E$ ;
- le coefficient de poisson  $\nu$  ;
- la masse volumique  $\rho$  ;
- la limite élastique  $R_e$ .

De plus, la qualité de surface influe considérablement sur le comportement des structures. Par conséquent, l'amorçage de fissure se fait plus rapidement dans les produits avec surface maltraitée. Finalement, L'erreur humaine et l'imprécision d'usinage d'une machine génèrent des variations affectant la qualité de la structure. Ces variations se manifestent par des dispersions sur la géométrie et des imperfections des coupes.

### **II.2.2 Aléas extrinsèques :**

Les aléas extrinsèques sont liés principalement à l'environnement, et peuvent avoir deux origines: les contraintes climatiques (température, pression, humidité..) et les contraintes mécaniques (chargement, déformations imposées...). Premièrement, par définition, la fiabilité est caractérisée par quatre aspects (la probabilité, l'accomplissement d'une fonction requise, des conditions données relativement à l'environnement et l'utilisation, le temps). Par conséquent, la structure devrait respecter les conditions d'utilisations spécifiées dans le cahier de charge. Cependant, un dépassement des conditions d'utilisation peut être enregistré. Par exemple, un dépassement de la charge ou de la température d'utilisation prévue par le cahier de charge. Deuxièmement, certaines forces exercées sur la structure sont de nature incertaine, comme le vent, la houle... Ces grandeurs varient dans le temps et ils sont difficiles à déterminer de façon précise [10].

### II.2.3 Risque :

Le risque est défini par l'existence d'un événement redouté possédant une probabilité d'occurrence et par la gravité des conséquences de cet événement. La relation suivante est donnée :

$$\text{Risque} = \text{Probabilité} \times \text{Gravité}$$

Le diagramme de Farmer [11] comme indiqué illustre la probabilité vis-à-vis de la gravité de conséquences.

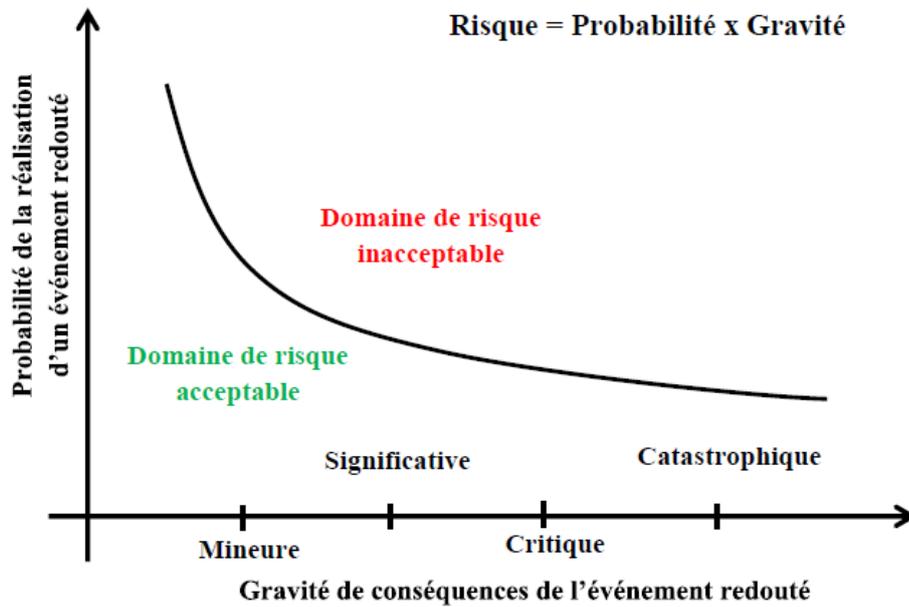


Fig II.1 : Illustration des différents domaines de risque à partir de la probabilité vis-à-vis de la gravité de conséquences.

### II.3 Incertitudes liées à l'évaluation de la fiabilité des structures :

L'évaluation de la fiabilité des structures consiste à estimer un risque de défaillance à partir du probabilisme d'un modèle physique de dégradation.

On distingue trois grands domaines d'incertitudes dans ce type de calcul : les incertitudes physiques, les incertitudes liées aux estimations statistiques, et enfin les incertitudes liées au modèle physique de dégradation.

Les incertitudes physiques dépendent d'une part des propriétés des matériaux et des caractéristiques géométriques, qui définissent la résistance de la structure, et d'autre part des

chargements dépendant de processus stochastiques, de caractéristiques dimensionnelles, d'une histoire et des différents modes de défaillance possibles.

Les incertitudes statistiques concernent la caractérisation des variables aléatoires. Elles dépendent des inférences déduites à partir de l'observation d'échantillon, qui vont permettre d'établir une distribution de probabilité censée représenter l'ensemble de la population dans laquelle a été prélevé l'échantillon testé, et d'évaluer les valeurs numériques des paramètres de cette distribution.

L'incertitude sur le modèle de dégradation va dépendre du degré de simplification que l'on va imposer au modèle mécanique afin de représenter les phénomènes physiques et afin de résoudre les difficultés mathématiques associées à la combinaison d'un ensemble de variables aléatoires, elles-mêmes déterminées avec un certain degré d'incertitude.

Ces incertitudes interviennent finalement directement sur l'évaluation du chargement extrême et sur l'estimation de la valeur de la résistance de la structure. C'est en effet à partir de la comparaison des valeurs de ces deux caractéristiques physiques, ou de leurs paramètres représentatifs (facteur d'intensité de contrainte, ténacité, taille de défaut,...) que l'on va définir le risque de défaillance ou la marge de sécurité.

Les méthodes de calculs déterministes attribuent des coefficients de sécurité conservatifs à ces paramètres afin de limiter le risque de rupture, alors que les méthodes de calcul probabilistes vont utiliser directement leur distribution de probabilité, ou plus simplement les moments de ces distributions. Ces derniers permettent de modéliser le caractère aléatoire et l'incertitude des variables concernées en pondérant leurs différentes probabilités de réalisation [12].

#### **II.4 L'intérêt des méthodes fiabilistes :**

Les méthodes fiabilistes proposent un traitement réaliste des incertitudes et une méthode d'évaluation de facteurs de sécurité trop souvent arbitraires. Elles apportent une aide à la décision conduisant à une conception plus économique et mieux équilibrée, analysent les méthodes de défaillance et mesurent la fiabilité apportée par l'application des règlements.

Ces méthodes permettent aussi une réparation optimale des matériaux entre les différents composants d'une structure, et peuvent incorporer l'expérience acquise dans la conception par l'actualisation en fonction du retour d'expérience.

Enfin, elles aident aux décisions de maintenance et de réparation dans un double objectif de sécurité et économie et élargissent la maîtrise de la connaissance des incertitudes sur la réponse des structures [13].

Ces méthodes étaient présentées sous un éclairage tellement séduisant que chacun devait s'interroger sur les raisons de leur faible développement à l'époque.

## **II.5 Analyse de fiabilité :**

L'analyse de fiabilité exige en plus un scénario de défaillance .Il sépare les situations que le concepteur décide de considérer acceptables de celles qu'il décide de considérer inacceptables Selon Vidal-Cohen [13] : *la fiabilité, c'est les probabilités et la décision en plus.*

La décision peut être totalement déterminée et séparer deux domaines de manière binaire, elle peut être floue en associant un degré de satisfaction croissant progressivement des situations défaillantes vers les situations de bon fonctionnement.

Le scénario est représenté par une (ou plusieurs) fonction(s) de performance délimitant deux domaines, l'un de fonctionnement lorsque la fonction de performance prend des valeurs positives, l'autre de défaillance lorsqu'elle prend des valeurs négatives ou nulles. Les états de défaillance correspondent à des situations considérées non acceptables qu'elles le soient réellement s'il s'agit véritablement d'une ruine, ou qu'elles correspondent à des désordres moins importants définis néanmoins conventionnellement comme étant également des situations inacceptables. Les notions d'état limite ultime et l'état limite de service illustrent ces deux types de situation.

La fonction d'état limite est donc la fonction de performance nulle, elle est exprimée en fonction des variables de base .celle-ci comprennent les données relatives aux actions, aux paramètres d'état, mais également aux résistances.

Il est souvent possible de construire deux modèles de calcul indépendants, l'un conduit à l'évaluation des sollicitations et l'autre à l'évaluation des résistances .dans ce cas, la différence entre la sollicitation et la résistance est *une marge* qui est une variable aléatoire .en contexte statique, l'objectif de l'analyse de fiabilité est alors d'évaluer la probabilité que la marge prenne une valeur positive.

Cette notion complète celle de coefficient de sécurité à laquelle il faut veiller à donner un sens en indiquant s'il s'agit d'un coefficient moyen, d'un coefficient caractéristique, d'un coefficient partiel.

A partir des données (action, état, résistance) et d'un modèle fiabiliste, l'objectif est de calculer un indice de fiabilité et d'approximer une probabilité. Outre celle-ci, les produits de l'analyse de fiabilité incluent le point de défaillance le plus probable (ou point de conception), les facteurs de sensibilité à la défaillance et une évaluation de coefficients partiels de sécurité.

On peut dire que la procédure de calcul du modèle fiabiliste excite les modèles de sollicitation et de résistance par un choix judicieux des données pour produire les résultats demandés. Les méthodes de simulation de Monte-Carlo ou les méthodes d'approximation des indices de fiabilité constituent des stratégies d'excitation.

## **II.6 L'approche contrainte/résistance :**

Les approches développées en méthode résistance contrainte, puis mécanique probabiliste apportent aux concepteurs une évaluation chiffrée en termes de probabilité, au lieu d'avoir un coefficient de sécurité. Les calculs et techniques utilisées sont parfois complexes à mettre en œuvre par rapport à une simple évaluation déterministe, méthode **FORM/SORM**, simulation, couplage mécano-fiabiliste. Pour ces raisons, lors de la mise en œuvre de ces méthodes, il semble impératif d'avoir exploré le problème de résistance, identifier les modes de défaillances et évaluer correctement et exhaustivement les variables qui participent à cette détermination. Pour cela on s'appuie sur les outils traditionnels de la fiabilité, arbres de défaillance, estimation des paramètres des lois statistiques. Cette étape réalisée permet d'envisager la technique à adopter. L'approche la plus simple étant de ne retenir que deux variables aléatoires indépendantes et gaussiennes, la plus sophistiquée faisant appel à  $n$  variables dépendantes et non-gaussiennes. Il faut également souligner que les probabilités de défaillance à déterminer sont en général très faibles, c'est aussi une difficulté supplémentaire.

### **II.6.1 Principe de la méthode résistance/contrainte :**

Cette première méthode repose sur l'hypothèse que la résistance et la contrainte soient représentées par deux variables aléatoires indépendantes. Dans les problèmes de résistance des matériaux, la première variable aléatoire représente la contrainte mécanique, statistique ou dynamique (fatigue), la deuxième variable la résistance à la rupture, la limite élastique, la tenue à la fatigue, etc. Le diagramme de Warner donne une image de ce concept.

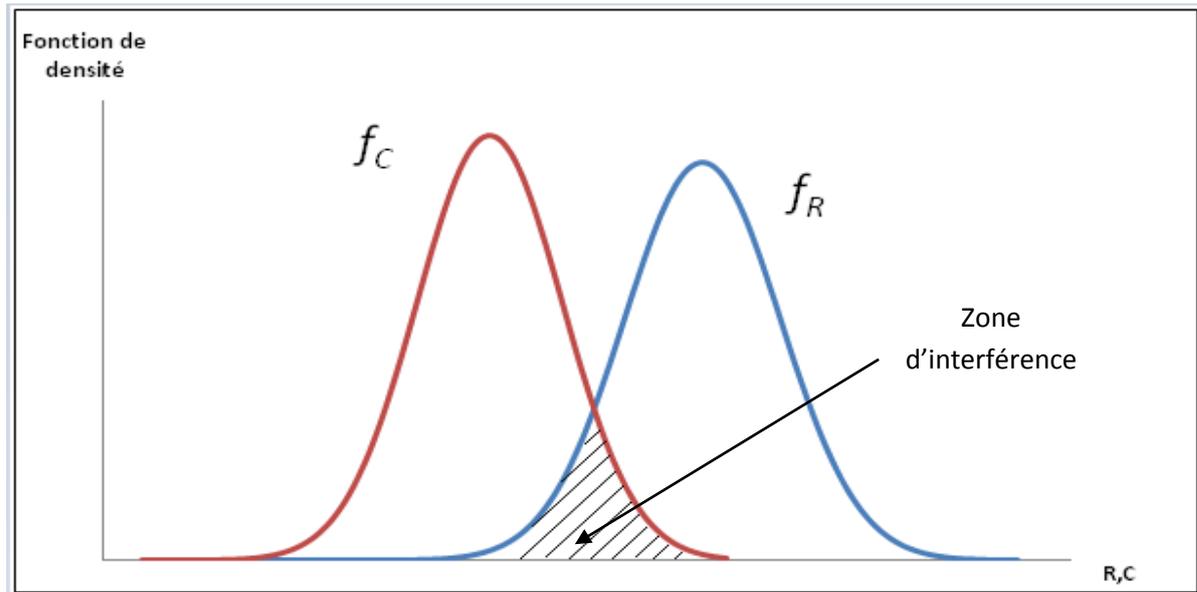


Fig II.2 : Distribution de contrainte et de résistance.

### II.6.2 Cas de loi de gausse :

La résistance  $R$ , et la contrainte  $C$ , sont des variables aléatoires ayant pour fonction de densité de probabilité  $f(x)$  et  $g(x)$ .

Très souvent les lois  $f(x)$  et  $g(x)$  sont des lois de Gauss ou assimilables. Les lois log-normale, de Weibull, uniforme, exponentielle sont aussi utilisées. Sous sa forme la plus simple, un problème de résistance classique fait intervenir les deux variables aléatoires  $R$  qui représente la résistance et  $C$  la contrainte. On écrit la probabilité de rupture  $P_f$  sous les deux formes ci-après [14] :

$$P_f = P(R \leq C) = P(R - C \leq 0)$$

$$P_f = P\left(\frac{R}{C} \leq 1\right)$$

D'autre part on peut écrire :

$$P(C=c) = P\left(c - \frac{dc}{2} < c < c + \frac{dc}{2}\right) = g(c) dc$$

$$P(R \leq c) = \int_0^c f(x) dx = F(c).$$

Puis  $P_f$  est égale au produit de convolution suivant :

$$P_f = \int_0^\infty \left(\int_0^c f(x) dx\right) g(c) dc = \int_0^\infty F(c) g(c) dc$$

Dans le cas particulier de deux lois de gausse indépendantes (ce qui est le cas entre la résistance et la contrainte), cette probabilité  $P_f$  se détermine par :

$$P_f = P(R \leq C) = P(R - C \leq 0) = \Phi\left(\frac{\bar{c} - \bar{R}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_C^2}}\right)$$

On peut en conclure que la fiabilité de l'élément  $i$ ,  $R_i$  a pour expression :  $R_i = 1 - P_f$ .

Avec :

$$g_c = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} e^{-\frac{(c-\mu_c)^2}{2\sigma_c^2}}$$

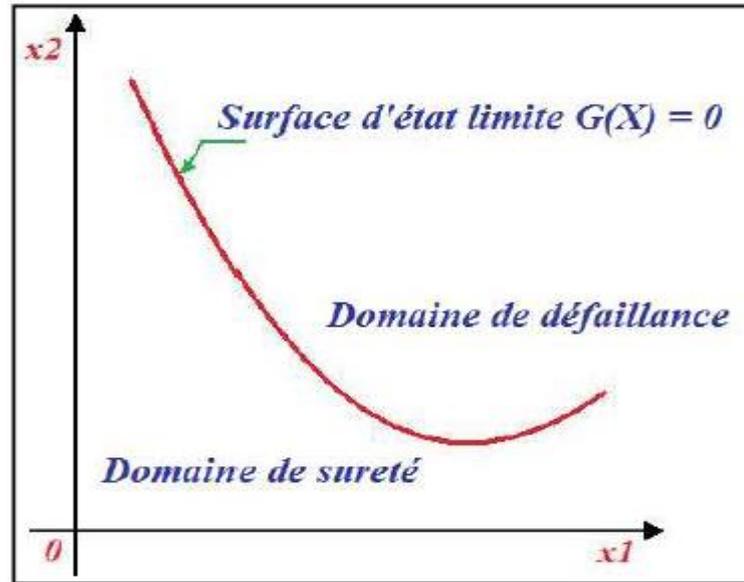
$$f_r = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} e^{-\frac{(r-\mu_r)^2}{2\sigma_r^2}}$$

## II.7 Notion d'état limite :

L'évaluation de la fiabilité structurale commence par la définition du mode de défaillance que l'on veut étudier, c'est-à-dire la localisation de l'élément de structure concerné, les propriétés mécaniques des matériaux, les sollicitations soumises ainsi que le modèle liant résistance et sollicitations. Notons que le niveau de fiabilité obtenu dépendra donc du mode de défaillance choisi.

Le mode de défaillance permet ainsi de définir la *marge de sécurité* ou *fonction d'état limite* à respecter. Cette fonction d'état limite, notée  $G$ , fait intervenir différents paramètres géométriques ou physiques du système étudié.

Mathématiquement parlant, le critère de défaillance est représenté par cette fonction d'état limite  $G$  définie en fonction du vecteur des paramètres incertains  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}^T$ , tel que  $\Omega_s = \{x | G(X) > 0\}$  est le domaine de sûreté et  $\Omega_F = \{x | G(X) < 0\}$  est le domaine de défaillance. La surface d'état limite est formée par les points vérifiant la condition  $G(X) = 0$  ; autrement dit, elle définit la frontière délimitant le domaine de défaillance et le domaine de sûreté. La figure II.3 illustre les concepts de domaine de défaillance, domaine de sûreté et surface d'état limite dans le cas bidimensionnel (cas de deux paramètres incertains).



**Fig II.3 :** Illustration des concepts de domaines de défaillance, de sûreté et surface d'état limite dans le cas bidimensionnel

Par définition, la fiabilité est le complémentaire de la probabilité de défaillance  $P_f$  qui est définie par :

$$P_f = \text{Prob} (G(X) \leq 0) = \int_{G(X) \leq 0} f(x) dx = \int_{\mathbb{R}^n} 1_{\Omega_F}(x) f_x(x) dx$$

Où  $1_{\Omega_F}$  désigne la fonction indicatrice dans  $\Omega_F$  et  $f_x$  est la densité jointe de probabilité du vecteur aléatoire  $X$  [15]. Ainsi, l'évaluation de la probabilité de défaillance n'est autre qu'un calcul d'une intégrale  $n$ -dimensionnelle. Il est évident que la surface d'état limite  $G(X)=0$  joue un rôle essentiel dans l'évaluation de cette intégrale. En effet, l'efficacité de la méthode d'intégration dépend de la complexité de la forme de la surface d'état limite, mais aussi de la dimension  $n$  de l'espace aléatoire et de la densité jointe  $f_x$  qui est souvent inconnue. En particulier, pour les problèmes pratiques où le nombre de paramètres incertains peut être élevé et que la surface d'état limite n'est disponible que sous forme implicite (modélisation par éléments finis), l'évaluation de la probabilité de défaillance constitue un véritable défi. Ainsi, une variété d'approche a été proposée dans la littérature pour la résolution (évaluation de la probabilité de défaillance) des problèmes de fiabilité.

## II.8 Méthodes d'estimation de la probabilité de défaillance :

### II.8.1 Méthode d'intégration analytique directe :

La loi de probabilité d'une variable aléatoire est la correspondance entre les différentes valeurs possibles de la variable aléatoire et les probabilités des évènements associés. Il existe une fonction  $f_x(x)$  : appelée densité de la variable aléatoire telle que :

$$Prob(x - dx \leq X \leq x + dx) = f_x(x)dx$$

La fonction de répartition d'une fonction variable aléatoire  $X$  réelle est l'application  $F(X)$  de  $\mathbb{R}$  dans  $[0,1]$  défini par :

$$F_x(x) = P_r(X \leq x)$$

$$F_x(x) = \int_{-\infty}^x f_x(y)dy$$

La probabilité de défaillance d'une structure dans le cas particulier où les variables résistance mécanique  $R$  et charge  $C$  sont indépendantes et distribuées normalement avec respectivement :

Des valeurs moyennes :  $\mu_R$  et  $\mu_C$

Des écarts types :  $\sigma_R$  et  $\sigma_C$

Dans ces conditions, l'intégrale permettant d'évaluer la probabilité de défaillance, peut se calculer simplement, ce qui permet de résoudre le problème mécanique. Pour cela, on définit la marge de sécurité  $M$  par la relation :

$$M = R - C$$

La marge définie ainsi est une valeur arbitraire qui ne donne en fait aucune information sur le degré de sûreté de la structure.

La probabilité de défaillance est égale :

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_M(m) dm = F_M(0)$$

Soit

$$P_f = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma_M \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{m - \mu_M}{\sigma_M}\right)^2\right] dm$$

Compte tenu des propriétés des distributions normales,  $M$  est aussi une distribution normale ayant pour paramètres [12] :

$$\mu_M = \mu_R - \mu_C$$

$$\sigma_M^2 = \sigma_R^2 + \sigma_C^2$$

## II.9 Méthode d'approximation :

La méthode d'approximation permet de calculer une approximation de  $P_f$  sous certaines conditions. Pour le calcul par la méthode d'approximation, nous avons besoin de connaître l'indice de fiabilité à partir de l'expression de l'état-limite d'un système ou d'une structure.

En effet, les premiers travaux dans le domaine de l'analyse de fiabilité suggèrent l'évaluation de la probabilité de défaillance en termes d'une mesure basée sur les moments statistiques de premier et de second ordre, respectivement la moyenne et l'écart-type, des variables aléatoires de base. Pour cette raison, ces approches sont connues sous le nom de méthodes au second moment ou encore méthodes de fiabiliste de niveau 2. Cette mesure de fiabilité, qui doit avoir un certain nombre de caractéristiques fondamentales telles que la consistance, l'opérabilité, l'invariance, la sélectivité et la simplicité, est désignée par un indice de fiabilité noté souvent  $\beta$ . Les plus connus sont l'indice de fiabilité de *Cornell*, l'indice de fiabilité de *Hasofer et Lind* et l'indice de fiabilité généralisé.

### II.9.1 Indice de fiabilité de Cornell :

Il semble d'après *Lemaire* [16] que la première proposition d'un indice de fiabilité soit due à *Rjanitzyne* dans les années 1950, en Union Soviétique. Cependant, c'est *Cornell* qui a popularisé cette idée. Ensuite, diverses propositions furent présentées, mais la forme la plus complète est due à *Hasofer et Lind* qui s'appuie sur une définition rigoureuse.

Si le vecteur  $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$  représente l'ensemble des variables intervenant dans les fonctions résistances mécaniques/contraintes d'une structure, on a vu que la fonction  $G(x)$ , (appelée fonction de défaillance), permet de diviser l'espace en deux domaines : le domaine de sécurité ou domaine fiable,  $S$ , où, par définition,  $G(X) > 0$ , et le domaine défaillant,  $F$ , où  $G(X) \leq 0$ , la fonction  $G(X)=0$  définissant la surface d'état limite  $L$ .

$X$  correspond à un vecteur aléatoire dont une des réalisations possible est caractérisée par un point dans un espace vectoriel à  $n$  dimensions.

On a donc les différentes situations possibles pour le point de fonctionnement  $X$  :

$$G(X) > 0, \quad X \in S$$

$$G(X) < 0, \quad X \in F$$

$$G(X) = 0, \quad X \in L$$

Considérons les deux variables résistance et contrainte, la fonction d'état est  $G(C, R) = R - C$ , et la marge de sécurité correspondante  $M$  comme cité précédemment :

$$M = R - C$$

Si  $R$  et  $C$  sont des variables normales indépendantes  $N(\mu_R, \sigma_R)$  et  $N(\mu_C, \sigma_C)$ , l'espérance de la marge  $M$  est égale à :

$$\mu_M = E[M] = \mu_R - \mu_C$$

Et sa variance

$$\sigma_M^2 = Var[M] = \sigma_R^2 + \sigma_C^2$$

La probabilité de défaillance définie par la différence de deux variables normales jointes  $P(M=R-C < 0)$ , est aussi une variable normale :  $N[E(M), D(M)]$ .

*Cornell* a défini l'indice de fiabilité  $\beta_c$  caractérisé par le rapport entre l'espérance mathématique de la distribution de la marge de sécurité  $E[M]$  d'une structure, et la dispersion  $D[M]$  de cette distribution :

$$\beta_c = \frac{E[M]}{D[M]}$$

Comme par hypothèse, les variables  $R$  et  $C$  sont indépendantes, on peut écrire :

$$\beta_c = \frac{E[R] - E[C]}{\sqrt{Var[R] + Var[C]}} = \frac{\mu_R - \mu_C}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_C^2}}$$

Géométriquement, l'indice de fiabilité de *Cornell* est défini comme la distance pondérée par  $\sigma_M$ , entre la moyenne  $\mu_M$ , et l'origine qui sépare le domaine de sûreté du domaine de défaillance défini par la densité de probabilité  $f_M$ .

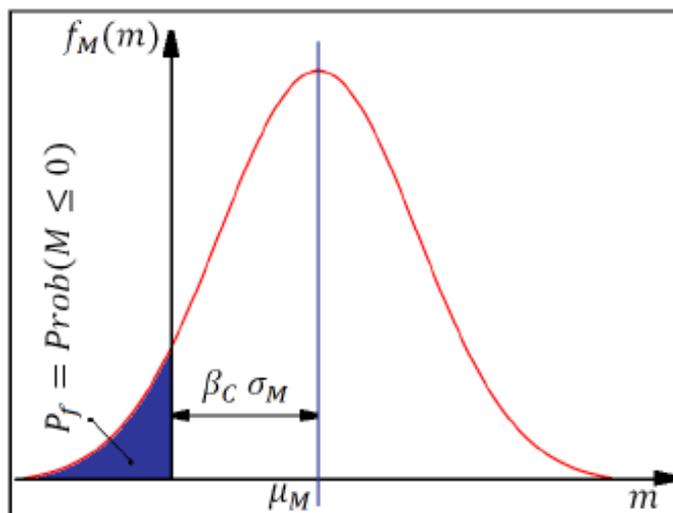


Fig II.4 : Interprétation géométrique de l'indice de fiabilité de *Cornell*  $\beta_c$

La probabilité de défaillance est :

$$P_f = Prob [M < 0] = \Phi \left[ \frac{\mu_C - \mu_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_C^2}} \right] = \Phi[-\beta_c]$$

L'indice apparait comme l'inverse du coefficient de variation de variable aléatoire  $Z$ . nous constatons sur la figure, que l'indice de fiabilité représente le nombre d'écart types nécessaires pour s'éloigner de la moyenne afin de se placer en sécurité.

On remarque que si on prend l'équation ... et en effectuant le changement de variable

$$y = \frac{(m - \mu_M)}{\sigma_M} \text{ afin de se placer dans l'espace normal réduit, on obtient :}$$

$$P_f = \int_{-\infty}^{-\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy = \Phi[-\beta_c]$$

$Y$  est dans ces conditions une variable normale réduite ( $\mu_Y=0, \sigma_Y=1$ ) qui est tabulée, et  $\Phi$  sa fonction de répartition. Les valeurs de  $\Phi(x)$  peuvent être obtenues sous forme tabulaire.

L'indice  $\beta_c$  est rigoureux seulement dans le cas des variables gaussiennes et l'état limite linéaire. Il permet en particulier de comparer la fiabilité entre différents choix de conception.

Le principal inconvénient de cet indice est qu'il n'est pas invariant, car sa valeur dépend de l'expression choisie pour définir la fonction d'état limite.

L'indice de fiabilité dépend donc du choix fait pour définir la fonction de défaillance.

Enfin, lorsque la fonction d'état limite  $G(X)$  est une fonction linéaire des variables de bases  $X$ , on calcule facilement l'indice de fiabilité à partir des deux premiers moments de  $X$ .

Dans le cas où  $G(X)$  est une fonction non linéaire, *Cornell* a suggéré d'approximer l'équation de la surface d'état limite par un développement en série de Taylor du 1<sup>er</sup> ordre.

### II.9.2 Indice de fiabilité de *Hasofer-Lind* :

L'indice de fiabilité de *Hasofer-Lind* permet de calculer directement la probabilité de défaillance lorsque toutes les variables ont des distributions normales et que la surface d'état limite est linéaire.

Si ce n'est pas le cas, on estime la probabilité de défaillance

$P_f = \Phi(-\beta_{HL})$  en effectuant une approximation linéaire de la surface d'état limite (méthode *FORM*). Mais comme en général les variables physiques ne sont pas normales, l'expression précédente n'est pas correcte. *Rackwitz et Fiessler* [15] ont donc proposé de résoudre ce problème grâce à une transformation des variables de base dans l'espace standard.

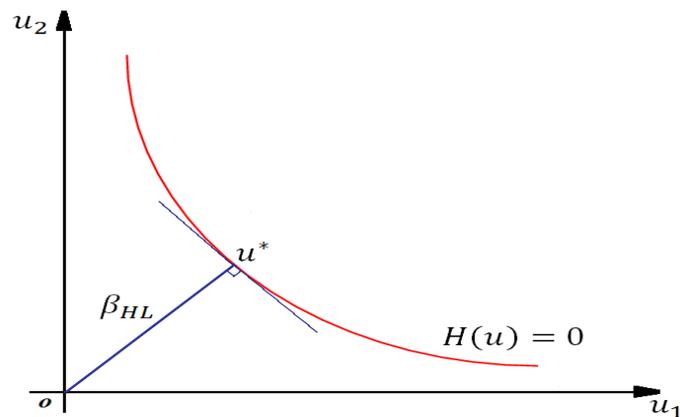
Compte tenu de ce qui précède, dans l'espace normal, on définit l'indice de fiabilité de *Hasofer-Lind*,  $\beta_{HL}$  comme la plus petite distance entre l'origine et la surface d'état limite. Le point  $u^*$  le plus proche de l'origine situé sur cette surface est, le point de défaillance le plus probable, appelé aussi

le point de conception ou design point. Pour déterminer la position de  $u^*$ , il faut donc résoudre un problème de minimisation de distance, avec pour condition supplémentaire une contrainte d'égalité traduisant l'appartenance de ce point à la surface d'état limite.

L'indice de fiabilité est donc représenté dans l'espace normal par la distance minimale entre l'origine et la surface de défaillance.

$$\beta_{HL} = \min_{H(u)=0} \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2}$$

Où  $H(u)$  est la fonction d'état limite exprimée dans l'espace standard. La figure illustre le concept de l'indice de fiabilité de *Hasofer et Lind*.



**Fig II.5** : Interprétation géométrique de l'indice de fiabilité de *Hasofer et Lind*  $\beta_{HL}$

## II.10 Méthode FORM :

*FORM (First Order Reliability Method)* (*Ditlevsen et Madsen, 1996, Lemaire, 2009*) [18], cette méthode d'approximation tend à remplacer l'état-limite réel  $G(x) = 0$  par un hyper-plan fig II.5. Elle s'appuie sur l'indice de fiabilité  $\beta$  de *Hasofer et Lind (1974)* et le point de défaillance le plus probable  $P^*$ . C'est le point appartenant à l'état-limite le plus proche de l'origine.

Il maximise donc la densité de probabilité des variables aléatoires dans le domaine de défaillance  $F$ . Ce point existe aussi bien dans l'espace physique que dans l'espace standard. Cependant, l'indice de fiabilité  $\beta$ , qui est la distance entre  $P^*$  et l'origine, n'est défini que dans l'espace standard. Les coordonnées de  $P^*$  sont notées  $u^* = \{u_1^*, \dots, u_2^*\}$ . La recherche de ce point est effectuée en résolvant un problème d'optimisation sous contraintes.

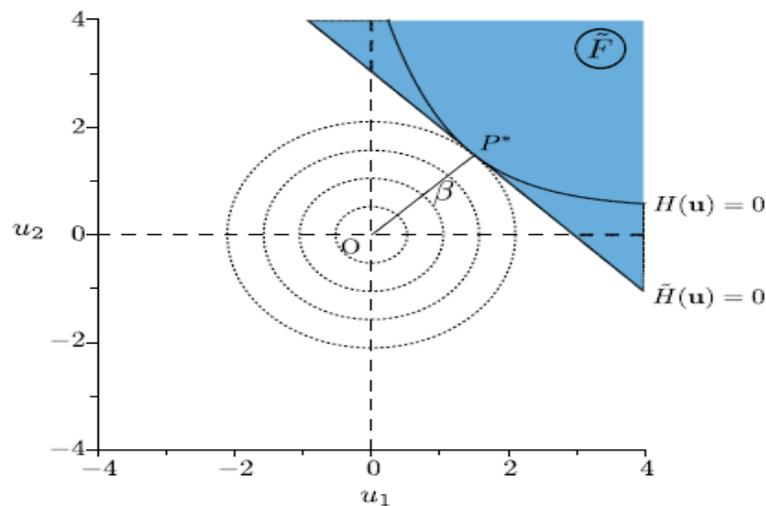
L'état-limite est donc linéarisé grâce à un développement de Taylor au premier ordre autour du point  $P^*$ . L'équation de l'hyper-plan obtenu, qui est une droite en deux dimensions, est la suivante :

$$\check{H}(u) = \sum_{i=1}^n \alpha_i u_i + \beta = 0$$

Où  $\alpha_i$  représente le cosinus directeur (dont la valeur varie entre -1 et 1) associé à la variable  $u_i$  et permet de définir l'orientation de l'état-limite. Le lien entre l'indice de fiabilité et le cosinus directeur est le suivant :

$$u_i^* = \beta \alpha_i$$

Cet hyper-plan est orthogonal à la droite  $(P^*O)$ , donc le domaine de défaillance approximé  $\tilde{F} = \{u \in U^n : \tilde{H}(u) \leq 0\}$  est délimité par l'hyper plan et ne contient pas l'origine (Si  $P_f < 0.5$ ).



**Fig II.6 :** Principe de la méthode *FORM*. Les cercles concentriques représentent les iso-valeurs de la densité de probabilité Gaussienne standard.  $\tilde{F}$  est le domaine de défaillance approximé.

**Remarques à propos de FORM :**

- Dans le cas où la fonction de performance est linéaire, et que les variables aléatoires sont Gaussiennes, la méthode FORM ( $P_f = \Phi(-\beta)$ ) permet théoriquement d'obtenir la valeur exacte de la probabilité de défaillance. Mais la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite s'exprime sous la forme d'une intégrale dont il n'existe pas de solution analytique :

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

Elle peut être obtenue par intégration numérique, par des tables ou par des expressions approchées.

- L'inconvénient de la méthode *FORM* est que l'approximation trouvée pour  $Pf$  peut être de mauvaise qualité. Il arrive que dans certains cas, la recherche du point  $P^*$  échoue ou bien qu'il y ait plusieurs points  $P^*$  à prendre en compte.

- A chaque itération de l'algorithme de recherche de point  $P^*$ , l'ordre de grandeur du nombre d'itérations est assez grand. En conséquence, la méthode *FORM* se classe parmi les méthodes économiques lorsqu'elle fonctionne, soit dans la plupart des cas.

# ***Technique d'inférence bayésienne***

---

## **Introduction :**

L'inférence bayésienne est une méthode d'inférence permettant de déduire la probabilité d'un événement à partir de celles d'autres événements déjà évalués. Elle s'appuie principalement sur le théorème de Bayes.

L'analyse bayésienne est une méthode d'analyse statistique descriptive. En effet, c'est pour des raisons essentiellement méthodologiques que des extensions d'analyses classiques ou traditionnelles ont été élaborées dans le cadre de la théorie bayésienne, afin d'utiliser tout simplement toutes les ressources mathématiques, qui, alliées aux immenses possibilités ouvertes par le calcul automatique, en font une théorie intéressante. Bien que sophistiquée, cette méthodologie permet de couvrir une bonne partie des domaines d'applications des méthodes d'analyses habituelles : elle apporte à la fois des compléments appréciables dans la pratique expérimentale et des conclusions plus complètes; elle permet d'améliorer les procédures existantes parfois mal adaptées à des situations particulières.

## **III.1. Les conceptions de probabilités : probabilités subjectives et objectives :**

On peut distinguer quatre écoles et quatre conceptions pour définir les probabilités :

### **III.1.1 L'école objective :**

Cette école considère que la mesure de la fréquence d'évènements aléatoires répétitifs est, en fin de compte, le meilleur moyen de définir leur probabilité, école dans laquelle on peut distinguer :

- L'approche fréquentielle ou fréquentiste ; dans laquelle la probabilité est définie comme la limite de la fréquence relative des observations faites au cours d'épreuves aléatoires identiques et indépendantes, par rapport au nombre total de cas supposés tous également possibles, lorsque le nombre d'épreuves tend symboliquement vers l'infini.

Cette définition devrait préciser que la fréquence relative doit tendre vers une limite définie avec une forte probabilité, et non pas avec certitude absolue, d'où un raisonnement circulaire où l'on utiliserait le terme de probabilité pour définir cette même probabilité.

- La notion de probabilité symétrique, tirée de jeu d'hasard, qui représente le nombre de cas favorables à la réalisation d'un évènement sur le nombre total des cas possibles, chacun d'entre eux étant supposé généralement possible.

Comme dans la définition précédente, on retombe sur un raisonnement circulaire puisque « également possible » signifie tout simplement équiprobable.

- La notion axiomatique du calcul des probabilités : pour échapper au concept de circularité, il suffit de ne pas définir le concept de base, mais de poser les règles ou axiome qui lui sont applicables et d'en tirer un certain nombre de conclusions.

### **III.1.2 L'école subjective :**

Elle a été développée pour répondre aux contradictions précédentes, et aussi pour généraliser le concept des probabilités aux événements rares et uniques (répondant donc difficilement à la notion de fréquence).

Cette école consiste à associer un degré de croyance personnelle (ou degré de confiance) dans l'évaluation de la probabilité d'une proposition donnée, à la fréquence observée de sa réalisation.

Keynes, Ramsay, de Finetti et Savage, ont développé les fondements de cette nouvelle école, qui prendra de l'importance dans les situations décisionnelles, grâce au principe de d'utilité subjective qui associe la probabilité des événements à celle de leur conséquence (Von Neumann, Morgenstern).

La difficulté associée à cette école est l'évaluation de la première probabilité à priori : pour un même événement, celle-ci pourra prendre des valeurs différentes en fonction de l'environnement, la formation, ou l'information disponible à chacun des individus concernés.

Par contre, le poids relatif de cette évaluation initiale va s'amenuiser au fur et à mesure qu'arrivent de nouvelles informations, et lorsque la fréquence des événements deviendra importante, les probabilités subjectives se rapprocheront des probabilités objectives.

La deuxième difficulté concerne le principe d'utilité, ou fonction de satisfaction, qui dépend aussi des individus : telle conséquence sera inadmissible pour l'autre. Elle a, en outre, pour caractéristique de ne être additive, d'où une grande difficulté de trouver un consensus pour un optimum.

En effet, la décision prise finalement sera unique, quel que soit le poids relatif de chacune des décisions élémentaires quant à leur utilité respective (pondérée par leur probabilité d'occurrence).

Ces décisions élémentaires ne peuvent être additionnées compte tenu de leur subjectivité [19].

### **III.2 Evaluation de la probabilité subjective : concept d'indifférence :**

La probabilité subjective étant par définition le degré de croyance dans l'occurrence d'un événement incertain, il ne peut y avoir de probabilité inconnue, même si cet événement est rare.

Mais comment en donner une première estimation a priori ?

Pour cela, DE Grootte a proposé le principe de vraisemblance relative qui permet de comparer la probabilité de deux évènements distincts : ainsi, dire que la probabilité de  $(A) \leq \text{probabilité de } (B)$  signifie, pour un individu, que l'évènement  $A$  est moins (ou également) probable que l'évènement  $B$ . Ce principe est facilement vérifié par la possibilité qu'ont les individus à classer de façon ordonnée les probabilités d'évènements. Par contre, il leur est plus difficile de donner une valeur absolue à cette probabilité subjective. Ramsay, pour répondre à cela, a proposé le concept d'indifférence entre deux options différentes. Ce concept correspond à une proposition « éthiquement neutre » où le degré de croyance est équilibré entre ces deux options 50%.

Remarque :

- la probabilité subjective est toujours une probabilité conditionnelle puisqu'elle dépend de l'information disponible : ainsi dans le cas du choix entre plusieurs solutions techniques, plus l'analyse du problème sera précise, plus le risque de se tromper sera faible
- il n'existe pas de probabilité inconnue : on peut toujours affecter une probabilité subjective à des évènements incertains ou rares.

### **III.3 Les limites de l'estimation fréquentielle classique :**

Dans la démarche classique, on cherchait à établir la probabilité d'occurrence d'un événement futur (défaillance ou survie), en assimilant cette probabilité à la fréquence des événements passés : cette probabilité est dite objective. Elle n'est pas toujours rationnelle : des modifications peuvent intervenir sur le matériel, ou sur son fonctionnement, les cycles de maintenance peuvent évoluer... D'autres, l'incertitude croît très rapidement lorsque les données d'observation sont rares.

La démarche bayésienne est une alternative aux démarches classiques. Elle fait appel aux probabilités subjectives : l'information disponible a priori intégrant l'état de la connaissance et l'effet des différents facteurs d'influence sur la probabilité recherchée, est jointe aux observations de retour d'expérience, ce qui permet de calculer une probabilité prévisionnelle, dite a posteriori, de l'occurrence d'un événement à venir.

La façon de combiner l'opinion des experts ou la connaissance du passé, avec des observations statistiques du retour d'expérience, découle directement de l'application du théorème de Bayes.

L'originalité de cette démarche est qu'elle prend en compte toute l'information disponible, modélisée sous forme de densités de probabilité, tant pour la distribution statistique des observations que pour celle de l'estimation a priori.

La probabilité a posteriori est donc aussi représentée par une distribution de densité de probabilité où aucune information n'est perdue : en théorie, toute forme de distribution peut être envisagée. L'intégration de cette distribution dans son domaine de variation est une valeur unique correspondant à la probabilité prévisionnelle.

Par contre, les difficultés de cette démarche sont liées à la façon de modéliser les connaissances initiales, et aux problèmes de résolution numérique.

### **III.4 Intérêt de la démarche bayésienne :**

L'application de la démarche bayésienne est particulièrement bien adaptée aux études de risques (lorsque par nature les événements dont on veut se protéger sont rares), à la réalisation d'une installation de conception nouvelle (lorsque le retour d'expérience est d'un faible secours), ou aux études à caractère économique comme celles relatives à l'optimisation de la maintenance des matériels.

Dans ce dernier cas, en effet, l'identification de matériels ou de composants jugés critiques vis-à-vis de la sûreté ou de la disponibilité d'une installation devient incertaine dès lors que l'on s'intéresse à un découpage fonctionnel de plus en plus fin, donc à un échantillon statistique d'observations de plus en plus faible.

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

Enfin, des notions tout à fait subjectives peuvent être introduites dans l'estimation a priori afin de tenir compte de facteurs nouveaux qui peuvent influencer la probabilité d'occurrence future des événements : des modifications sont en effet apportées en permanence sur les matériels pour tenir compte implicitement du retour d'expérience : modification du fonctionnement, de la maintenance ou même de la conception du matériel. L'avis d'experts sur les conséquences de ces modifications peut être pris en compte dans la démarche bayésienne, donnant ainsi plus de rationalité à la probabilité prévisionnelle a posteriori.

### **III.5 Théorème de Bayes :**

Le théorème de Bayes est une conséquence simple des axiomes et de la définition des probabilités conditionnelles : on peut donc l'utiliser pour évaluer les probabilités subjectives qui tiennent compte de l'estimation a priori faite sur ces probabilités, elles-mêmes conditionnées par les observations du retour d'expérience (*PROCCAIA ET AL 1992.*)

**Formule de Bayes**

Soit l'espace probabilisé  $(\Omega, A, P)$ ,  $\Omega$  est l'ensemble de tous les résultats possibles,  $A$  est l'ensemble de tous les événements auxquels on pourra attribuer une probabilité, et  $P$  est cette mesure de probabilité, dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1.

Soient deux évènements  $A$  et  $B$  d'un espace probabilisé  $(\Omega, A, P)$ , avec  $P(B) \neq 0$ .

Alors :

$$P(A/B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} = \frac{P(A)P(B|A)}{P(B)}$$

Le terme  $\frac{P(A \cap B)}{P(B)}$  est la définition de la probabilité conditionnelle, et la formule de Bayes est son expression avec l'autre probabilité conditionnelle. De façon générale, il s'agit d'exprimer l'une quelconque des deux probabilités conditionnelles en fonction de l'autre [20].

En conséquence, si on connaît dans le détail les causes possibles d'une conséquence observée et leurs probabilités, l'observation des effets permet de remonter aux causes.

Remarquez que l'inversion de la probabilité introduit le terme  $P(A)$ , la probabilité *a priori* de l'évènement  $A$ , indépendamment de l'évènement  $B$ . Cette *estimation a priori* est ignorée par les autres méthodes probabilistes.

La règle de Bayes montre comment la vraisemblance modifie la probabilité *a priori*. Cette vraisemblance peut être issue soit des observations du retour d'expérience, soit des opinions d'expert.

**III.6 Application à l'évaluation de la fiabilité des équipements :**

La démarche bayésienne permet d'obtenir, comme on l'a vu, la distribution prévisionnelle de la quantité inconnue recherchée, et non une valeur ponctuelle estimée la plus probable. D'autre part, une information complémentaire, les connaissances *a priori*, sont apportées au retour d'expérience, la dispersion sur la distribution sera donc plus faible.

Etant donné la symétrie entre une probabilité subjective (*a priori*) et les observations réelles (vraisemblance), le résultat final (*a posteriori*) dépend du choix de la distribution *a priori*, et du poids relatif des observations du retour d'expérience. Si ce dernier est important, il l'emporte sur l'*a priori*, et le résultat bayésien est proche du résultat statistique fréquentiel, vérifiant en cela le fait

que lorsque le nombre d'observations devient important, la probabilité subjective tend vers la probabilité objective.

C'est donc lorsque les données d'observations sont rares, ou lorsqu'il y a une rupture dans la conception ou le fonctionnement d'un matériel, que la démarche bayésienne présente de l'intérêt, et que la modélisation du jugement a priori prend toute son importance.

### **III.7 Choix de distribution de densité de probabilité a priori :**

L'inférence paramétrique est la démarche la plus couramment utilisée par les statisticiens. Elle nécessite la prise en compte d'une densité de probabilité a priori sur le paramètre cherché, et des observations du retour d'expérience.

Le choix d'une distribution a priori va dépendre essentiellement de la qualité de l'information préalablement disponible, et, pour des raisons pratique de calculs, du type de la famille mathématique de la fonction de vraisemblance des observations faites. On peut toutefois remarquer que cette seconde condition ne s'impose pas compte tenu des possibilités actuelles des ordinateurs en matière de résolution numérique.

La distribution a priori doit permettre de résumer toute l'information disponible sur le paramètre recherché, ainsi que toute l'incertitude associée à ce paramètre. Un certain nombre de distributions caractéristiques s'imposent en fiabilité.

Ainsi, lorsque la connaissance initiale est faible, on choisit préférentiellement une distribution simple peu informative, de sorte que chacune des valeurs du paramètre recherché soit équiprobable dans son domaine possible de variation : c'est le cas des distributions uniformes qui représentent alors un certain état d'ignorance.

Au contraire des distributions plus sophistiquées peuvent caractériser un niveau de connaissance plus élevé sur le paramètre recherché.

Avant de faire la détermination de la distribution à priori, il faut distinguer deux sortes d'informations a priori : la première est constituée par la connaissance des résultats d'expériences aléatoires régies par une suite de variables aléatoires, suivant une certaine distribution, on dira que l'information est fondée sur des données antérieures.

Dans le cas contraire, on dira qu'elle est subjective.

Pour ce qui concerne la vraisemblance des observations faites, si les événements dont on recherche la probabilité d'occurrence sont supposés :

- Totalement aléatoires, la distribution des temps de défaillance est modélisée par une loi exponentielle caractérisant la distribution des temps de défaillance. Lorsque l'occurrence des événements est faible, la loi de Poisson permet d'estimer le nombre d'événements susceptibles de se produire pendant une durée déterminée,

- dépendre du temps, une loi de Weibull ou une loi gamma peuvent représenter des événements dont le nombre décroît (période de jeunesse), ou croît (usure) avec le temps : ces hypothèses conduisent à rechercher les paramètres de forme ou d'échelle de ces lois, en tenant compte des hypothèses précédentes.

-mutuellement exclusifs correspondant donc à des essais dont on mesure les succès ou les échecs : on recherchera les paramètres des lois de la famille binomiale (Bernoulli, Pascal, géométrique), ou d'une loi bêta.

Enfin, lorsque les experts sont en mesure d'estimer une valeur moyenne et un écart type d'un paramètre déterminé : équation de défaillance déterministe, problèmes d'échantillonnage ou de tolérance sur des équipements, la distribution de ce paramètre est choisie normale ou log-normale.

Mais, dans certaines conditions, le calcul de la densité de probabilité a posteriori peut s'avérer complexe et nécessiter une résolution numérique de l'intégration des distributions jointes.

Pour cette raison essentiellement technique, on choisit très souvent une distribution pour la densité de probabilité a priori qui soit de la même famille que celle de la fonction de vraisemblance des observations faites : dans ces conditions, la distribution a posteriori appartient à cette famille, et ses paramètres sont la somme des paramètres des deux distributions jointes, ce qui facilite les calculs.

De telles distributions sont dites conjuguées.

Enfin, la distribution de probabilité a priori est modélisée en fonction de l'origine des connaissances initiales : expertise (approche purement bayésienne), ou retour d'expérience passé (démarche séquentielle ou dynamique).

La détermination de la distribution a priori constitue une difficulté de mise en œuvre de la méthodologie bayésienne : il convient de choisir une distribution a priori qui soit effectivement le reflet d'une information détenue sur le paramètre à estimer [21,22].

### **III.8 Détermination de la distribution a posteriori :**

Connaissant la forme analytique de la distribution des défaillances ou de la durée de vie d'un matériel, à partir de laquelle est élaborée une densité de probabilité a priori, puis ayant recueilli un retour d'expérience, il est possible d'estimer les paramètres de fiabilité a posteriori de ce matériel, soit :

- le taux de défaillance en fonctionnement, et la probabilité de défaillance à la sollicitation,
- le temps moyen entre défaillances,
- la fiabilité pour une durée de mission donnée.

La distribution a posteriori du paramètre recherché représente l'actualisation de l'information a priori. Cette distribution a posteriori joue alors un rôle fondamental dans l'approche bayésienne. D'après ce qui vient d'être introduit, la distribution a posteriori est une conséquence méthodologique, d'où l'intérêt de déterminer cette distribution a priori

### **III.9 Information subjective et Vraisemblances relatives :**

Le point de vue bayésien permet d'utiliser l'information antérieure (souvent des échantillons provenant de productions semblables) pour obtenir une connaissance a priori sur le paramètre étudié, paramètre pouvant prendre différentes valeurs avec leurs probabilités d'occurrence. L'analyse descriptive intègre ces valeurs et donne avec une bonne précision la distribution prévisionnelle  $p(x)$ , estimée la plus probable, dans l'approche classique [22].

### **III.10 Comparaison entre l'inférence fréquentielle et l'inférence bayésienne :**

A l'opposé de l'analyse fréquentielle des données de retour d'expérience, qui est purement statistique et qui s'appuie sur le concept de la probabilité objective, qui suppose que la fréquence des événements est égale à leur probabilité, lorsque le nombre de ces événements tend vers l'infini, la démarche bayésienne est dite subjective. Car dans cette démarche la probabilité est considérée comme un concept personnalisé, dépendant au degré de croyance que chaque individu porte sur l'occurrence d'un événement : elle dépend à la fois du retour d'expérience disponible, des connaissances de l'analyse, ou d'experts, et de l'intime conviction de ces derniers. Le retour d'expérience est donc enrichi par une expertise. Cette démarche complète bien l'analyse fréquentielle dans le domaine des événements rares.

Autre retombée intéressante, l'analyse statistique bayésienne réconcilie statisticiens et experts, puisque ces derniers voient que leur avis est non seulement pris en compte, mais qu'il peut aussi infléchir sensiblement la valeur finale de la probabilité.

Aussi, lorsque les événements du passé ne sont plus représentatifs des situations du futur, car des modifications sont intervenues sur la conception des matériels, leur exploitation, ou leur

maintenance, il est plus rationnel d'utiliser la démarche bayésienne que la démarche fréquentielle pour prévoir les conséquences de ces modifications.

D'une manière générale, cette analyse apporte, dans le domaine des modèles descriptifs, les idées suivantes :

- L'analyse statistique permet, dans la planification des expériences, de considérer toutes les informations quantitatives et qualitatives sur l'incertitude dans les modèles étudiés.
- Le paramètre recherché est considéré, dans l'approche classique, comme une grandeur inconnue (un vecteur dans le cas multidimensionnel), mais certaine. Dans l'approche bayésienne, il peut prendre plusieurs valeurs possibles, avec des probabilités associées, ce qui conduit à trouver des distributions sur l'espace des paramètres. Différents modèles sont adaptés à ces développements.
- Des informations sur ce paramètre recherché avant échantillonnage permettent d'évaluer une loi de distribution, dite "a priori". L'analyse bayésienne consiste à déduire de cette loi de distribution, grâce au théorème de Bayes, une distribution dite "a posteriori", en ajustant la valeur du paramètre par un jugement probabiliste de l'incertitude compte tenu des données recueillies dans un échantillon  $x$ .

Cette analyse bayésienne intègre, outre le plan d'échantillonnage traditionnel, les résultats d'expériences conçues antérieurement et les exploite de manière optimale lorsque les données expérimentales sont insuffisantes pour appliquer l'analyse fréquentiel.

# *Régime d'écoulement transitoire suite à une fermeture d'une vanne*

---

## **Introduction :**

Toute modification du régime permanent de l'écoulement dans un système, notamment suite à une modification de vitesse ou du débit, provoquée par une manœuvre d'une vanne ou par un arrêt brusque de pompage, génère un ensemble complexe de phénomènes appelé écoulement transitoire ou non permanent ou encore coup de bélier. Cet écoulement entraîne souvent de brusques variations de pression, si la modification du débit est brutale. Les perturbations correspondantes peuvent se révéler très dangereuses et causer d'énormes dommages matériels.

Les phénomènes transitoires ont pour origine une variation de pression ou de débit. Les effets peuvent être très divers, il importe alors d'étudier la configuration du réseau hydraulique pour prédire les impacts des effets transitoires. Parmi toutes les origines possibles du coup de bélier, on mentionnera ici la configuration la plus susceptible de générer des coups de bélier importants dans une canalisation de refoulement, on abordera seulement le régime transitoire généré par la fermeture brusque d'une vanne

En effet, bien que le fonctionnement en régime transitoire d'une installation hydrocarbure soit très exceptionnel, les phénomènes qui en résultent peuvent avoir des conséquences fâcheuses. Si la fermeture est très rapide et n'est pas contrôlée correctement, des variations importantes de pressions auront lieu dans la partie finale de la fermeture. Ainsi, la surpression générée peut entraîner la rupture de la canalisation.

## **IV.1 Généralité sur les régimes d'écoulement :**

### **IV.1.1 Régime d'écoulement permanent :**

Quand un liquide est en mouvement dans une conduite et que le mouvement ne varie pas dans le temps, il y a un état d'équilibre, entre l'énergie disponible (potentielle) et les énergies dues au mouvement (cinétique) et l'énergie perdues par le frottement, ce qui définit un mouvement permanent.

Autrement dit, l'écoulement d'un fluide est dit permanent si en tout point de la conduite les paramètres hydrauliques dans une section donnée ne changent pas en fonction du temps.

### **IV.1.2 Régime d'écoulement transitoire :**

On appelle régime transitoire, un état d'écoulement qui se manifeste entre deux régimes stationnaires, c'est un écoulement varié, où les variables d'état changent.

Autrement dit, l'écoulement est non permanent ou transitoire si les grandeurs physiques caractérisant l'écoulement dans chaque point de l'espace varient dans le temps, c'est-à-dire l'équilibre des forces agissant sur ce système est modifié.

Ces régimes transitoires peuvent créer des charges très supérieures à celles des régimes permanents. De plus, ils peuvent générer des fonctionnements instables.

Pour le cas de la fermeture brusque d'une vanne sur la conduite, la surpression affecte la conduite sur toute sa longueur à l'exception du point situé à l'extrémité où la pression garde la valeur constante qu'impose la station jusqu'à la disjonction de cette dernière.

### **IV.2 Ecoulement transitoire engendré par la fermeture d'une vanne dans les conduites:**

Dans une conduite, dotée d'une vanne, la fermeture de cette dernière provoquera une variation de vitesse et de pression en fonction du temps, c'est-à-dire qu'un régime variable se substituera au régime permanent initial. Ceci aura pour effet à l'endroit de la vanne :

- Annulation de la vitesse.
- Augmentation de la pression.
- Dilatation (éventuel allongement) de la conduite dans les limites élastique.

Les surpressions ou les dépressions peuvent atteindre des grandeurs assez considérables si la manœuvre de la vanne est suffisamment rapide et brusque et il peut en résulter de ces chocs des accidents de rupture des conduites. C'est pourquoi, ces dernières doivent toujours être examinées du point de vue effet du coup de bélier, dont la brutalité est susceptible d'entraîner l'éclatement des canalisations en cas des surpressions élevées ou l'aplatissement de ces conduites en cas des dépressions.

#### **IV.2.1 Phénomène du coup de bélier :**

Les changements du régime d'écoulement d'un fluide contenu à l'intérieur d'une conduite entraînent souvent de brusques variations de pression. Ces écarts seront d'autant plus importants que la modification du débit a été brutale.

D'une manière générale, le coup de bélier exprime toute variation de pression dans une conduite, consécutive à une manœuvre quelconque de l'obturateur aval. Le coup de bélier est un phénomène non stationnaire de propagation d'ondes de pression à très hautes vitesses. Autrement dit, c'est l'arrêt brutal de la circulation du fluide lorsqu'un organe provoque une prompt modification du débit. Par conséquent, les forces dynamiques qui en résultent peuvent engendrer des ruptures de canalisations, dégâts matériels et quelques fois des pertes de vies humaines, d'où la nécessité de renforcement des ouvrages concernés, en particulier les conduites appelées alors conduites forcées (Boillat et De Souza, 2009) [23].

L'importance de la surpression dépend de nombreux facteurs :

- temps de fermeture des vannes.
- longueur, diamètre et type de matériaux des canalisations
- vitesse de l'écoulement.

Pour pouvoir calculer la surpression lors d'un coup de bélier, la formule suivante prend en compte, de façon instantanée, les caractéristiques habituelles d'une installation:

$$\Delta P = \rho * g * \frac{2VL}{t}$$

Où :

$\Delta P$ : est la surpression due au coup de bélier (Pa)

V : est la vitesse du fluide au moment de la fermeture (m/s)

L : est la longueur du tube (m)

g : est l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s<sup>2</sup>)

t : est le temps de fermeture de la vanne (s)

La Formule précédente valable si  $t > t^*$ . Si l'on veut définir simplement le "temps de fermeture" (mieux défini comme "temps de réaction") on peut utiliser la formule suivante :

$$t^* = \frac{2L}{a}$$

Où

$t^*$ : est le temps de réaction de la vanne (s)

L: est la longueur du tube (m)

a: est la vitesse de propagation de l'onde (m/s) (en fonction du type de fluide, des matériaux, du diamètre interne et externe de la canalisation).

Pour les systèmes mécaniques tels que électrovannes, vannes à sphère etc., tous les temps de fermeture  $t \leq t^*$  sont définis comme "manœuvres brusques", car ils provoquent dans le tube un coup

de bélier avec une surpression d'intensité maximum. Au contraire, un temps de fermeture  $t > t^*$  sera défini comme "manœuvre lente" et provoque un coup de bélier avec une surpression d'une intensité moins dangereuse.

#### **IV.2.2 Risques et dommages conséquents aux coups de bélier :**

Potentiellement, le coup de bélier peut poser de graves conséquences pour les installations hydrocarbures. Les risques et avaries causés par ce régime transitoire sont de plusieurs ordres, nous citons (Meunier, 1980 ; Thorley, 2004) [24]:

- ***Surpressions excessives :***

Conduit à des déformations permanentes ou la rupture des conduites ainsi que ses organes hydrauliques de contrôle, déboîtement de joints, fuites massives et désordres d'infrastructures. Ceci peut arriver si la pression totale, c'est-à-dire la pression en régime permanent majorée de la valeur de surpression due au coup de bélier dépasse la pression maximale admissible des canalisations.

- ***Très basse pression :***

Peut causer l'aplatissement des conduites et aspiration des joints, et contamination du fluide si en un point de la conduite la pression atteint le vide barométrique.

- ***Mouvements et vibration des conduites :***

A pour conséquence la surcharge et sollicitation dynamique des supports d'ancrage et butées conduisant par conséquent à la rupture de ces derniers et de la conduite elle-même. Ce phénomène se manifeste généralement quand la conduite entre en état de résonance.

#### **IV.3 Analyse physique des écoulements transitoires :**

On connaît que la fermeture d'une vanne placée sur une conduite entraîne l'apparition d'une onde de surpression se propageant à une grande vitesse, appelée célérité d'onde. Par contre, lors de l'ouverture de cette même vanne, une onde de dépression prend naissance à cet endroit et se propage à la même célérité vers l'amont.

Soit une conduite horizontale et l'écoulement est permanent avec une vitesse moyenne  $v_0$  et une pression  $p_0$ .

La propagation d'une onde des écoulements transitoires en charge est un processus de transport d'énergie. Ce sont les phénomènes de compressibilité qui permettent d'expliquer la propagation des ondes élastiques dans les milieux matériels.

La compressibilité d'un milieu fluide, peut être définie au moyen de son module d'élasticité  $\varepsilon$  donné par la relation suivante :

$$\frac{dp}{\varepsilon} = \frac{d\rho}{\rho}$$

Ou encore :

$$\frac{\varepsilon}{\rho} = \frac{dp}{d\rho}$$

Entre la variation relative  $\frac{dp}{d\rho}$  de la masse volumique et la variation  $dp$  qui la produit, l'expression que l'on peut aussi écrire :

$$\varepsilon = - \frac{dw}{\frac{dw}{w}}$$

$dw$  : étant la variation du volume  $w$  produite par une variation de la pression  $dp$ . Le signe moins tient compte du fait que le volume spécifique diminue quand la pression augmente.

On remarque que le rapport  $\frac{\varepsilon}{\rho} = \frac{dp}{d\rho}$  a les dimensions du carré de la vitesse du son dans le fluide considéré :

$$a_0^2 = \frac{\varepsilon}{\rho}$$

$$a_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}} \quad (a_0 : \text{La vitesse du son dans l'eau})$$

On introduit également le module de compressibilité  $\chi$  qui est égal à l'inverse de  $\varepsilon$  :

$$\chi = \frac{1}{\varepsilon}$$

Sous l'action de la pression  $p$ , la matière de la canalisation est soumise à une contrainte  $\sigma$ . Soit une conduite de longueur  $L$  et d'épaisseur  $e$  soumise à la pression  $p$ .

On Considère l'équilibre de la moitié de la conduite (Fig IV.1) :

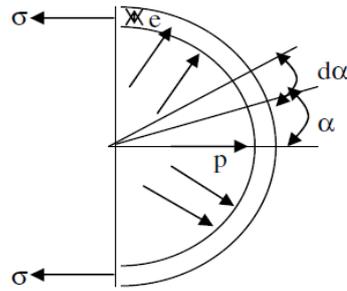


Fig IV.1 : Dilatation de la conduite

$$\int_{-\frac{2}{\pi}}^{\frac{2}{\pi}} p \cos \alpha dS - 2\sigma L e = 0$$

Puisque :  $ds = Lr d\alpha$

$$\int_{-\frac{2}{\pi}}^{\frac{2}{\pi}} PLr \cos \alpha d\alpha - 2\sigma L e = 0$$

D'où il vient :  $\sigma = \frac{pD}{2e}$

$D$  : diamètre intérieur de la conduite,

$e$  : épaisseur de la paroi.

La variation de pression  $dp$  entraîne une variation  $d\sigma$  de la contrainte et on a :

$$d\sigma = \frac{D}{2e} dp$$

L'augmentation de la contrainte  $d\sigma$  (effort) entraîne un accroissement du diamètre  $dD$  (déformation) donné par la loi de Hooke :

$$d\sigma = E \frac{dD}{D}$$

Avec  $E$  : module d'Young ou module d'élasticité de la paroi de la conduite.

Ceci suppose implicitement que la dilatation est purement transversale et qu'il n'y a pas de dilatation longitudinale, c'est-à-dire que la conduite est constituée d'anneau juxtaposés.

Des relations précédentes, on déduit :

$$\frac{dD}{D} = \frac{d\sigma}{E} = \frac{Ddp}{2Ee}$$

On rappelle que  $E$  est le module d'élasticité longitudinale tandis que  $\varepsilon$  est le module d'élasticité volumique.

L'accroissement du diamètre  $dD$  entraîne un accroissement de la section  $dS$  tel que:

$$\frac{ds}{s} = \frac{2dD}{D}$$

Donc :

$$\frac{ds}{s} = \frac{2dD}{D} = \frac{Ddp}{Ee}$$

Les phénomènes de compressibilité et de dilatation permettent d'expliquer la propagation des ondes de coup de bélier dans les milieux matériels et que le postulat déjà annoncé associé à ces phénomènes suffit pour trouver, sans aucun autre appareil mathématique, les lois fondamentales des variations de régimes en faisant appel uniquement aux principes élémentaires de la mécanique physique.

#### **IV.4 Modélisation écoulements transitoires dans les gazoducs :**

D'un point de vue mathématique, les régimes transitoires dans les gazoducs sont analysés par la résolution d'un système d'équations différentielles aux dérivées partielles soumises à des conditions initiales et aux limites caractérisant le cas étudié. En d'autres termes, il s'agit de définir les distributions de pression et de débit en fonction de la distance et du temps  $P(x,t)$  et  $Q(x,t)$  [25] :

- Equation de conservation de masse:

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = -\frac{c^2}{A} \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x}$$

- Equation de conservation des moments :

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} = -A \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} - \frac{\lambda c^2}{2DA} \frac{|Q(x,t)|}{P(x,t)} Q(x,t)$$

- Equation d'état :

$$P = P(Z, R, T)$$

- Conditions initiales :

$$Q(0,0) = Q_0$$

$$P(L,0) = P_{L0}$$

- Conditions aux limites :

$$Q(0,t) = Q_0(t)$$

$$Q(L,t) = Q_L(C_V, T_{fV})$$

avec :

$$x \in [0, L], x \in [0, T_S]$$

Où :

$P$  : pression

$Q$  : débit

$c$  : vitesse du son dans le gaz

$\lambda$  : Coefficient de friction

$D$  : diamètre de la canalisation

$A$  : Section transversale de la canalisation

$Z$  : Coefficient de compressibilité du gaz

$R$  : Constante universelle des gaz

$T$  : température

$T_S$  : Durée de simulation

$C_V$  : Caractéristique de débit de la vanne

$T_{fV}$  : Durée de fermeture de la vanne

Les difficultés mathématiques inhérentes à la résolution de ce type de système ont conduit à l'apparition sur le marché de simulateurs dynamiques très puissants pouvant prendre en charge toutes les configurations possibles en régime non stationnaire.

## V. Analyse d'intégrité du gazoduc en régime stationnaire et transitoire :

### Calcul de probabilité de défaillance d'un gazoduc corrodé dans le régime stationnaire et le régime transitoire :

Dans notre étude, nous nous intéressons au calcul de la probabilité de défaillance du gazoduc GZ2 en présence de corrosion, en s'appuyant sur une approche défaut par défaut sur la base d'une seule inspection.

Pour cela, nous avons adopté une approche fiabiliste structurale, cette approche implique l'utilisation d'estimations probabilistes sur la base de techniques de la mécanique de rupture pour calculer la probabilité de défaillance du pipeline et son évolution en fonction du temps.

Une inspection unique ne permet pas de faire une prédiction de l'état de la canalisation au cours du temps et en particulier de la vitesse de corrosion qui est un paramètre essentiel pour l'estimation de l'évolution de la perte de métal dans le temps. Pour pallier à cet inconvénient, nous avons mis à contribution dans notre travail une approche bayésienne pour l'estimation de la vitesse de corrosion. La méthode d'inférence permettant de déduire la probabilité d'un événement à partir de celles d'autres événements déjà évalués.

L'approche développée dite "point par point" considère chaque défaut séparément et puisque le tronçon contient plusieurs défauts de corrosion, ces derniers sont considérés comme des éléments indépendant assemblés en série et par conséquent, toute rupture due à un défaut de corrosion entrainera automatiquement la rupture du tronçon.

Ramené au cas d'un pipeline corrodé, il paraît judicieux de considérer les dimensions de perte de métal comme condition de charge et les dimensions admissibles du défaut comme condition de résistance [19 Dawson 2001, 20 Younsi] [25]. Autrement dit, la défaillance se produit lorsque la profondeur de corrosion  $d$  atteint la profondeur critique  $d_{cr}$ .

La démarche suivie pour la détermination de la probabilité de défaillance du gazoduc sera détaillée dans ce chapitre en prenant l'exemple d'un seul défaut, qui sera généralisée à l'ensemble des défauts.

Les caractéristiques du défaut pris comme exemple sont regroupées dans le tableau suivant.

<i>Position du défaut (m)</i>	<i>Longueur (mm)</i>	<i>Profondeur (mm)</i>
8986,2	33,0	9,27

**Tab V.1** : Caractéristiques du défaut situé au PK8.9562

La démarche de détermination de la probabilité de défaillance est décrite sur le schéma ci-dessous.

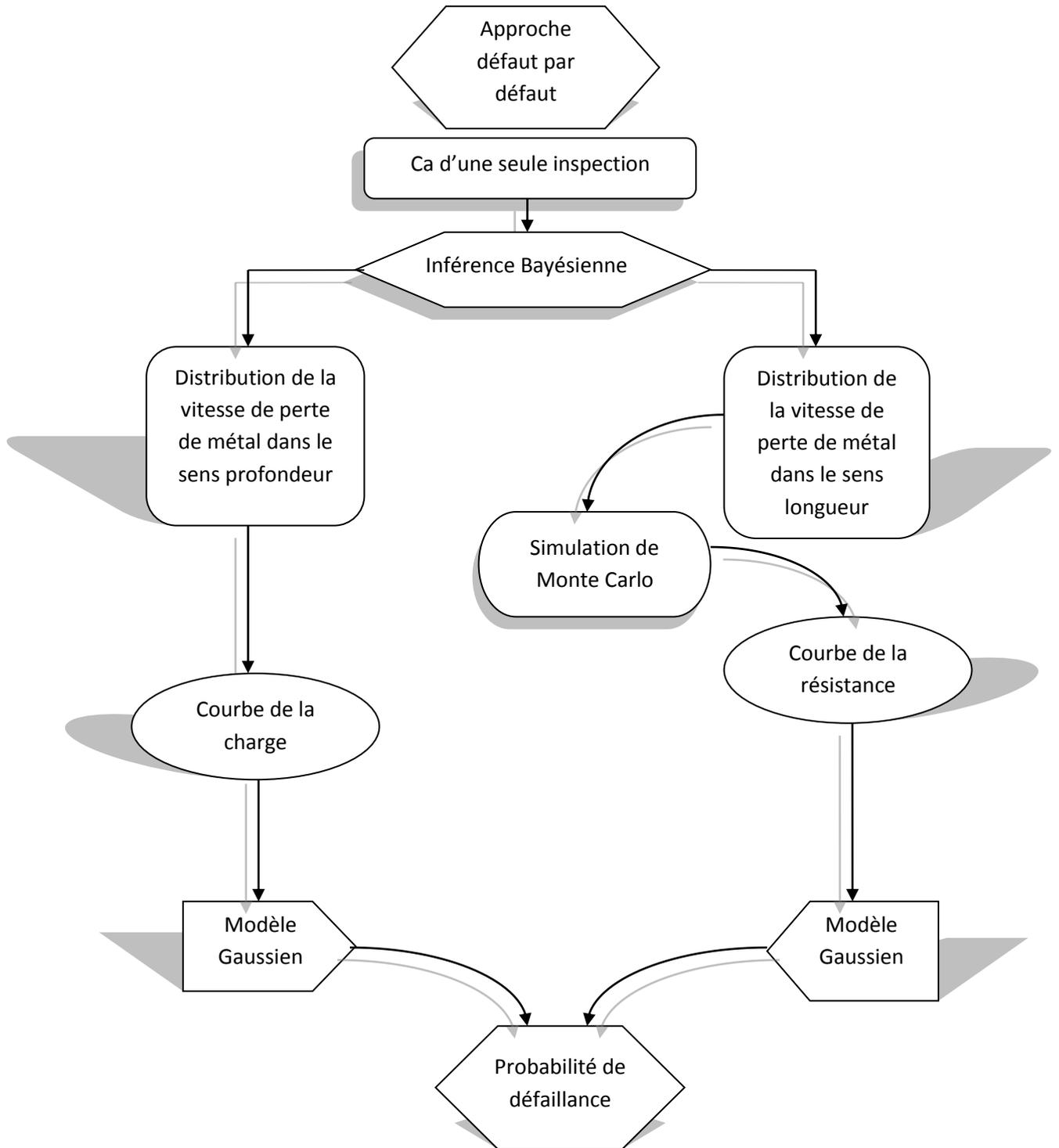


Fig V.1 : Démarche de l'approche point par point pour le cas d'une seule inspection.

L'inspection par l'outil intelligent type MFL faite sur le gazoduc GZ2 a révélé l'existence d'un grand nombre de défauts de corrosion répartis sur toute la ligne.

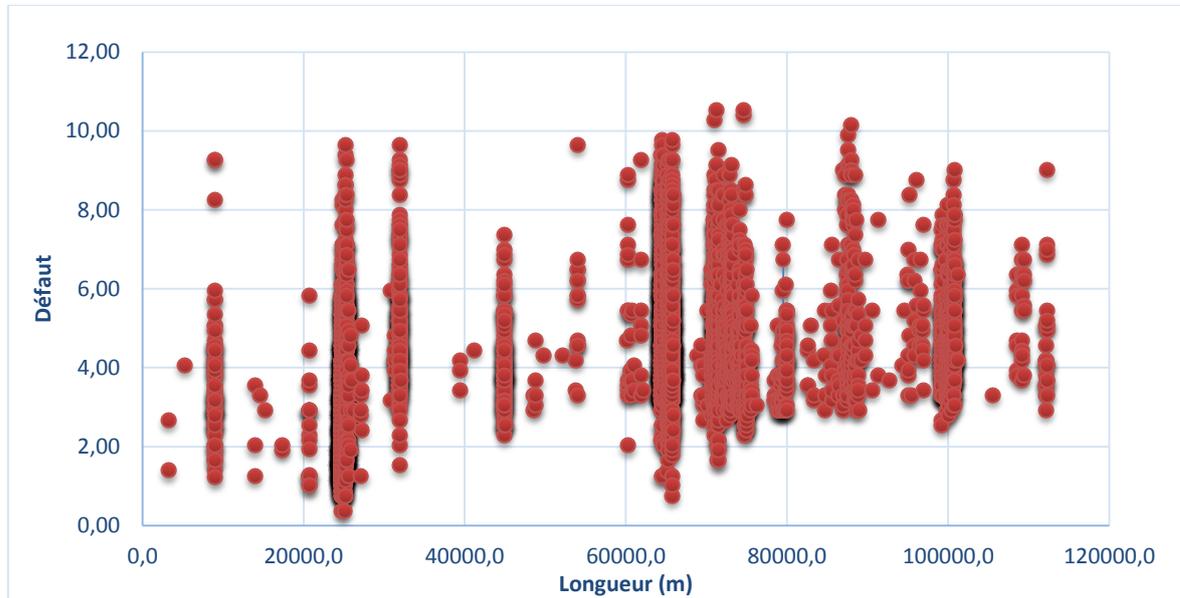


Fig V.2 : La répartition des défauts en fonction de la longueur.

## V.1. Evaluation de la probabilité de défaillance d'un défaut :

### V.1.1 Estimation de la vitesse de corrosion par l'inférence bayésienne :

L'utilisation des résultats fournis par l'inspection d'autres pipelines se trouvant dans d'autres conditions environnementales et opératoires pour l'estimation de la vitesse de corrosion peut conduire à des erreurs significatives, par contre ces informations peuvent constituer une excellente source d'information a priori, en plus, l'introduction d'information caractérisant principalement l'âge du pipeline (vraisemblance) renforce considérablement la qualité de l'estimation.

#### Loi a priori :

Les distributions de vitesse de corrosion peuvent être représentées par une loi normale

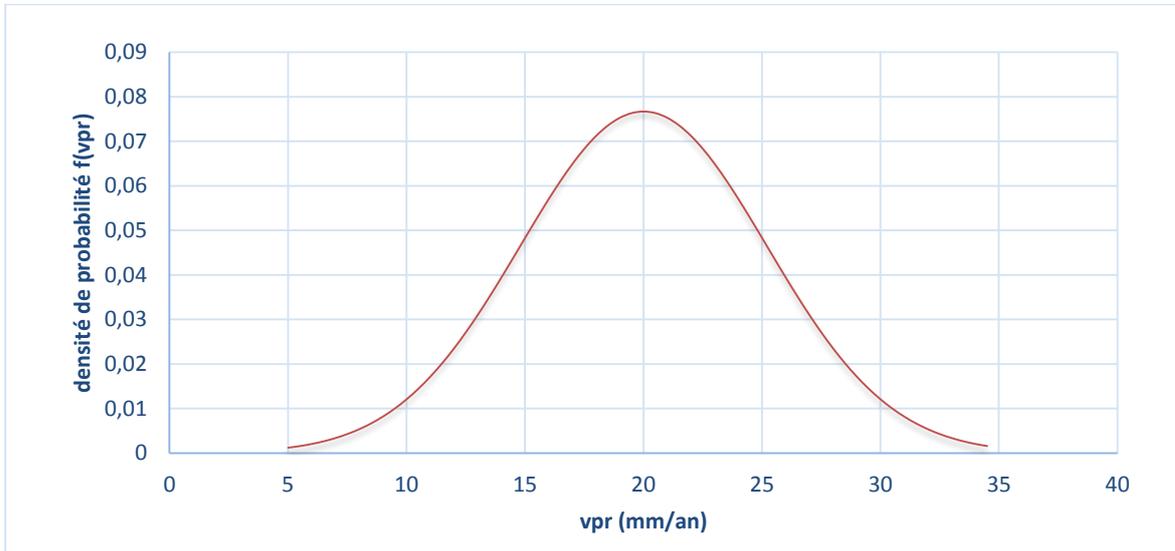
$N(\mu_{pr}, \sigma_{pr})$  [26]. Avec une moyenne et un écart type respectivement :

Pour la longueur du défaut :

$$\mu_{pr} = 20 \text{ mm/an}$$

$$\sigma_{pr} = 5.2 \text{ mm/an}$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_{pr}\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{x-\mu_{pr}}{\sigma_{pr}}\right)^2\right)}$$



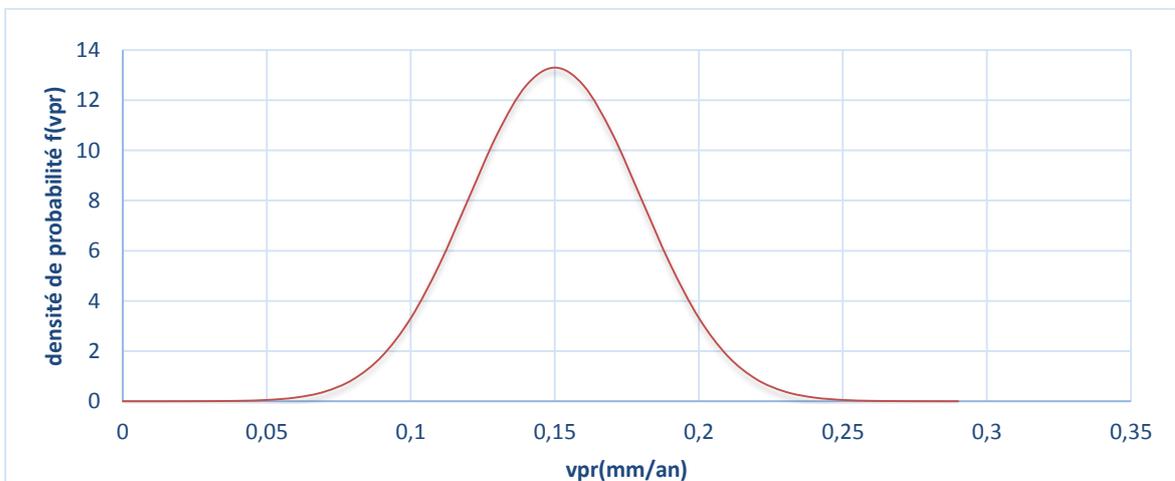
**Fig V.3** : Distribution de la loi a priori de la longueur de perte de métal.

Pour la profondeur de perte de métal :

$$\mu_{pr} = 0.15 \text{ mm/an}$$

$$\sigma_{pr} = 0.03 \text{ mm/an}$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_{pr}\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{x-\mu_{pr}}{\sigma_{pr}}\right)^2\right)}$$



**Fig V.4** : Distribution de la loi a priori de la profondeur de perte de métal.

**La vraisemblance :**

Elle suit une loi de distribution normale  $N(\mu_{vr}, \sigma_{vr})$ .

La mise en service du gazoduc GZ2 était en 1982 tandis que l'inspection a été faite en 2006, ce qui donne une durée d'exploitation de 24 ans.

La moyenne et l'écart type de la vraisemblance sont déterminés par les expressions suivantes :

Pour la longueur de perte de métal :

$$V_{min} = \frac{L}{T_{exp} - 1}$$
$$V_{max} = \frac{L}{1}$$
$$\mu_{vr} = \frac{V_{min} + V_{max}}{2}$$
$$\sigma_{vr} = \frac{\mu_{vr} - V_{min}}{1.96}$$

Application :

$$V_{min} = \frac{95}{24 - 1}$$
$$V_{min} = 4.130 \text{ mm/an}$$
$$V_{max} = \frac{95}{1}$$
$$V_{max} = 95 \text{ mm/an}$$
$$\mu_{vr} = \frac{4.130 + 95}{2}$$
$$\mu_{vr} = 49.565 \text{ mm/an}$$
$$\sigma_{vr} = \frac{49.565 - 4.130}{1.96}$$
$$\sigma_{vr} = 23.181 \text{ mm/an}$$

Pour la profondeur de perte de métal :

$$V_{min} = \frac{d}{T_{exp} - 1}$$
$$V_{max} = \frac{d}{1}$$

$$\mu_{vr} = \frac{V_{min} + V_{max}}{2}$$

$$\sigma_{vr} = \frac{\mu_{vr} - V_{min}}{1.96}$$

Application :

$$V_{min} = \frac{9.27}{24 - 1}$$

$$V_{min} = 0.403 \text{ mm/an}$$

$$V_{max} = \frac{9.27}{1}$$

$$V_{max} = 9.270 \text{ mm/an}$$

$$\mu_{vr} = \frac{9.270 + 0.403}{2}$$

$$\mu_{vr} = 4.837 \text{ mm/an}$$

$$\sigma_{vr} = \frac{4.837 - 0.403}{1.96}$$

$$\sigma_{vr} = 2.262 \text{ mm/an}$$

### Loi a posteriori :

En exprimant la connaissance a priori sous forme d'une loi de probabilité et la distribution des données conditionnelles aux paramètres vitesse (la vraisemblance), on combine la nouvelle observation avec celle a priori dans l'analyse envisagée (loi à posteriori) [14].

$$\mu_{pos} = \frac{\sigma_{vr}^2 \cdot \mu_{pr} + \sigma_{pr}^2}{\sigma_{vr}^2 + \sigma_{pr}^2}$$

$$\sigma_{pos} = \sqrt{\frac{\sigma_{vr}^2 \cdot \sigma_{pr}^2}{\sigma_{vr}^2 + \sigma_{pr}^2}}$$

Application à la longueur de perte de métal :

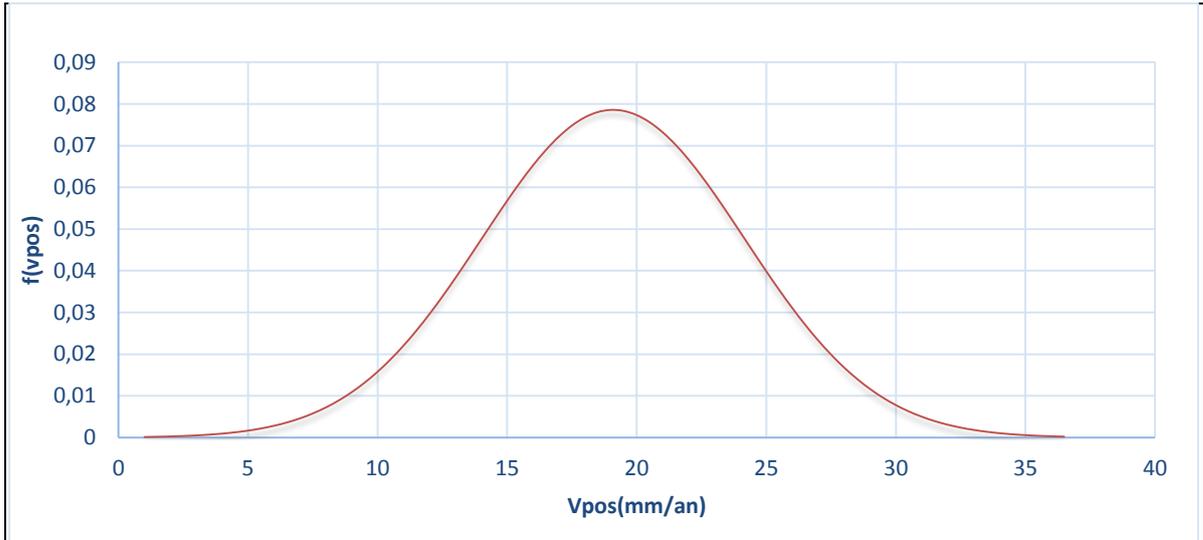
$$\mu_{pos} = \frac{23.181^2 \cdot 20 + 5.2^2}{23.181^2 + 5.2^2}$$

$$\mu_{pos} = 19.089 \text{ mm/an}$$

$$\sigma_{pos} = \sqrt{\frac{23.181^2 \cdot 5.2^2}{23.181^2 + 5.2^2}}$$

$$\sigma_{pos} = 5.074 \text{ mm/an}$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_{pos}\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{x-\mu_{pos}}{\sigma_{pos}}\right)^2\right)}$$



**Fig V.5** : Distribution a posteriori de la vitesse de perte de métal selon la longueur.

Application pour la profondeur de perte de métal :

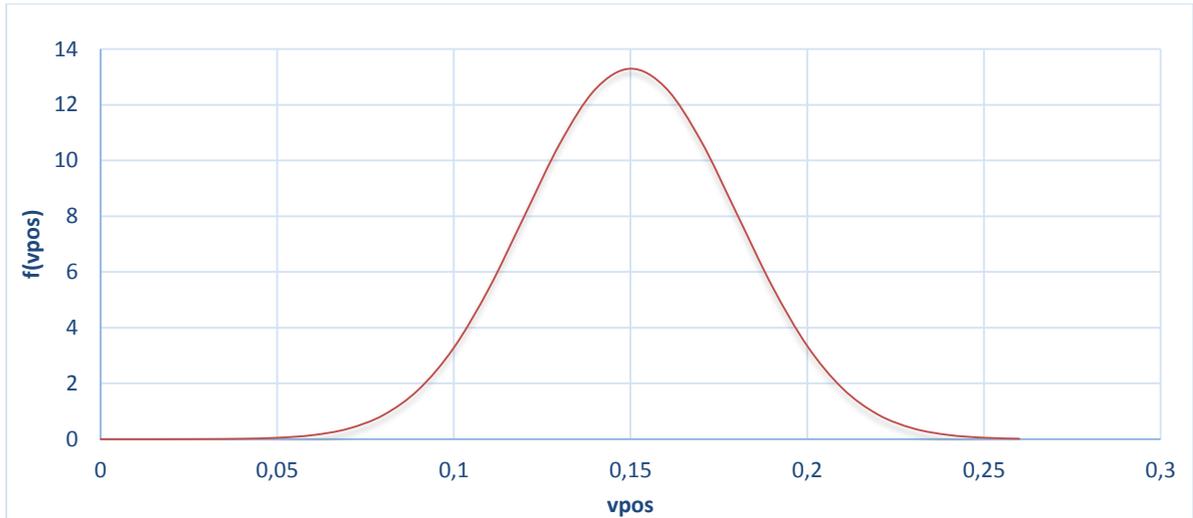
$$\mu_{pos} = \frac{2.262^2 \cdot 0.15 + 0.03^2}{2.262^2 + 0.03^2}$$

$$\mu_{pos} = 0.150 \text{ mm/an}$$

$$\sigma_{pos} = \sqrt{\frac{2.262^2 \cdot 0.03^2}{2.262^2 + 0.03^2}}$$

$$\sigma_{pos} = 0.029 \text{ mm/an}$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_{pos}\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{x-\mu_{pos}}{\sigma_{pos}}\right)^2\right)}$$



**Fig V.6 :** Distribution a posteriori de la vitesse de corrosion selon la profondeur.

Conclusion :

La distribution a priori vise à représenter un "état d'ignorance" sur le paramètre; la distribution a posteriori correspondante pourra alors être interprétée comme résultant de l'apport propre des données. Le cadre bayésien se présente donc comme une théorie formalisée de l'apprentissage par l'expérience.

### V.1.2 La courbe de charge :

#### Loi de distribution de la profondeur :

La perte de métal est distribuée selon une loi normale [27] de moyenne  $\mu$  et d'un écart type  $\sigma$ . En introduisant l'erreur de mesure de l'outil intelligent type *MFL* qui est de l'ordre de 10% de perte de métal [28], et qui est distribuée également selon une loi normale de moyenne  $\mu_\varepsilon$  et d'écart type  $\sigma_\varepsilon$ , on aura la moyenne et l'écart type de la perte de métal corrigée.

$$l = l' \pm \varepsilon$$

$$d = d' \pm \varepsilon$$

Comme les deux distributions sont des lois de distributions normales, leur somme nous donne également une loi de distribution normale, avec les paramètres suivants :

Pour la longueur de la perte de métal :

$$\mu_L = \mu_{L'} + \mu_\varepsilon$$

$$\sigma_l = \sqrt{\sigma_{l'}^2 + \sigma_\varepsilon^2}$$

Application :

$$\mu_l = 95 + 0$$

$$\mu_l = 95 \text{ mm}$$

$$\sigma_l = \sqrt{0^2 + 9.5^2}$$

$$\sigma_l = 9.5 \text{ mm}$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_l \sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-1}{2} \left(\frac{x-\mu_l}{\sigma_l}\right)^2\right)}$$

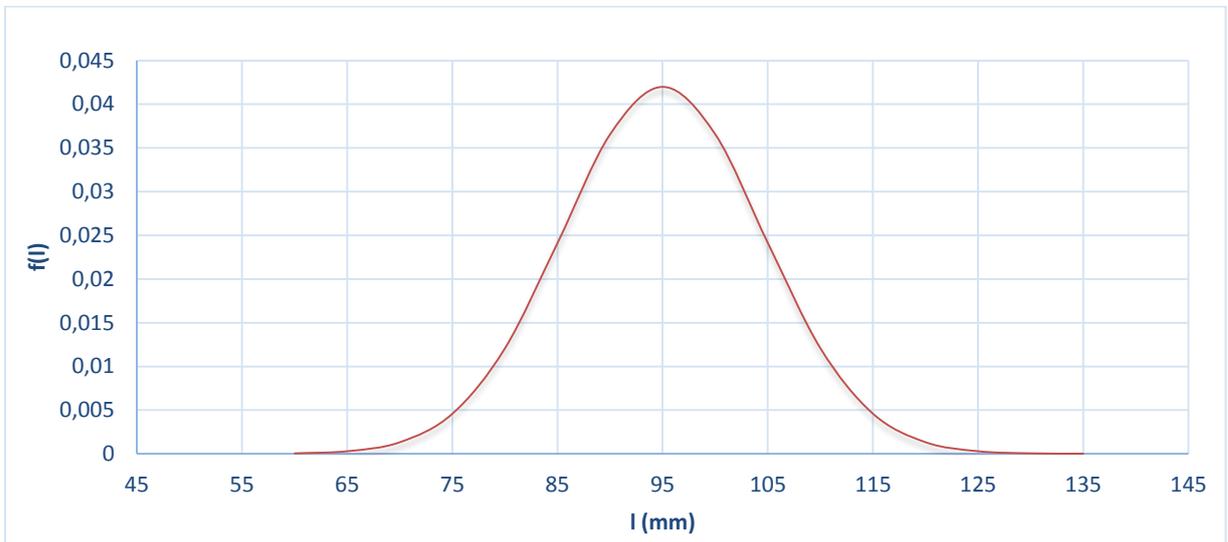


Fig V.7 : Distribution de la longueur de perte de métal en tenant compte de l'erreur de mesure.

Pour la profondeur de perte de métal :

$$\mu_d = \mu_{d'} + \mu_\varepsilon$$

$$\sigma_d = \sqrt{\sigma_{d'}^2 + \sigma_\varepsilon^2}$$

Application :

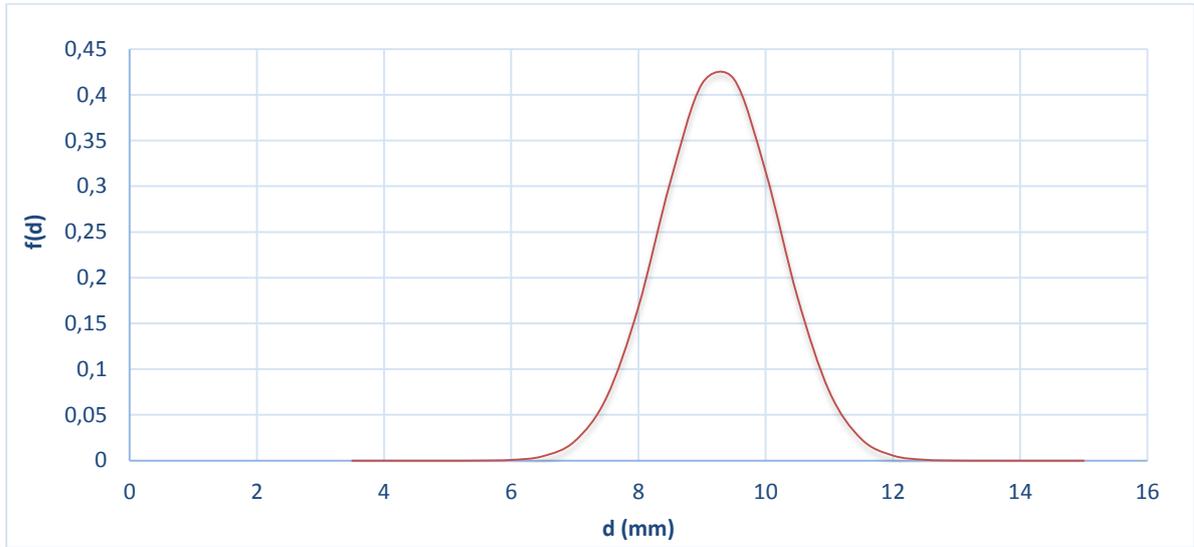
$$\mu_d = 9.271 + 0$$

$$\mu_d = 9.271 \text{ mm}$$

$$\sigma_d = 0 + 0.927$$

$$\sigma_d = 0.927 \text{ mm}$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_d \sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-1}{2} \left(\frac{x-\mu_d}{\sigma_d}\right)^2\right)}$$



**Fig V.8 :** Distribution de la profondeur de perte de métal en tenant compte de l'erreur de mesure

**Evolution de la courbe de charge en fonction du temps :**

Les paramètres de la courbe de charge sont calculés par les formules suivantes :

La moyenne :

$$\mu_{d(\tau)} = \mu_d + \mu_{pos} \cdot \tau$$

L'écart type :

$$\sigma_{d(\tau)} = \sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_{pos}^2 \cdot \tau^2}$$

Ainsi, la formule de la courbe de charge est :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_{d(\tau)} \sqrt{2\pi}} e^{\left( \frac{-1}{2} \left( \frac{x - \mu_{d(\tau)}}{\sigma_{d(\tau)}} \right)^2 \right)}$$

Une application sur le défaut se situant au *PK8.986* et à la cinquième année donne les résultats suivants :

$$\mu_{d(5)} = 9.271 + 0.150.5$$

$$\mu_{d(5)} = 10.022 \text{ mm}$$

$$\sigma_{d(5)} = \sqrt{0.927^2 + 0.0.29^2 \cdot 5^2}$$

$$\sigma_{d(5)} = 0.939 \text{ mm}$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_{d(5)}\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{x-\mu_{d(5)}}{\sigma_{d(5)}}\right)^2\right)}$$

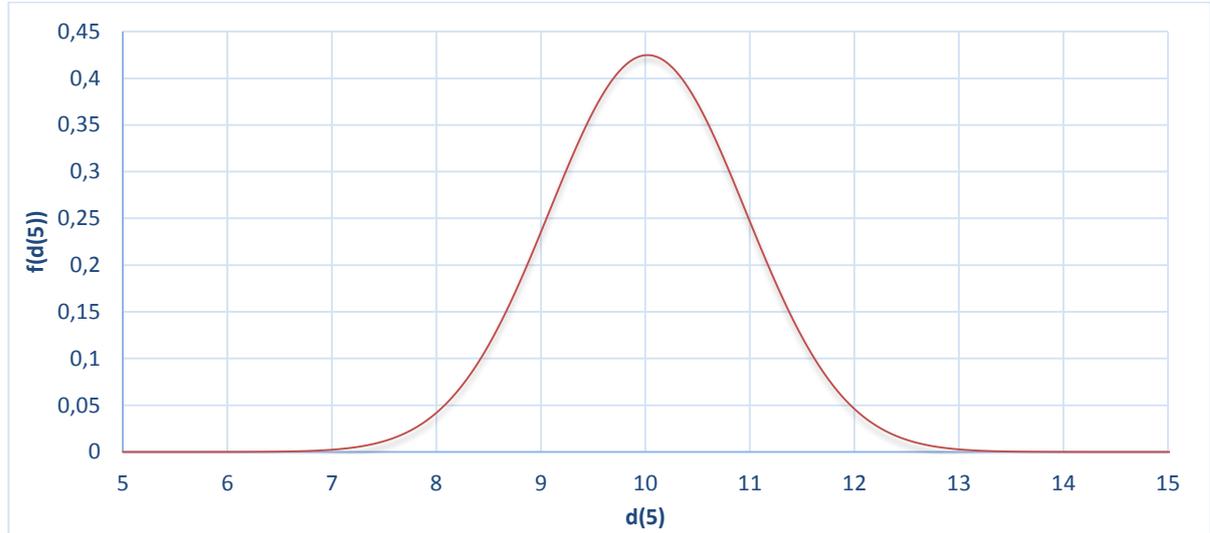


Fig V.9 : Distribution de la profondeur de perte de métal pour  $\tau=5$  an

### V.1.3 La courbe de résistance :

La courbe de résistance étant une distribution de la perte de métal critique  $d_{cr}$ . Pour construire cette dernière, la contrainte d'élasticité et l'épaisseur sont prises comme étant des variables aléatoires.

A l'aide de simulation de Monte Carlo, on générera un échantillon d'au moins cinquante valeurs pour chaque variable.

#### V.1.3.1 Simulation de Monte Carlo :

Le terme méthode de Monte Carlo désigne toute méthode visant à calculer une valeur numérique en utilisant des procédés aléatoires, c'est à dire des techniques probabilistes.

Le nom de ces méthodes fait allusion aux jeux de hasard pratiqués par *Monte Carlo*, et a été inventé en 1947 par *N. Metropolis*, dans un article publié pour la première fois en 1949 (*Metropolis-Ulam, the Monte Carlo method. Journal of the American Statistical Association*) [29].

La méthode de Monte Carlo est une méthode d'approximation, au sens statistique du terme. Il n'y a pas de définition précise de ce qu'est une technique de type Monte Carlo, mais la description la plus habituelle consiste à dire que les méthodes de ce type se caractérisent par l'utilisation du hasard pour résoudre des problèmes centrés sur le calcul d'une valeur numérique. La réponse fournie sera une réponse statistique. La précision est mesurée par la taille de l'intervalle de confiance. Si on utilise  $n$  points échantillonnés de manière indépendante, la méthode converge en  $o$  (quel que soit la dimension du problème), d'où son intérêt en grande dimension (parfois pour des fonctions à plusieurs dizaines de variable), la méthode de Monte Carlo est le seul outil capable de donner une réponse en un temps raisonnable.

Pour utiliser une méthode de Monte Carlo, on doit tout d'abord mettre sous la forme d'une espérance la quantité que l'on cherche à calculer. C'est souvent simple (calcul d'intégrale par exemple) mais peut-être plus compliqué (équations aux dérivées partielles par exemple).

À l'issue de cette étape, il reste à calculer une quantité de la forme  $E(X)$ , c'est-à-dire l'espérance de la variable aléatoire  $X$ . Pour calculer  $E(X)$ , il convient de savoir simuler une variable aléatoire selon la loi de  $X$ . On dispose alors d'une suite  $(X_i)_{1 \leq i \leq N}$  de  $N$  réalisations de la variable aléatoire  $X$ . On approxime alors  $E(X)$  par

$$E(X) = \frac{1}{N} (X_1 + \dots + X_N)$$

Les méthodes dites de Monte Carlo consistent en des simulations expérimentales de problèmes mathématiques, dans lesquelles des nombres aléatoires sont utilisés pour trouver une solution qui dans certains cas n'est pas aléatoire.

La première étape lors de l'application de telles méthodes est la construction de nombres aléatoires, vérifiant une loi de distribution donnée (pour représenter la donnée initiale d'un problème par exemple).

De manière générale, la simulation permet d'étudier et expérimenter un système donné dont on connaît les interactions complexes, de mesurer les effets de certains changements dans les interactions sur le comportement du système, d'expérimenter de nouvelles situations.

Lorsque dans la simulation intervient un élément aléatoire, on parle de simulation aléatoire.

Les méthodes de simulation reposent toutes sur la capacité à produire une suite de variables aléatoires indépendantes suivant une distribution  $f$  donnée. La production d'une telle suite dépend elle-même de la capacité que l'on a à produire une séquence de variables aléatoires uniformes et indépendantes.

Pour appliquer une méthode de Monte Carlo, il faut savoir simuler suivant une loi donnée.

**V.1.3.2 Distribution de la contrainte d'élasticité :**

La contrainte d'élasticité est définie par une loi de distribution normale, dont la moyenne est  $\mu_e=414 \text{ MPa}$  et le coefficient de variation  $cov=0.03$  [30], ce qui donne un écart type  $\sigma_e = 12.42 \text{ MPa}$ .

Une méthode Monte Carlo repose sur la simulation d'une suite de variables aléatoires  $(X_n)_{n \geq 1}$  indépendantes et identiquement distribuées selon une loi donnée qui est dans notre cas la loi normale.

En se servant du logiciel *EASY FIT*, on génère un certain nombre de contrainte d'élasticité pour chaque point.

Le tableau suivant représente un échantillon de contrainte d'élasticité générée.

408.085249	391.857249	414.600471	429.513255	420.751915
428.30605	396.360832	433.107498	426.808726	417.71275
428.388835	420.447699	399.420831	416.192892	407.062423
409.466579	437.127304	426.740436	397.794712	401.145129
407.896771	426.741192	430.42978	408.411976	427.352249
397.780338	431.747912	413.672779	400.605431	398.1911
430.631132	412.69362	414.472224	426.019827	411.471405
406.872511	397.522308	389.329158	420.923313	410.813328
412.740136	405.247418	411.144878	392.625111	399.331253
403.749086	411.766092	421.827615	417.243812	373.896198

**Tab V.2 :** Echantillon de contrainte d'élasticité

**V.1.3.3 Distribution de l'épaisseur :**

Dans le cas de notre étude, nous avons pris l'épaisseur comme étant variable aléatoire, définie par une loi de distribution normale de moyenne  $\mu_t = 12.7\text{mm}$  et un écart type  $\sigma_t = 0.127\text{ mm}$  [31].

A l'aide du logiciel cité antérieurement, on génère un spécimen d'épaisseur par la simulation de Monte Carlo.

Le tableau suivant représente un extrait des valeurs d'épaisseur générées.

12.8249746	12.8110497	12.78036	12.8864799	12.5972257
12.8141367	12.8238801	12.5079734	12.4949977	12.8143753
12.8726349	12.6003396	12.6003396	12.8811529	12.6813475
12.9610888	12.5924177	12.7611203	12.7898001	12.8425684
12.8708226	12.5300685	12.6820036	12.7199351	12.7199351
12.904157	12.7961647	12.7272099	12.7272099	12.7029959
12.7207493	12.6775663	12.6775663	12.6586018	12.6279233
12.6420356	12.6420356	12.7542964	12.8127775	12.8327637
12.6834956	12.8635303	12.4578526	12.7775554	12.7775554
12.8854342	12.6372226	12.9139635	12.9139635	12.665516
12.6824782	12.7881132	12.7881132	12.6420607	12.7203669

**Tab V.3 :** Echantillon de l'épaisseur

**V.1.3.4 Distribution de la perte de métal critique :**

Le degré de nuisance de certains défauts peut être évalué sur la base de méthodes analytiques relativement simple. Certaines compagnies pétrolières ou gazières ont leurs propres codes mais dans une grande proportion, tous les opérateurs utilise la fameuse norme *ANSI/ASME B31 G* qui sera utilisée également dans notre étude.

**La norme ANSI/ASME B31 G [32] :**

Le code ASME B31 G est un code destiné à évaluer la résistance à la rupture résiduelle d'un tuyau corrodé. Il constitue un additif au code *ASME B31* utilisé pour tubes sous pression. 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.

Cette norme se base sur un ensemble d'équations simplifiées permettant l'estimation de l'effet de corrosion sur la capacité de résistance de la conduite.

Selon le code *ASME B31 G*, l'équation de la rupture de tubes corrodés est établie à partir des données expérimentales et exprimée à partir des deux conditions suivantes :

- La contrainte circonférentielle globale maximale ne peut pas excéder la limite d'élasticité du matériau.
- Si la longueur du point de corrosion n'est pas grande, alors le défaut sera représenté par une forme parabolique. Par contre, si la longueur du point de corrosion est importante, le défaut sera représenté par une forme rectangulaire.

La détermination de la valeur de perte de métal critique se fait suivant la démarche suivante :

- Calcul de la pression maximale de service *PMS*

$$PMS = \frac{2k_s \sigma_e t}{D_{ex}}$$

- Calcul de la pression d'opération  $P_{op}$

$$P_{op(x)} = \sqrt{P_{ref}^2 - \frac{x}{L} \cdot (P_{ref}^2 - P_{asp}^2)}$$

- Détermination de la valeur du *facteur de Folias M* qui dépend du facteur *G*, lui-même dépend de la géométrie du défaut.

$$G = 0.893 \cdot \frac{L}{\sqrt{D \cdot t}}$$

$$M = \sqrt{1 + G^2}$$

- Si  $G \leq 4$

$$\left(\frac{d}{t}\right)_{cr} = \frac{1.1PMS - P_{op}}{2/3 \left(1.1PMS - \frac{P_{op}}{M}\right)}$$

- Si  $G > 4$

$$\left(\frac{d}{t}\right)_{cr} = \frac{1.1PMS - P_{op}}{1.1PMS}$$

0,84500026	0,84545937	0,84647387	0,84298132	0,85260455
0,57145401	0,57123688	0,5784056	0,57870585	0,57144869
1,27896343	1,29270886	1,29270886	1,27854048	1,28857336
0,56820522	0,57646295	0,57263984	0,57199744	0,5708211
0,53018763	0,53734848	0,53411996	0,53332298	0,53332298
0,52950239	0,53173204	0,53317054	0,53317054	0,53367845
1,21725129	1,21932266	1,21932266	1,22023569	1,22171701
0,32236429	0,32236429	0,32094246	0,32020919	0,31995974
1,12927418	1,12134382	1,13945528	1,12511003	1,12511003
0,44219792	0,44651947	0,4417092	0,4417092	0,44602046

**Tab V.4 :** Echantillon de *G*

Le tableau suivant représente un échantillon de la *PMS* calculée pour le défaut cité préalablement.

108,038824	100,056768	106,639706	104,979805	105,36866
108,553013	104,287082	99,0716161	105,532368	101,616143
104,471116	108,356094	107,198544	100,151867	101,412081
103,345807	105,257802	107,454961	102,263264	107,005765
101,043699	108,75428	103,63977	100,365934	99,5712583
107,833675	102,991156	103,435021	106,157782	102,284043
101,253873	98,9269914	97,7484148	106,16529	103,776975
103,050939	102,616387	100,826423	98,7556907	100,442464
102,411069	102,432673	107,233591	106,068334	93,2202413
104,64742	104,725526	93,3530087	103,635712	105,953958

**Tab V.5 :** Echantillon de la *PMS*

Suite à la formule de la pression d'opération citée ultérieurement, on parvient à tracer l'enveloppe de cette pression le long de la conduite.

$$P_{op(8986.2)} = \sqrt{71^2 - \frac{8986.2}{112000} \cdot (71^2 - 48^2)}$$

$$P_{op(8986.2)} = 69.436 \text{ bars}$$

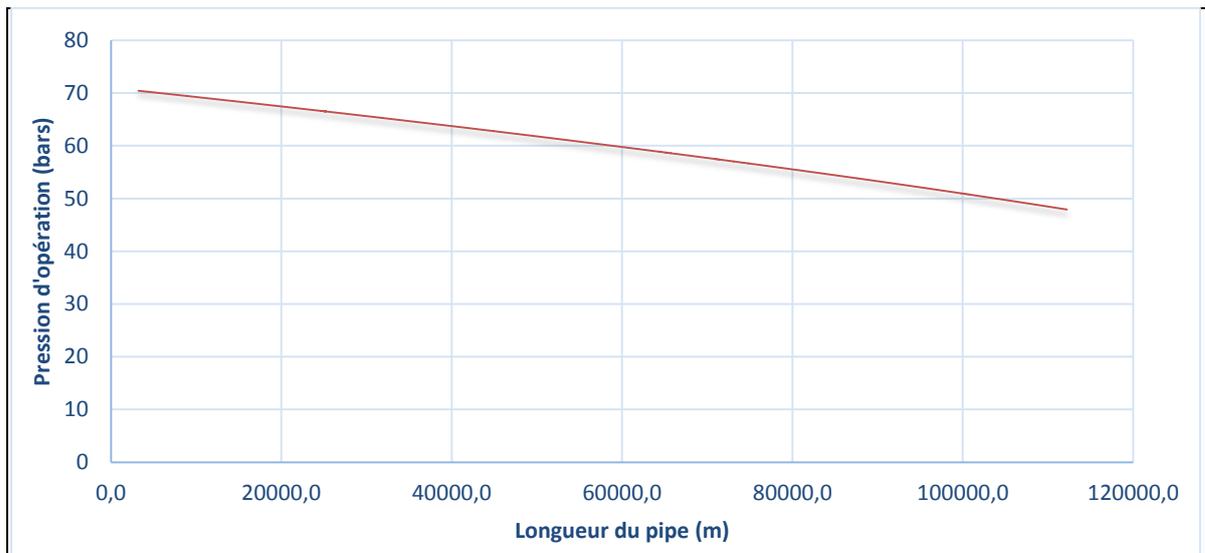
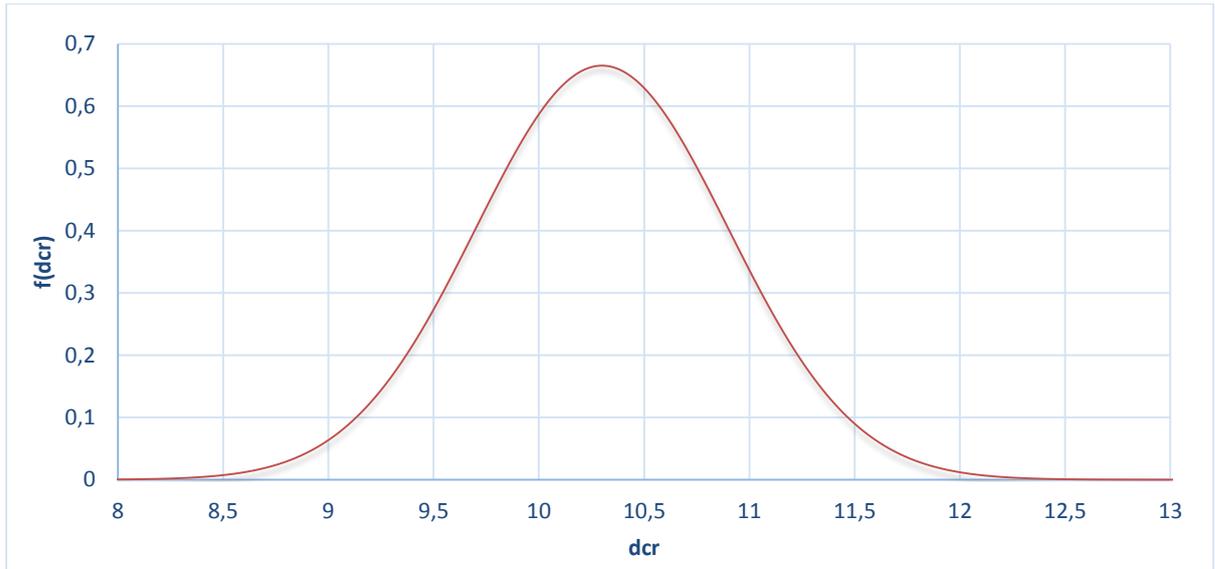


Fig V.10 : L'enveloppe de la pression d'opération

**La courbe de résistance :**

$$R=f(x) = \frac{1}{\sigma_{d(cr)}\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{x-\mu_{d(cr)}}{\sigma_{d(cr)}}\right)^2\right)}$$

$$f(x) = \frac{1}{10.158\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{x-10.158}{0.109}\right)^2\right)}$$



**Fig V.11** : Distribution de la courbe de charge

## V.2 Analyse fiabilité structurale :

Cette approche implique l'utilisation d'estimations probabilistes sur la base de techniques de mécanique de rupture pour calculer la probabilité de défaillance de la section du pipeline en présence d'un défaut de corrosion en fonction du temps.

### V.2.1 Probabilité de défaillance par intégration directe :

L'utilisation de méthode d'intégration directe permet d'évaluer la probabilité de défaillance pour chaque point en passant par la fonction d'état limite qui représente la frontière entre la défaillance et la fiabilité.

Ainsi, la fonction d'état limite qui est la différence entre la charge et la résistance sera définie par une loi normale de moyenne  $\mu_M$  et d'écart type  $\sigma_M$ .

$$M=R-C$$

$$\mu_M = \mu_{d(cr)} - \mu_d$$

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_{d(cr)}^2 + \sigma_d^2}$$

$$M=f(x) = \frac{1}{\sigma_M\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{x-\mu_M}{\sigma_M}\right)^2\right)}$$

La probabilité de défaillance du défaut est représentée par l'aire hachurée dans la figure ci-dessous.

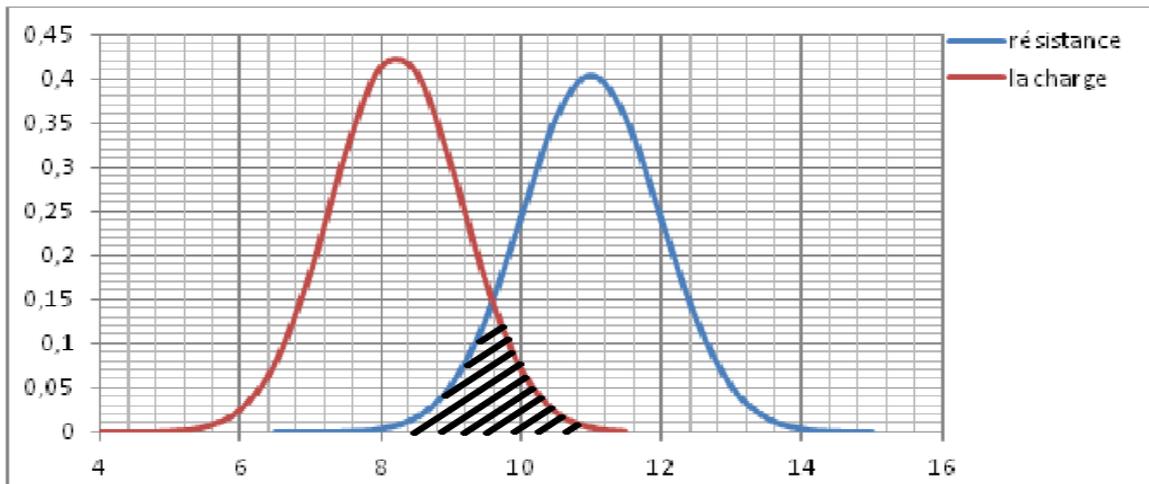


Fig V.12 : Représentation de contrainte  $\sigma$  résistance

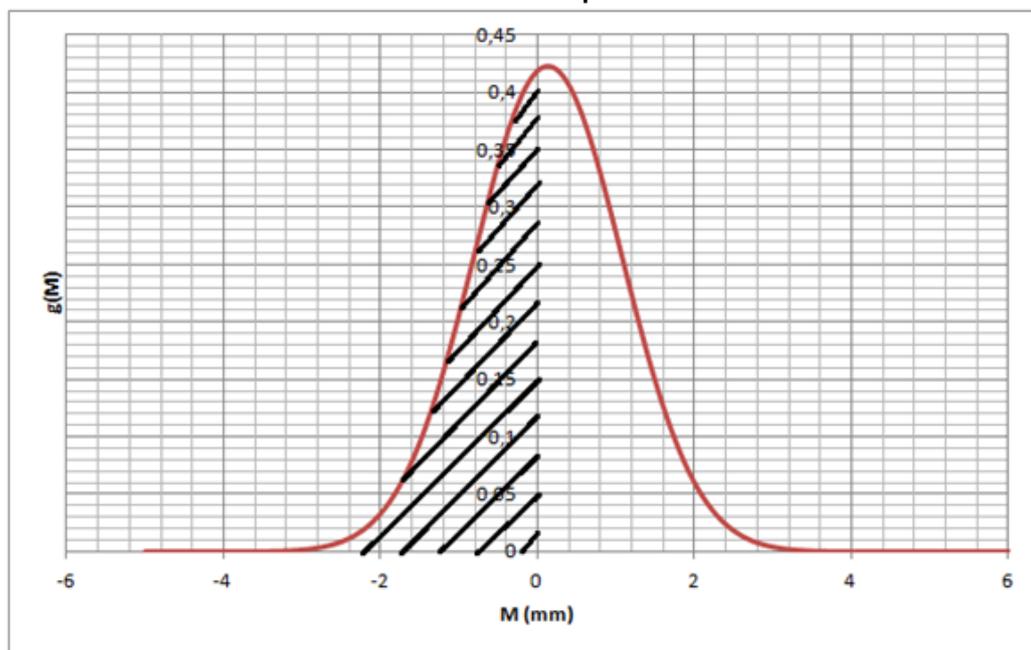


Fig V.13 : Représentation graphique de la probabilité de défaillance

Application :

$$\mu_M = 10.158 - 10.022$$

$$\mu_M = 0.130 \text{ mm}$$

$$\sigma_M = \sqrt{0.939^2 + 0.109^2}$$

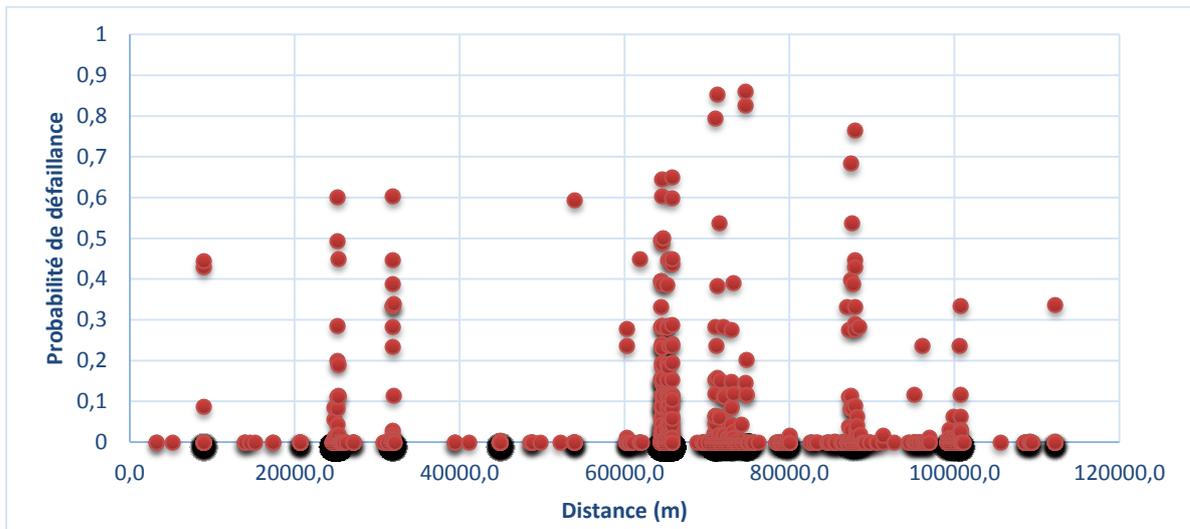
$$\sigma_M = 0.945 \text{ mm}$$

$$M=f(x) = \frac{1}{0.945\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{x-0.130}{0.945}\right)^2\right)}$$

Calcul de la probabilité de défaillance d'un défaut par intégration directe :

$$P_{d\acute{e}f} = \int_{-\infty}^0 M(x)dx$$

$$P_{d\acute{e}f} = 44.52\%$$



**Fig V.14** : Probabilité de défaillance des défauts de corrosion en régime stationnaire pour la 5<sup>ème</sup> année

### V.2.2 Calcul de la probabilité de défaillance d'un défaut par la méthode *FORM* :

La méthode *FORM* est une méthode permettant d'obtenir une valeur approchée de la probabilité de défaillance à partir du point de conception. Elle suppose que les distributions de *C* et *R* sont normales.

La première étape consiste à passer dans l'espace des lois centrées réduites : on transforme les coordonnées pour avoir des probabilités de densité d'espérance *nulle* et de variance *1*. Cette étape est appelée transformation de *Nataf* et *Rosenblatt* [33]. Les nouvelles coordonnées sont appelées *C\** et *R\** :

$$R^* = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R}$$

$$C^* = \frac{C - \mu_C}{\sigma_C}$$

Le sommet de la surface  $f_{C^*} \times f_{R^*}$  se trouve donc au coordonnées  $(0 ; 0)$ . La droite d'état limite  $M=0$  ( $R-C=0$ ) devient donc :

$$R - C = 0 \quad \iff \quad \sigma_R x R^* + \mu_R - (\sigma_C x C^* + \mu_C) = 0$$

Ce que l'on peut noter :

$$M^* = 0$$

Avec :

$$M^*(R^*, C^*) = \sigma_R x R^* + \mu_R - (\sigma_C x C^* + \mu_C).$$

Le point de conception est le point de densité de probabilité maximale sur la droite  $M=0$ . Du fait des propriétés de symétrie de surface  $f_{C^*} \times f_{R^*}$ , c'est aussi le plus proche de l'origine  $(0 ; 0)$  –sommet de la surface – c'est-à-dire celui pour lequel la quantité  $d^{*2} = R^{*2} + C^{*2}$  est minimale.

Pour trouver ce point, on part d'un couple  $(R^*; C^*)$  arbitraire, et l'on applique un algorithme d'optimisation (itératif) pour avoir le minimum de  $d^*$  avec comme contrainte  $M^*=0$ .

La distance  $d^*$  atteinte est alors l'indice de fiabilité  $\beta$ , et la probabilité de défaillance  $P_f$  s'obtient avec la fonction de répartition  $\Phi$  de la loi normale centrée réduite :  $P_f = \Phi(-\beta)$ .

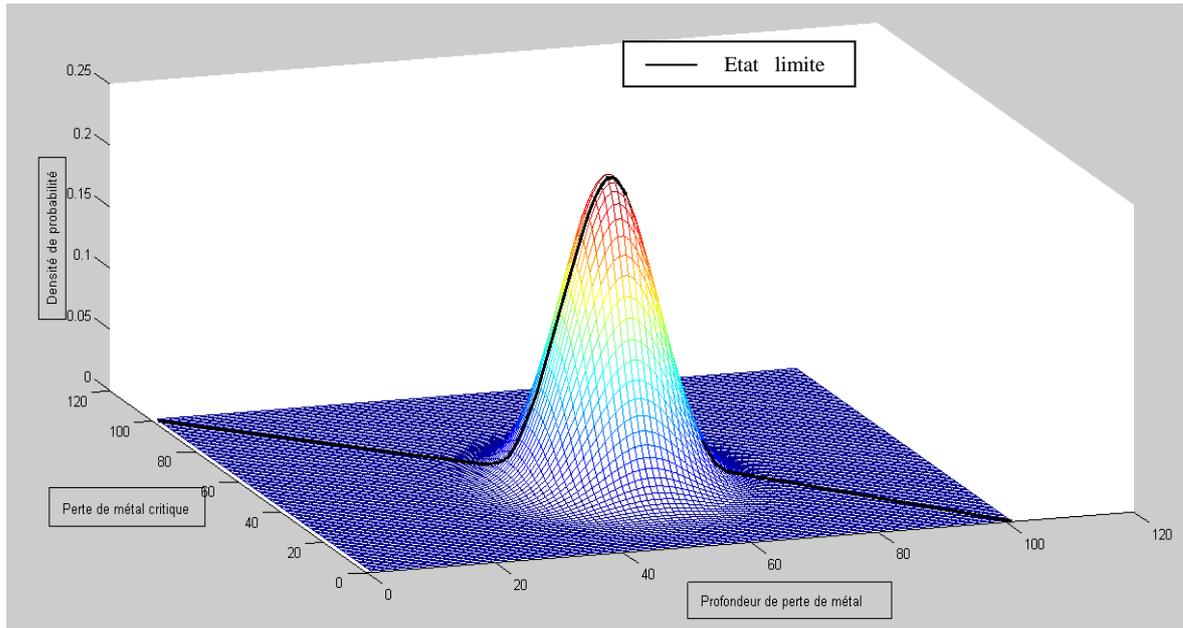
En se servant du *solveur d'Excel*, on a obtenu la valeur de  $\beta$  suivante, ainsi que la probabilité de défaillance.

$$\beta = 0.137$$

$$P_{déf} = \Phi(-\beta)$$

$$P_{déf} = \Phi(-0.137)$$

$$P_{déf} = 44.52\%$$



**Fig V.15** : Représentation en 3D de la probabilité de rupture et de l'état limite.

### V.2.3 Probabilité de défaillance par kilomètre :

Le système formé des événements  $E_i$  est un système série si l'occurrence d'un seul événement entraîne la défaillance du système. La probabilité de défaillance du système  $P_{f_{sys}}$  est alors la probabilité de l'union des événements de défaillance.

Ainsi, la probabilité de défaillance de chaque kilomètre sera calculée par la formule suivante :

$$P_{déf/km} = 1 - \prod_{i=1}^{i=n} (1 - P_{déf})$$

La probabilité de défaillance du neuvième kilomètre dont le défaut pris comme exemple de calcul fait partie est:

$$P_{déf/km} = 71.13\%$$

Le tableau suivant résume les caractéristiques des défauts situés sur ce kilomètre.

Position du défaut (m)	Longueur du défaut (mm)	Profondeur du défaut (mm)
8979,1	25,0	2,03
8980,4	23,0	2,54
8981,0	23,0	5,08
8981,1	80,0	4,57
8981,1	14,0	5,08
8983,0	19,0	4,44
8983,0	28,0	2,92
8983,4	70,0	3,94
8983,7	23,0	2,54
8984,2	33,0	2,03
8984,4	23,0	3,05
8984,6	23,0	2,79
8985,0	86,0	2,92
8985,2	95,0	2,92
8986,2	33,0	9,27
...	...	...
8987,1	50,0	4,19
8987,2	93,0	3,56
8987,2	28,0	1,78
8987,7	23,0	1,65
8988,1	28,0	2,92
8988,6	77,0	5,71
8988,6	70,0	5,71
8988,6	60,0	4,19
8988,9	93,0	4,95
8989,4	75,0	3,81
8989,8	95,0	4,57
8989,9	28,0	1,40
8989,9	86,0	3,30
8990,3	23,0	2,92
8990,3	95,0	3,94
8990,3	60,0	4,19
8991,1	23,0	2,54
8991,5	23,0	2,54
8992,4	21,0	3,30
8992,9	17,0	4,57
8993,8	25,0	5,97
8994,0	17,0	4,44
8994,3	96,0	3,30
8995,0	17,0	2,29
8996,0	86,0	3,43

Tab V.6: Caractéristiques des défauts du neuvième kilomètre.

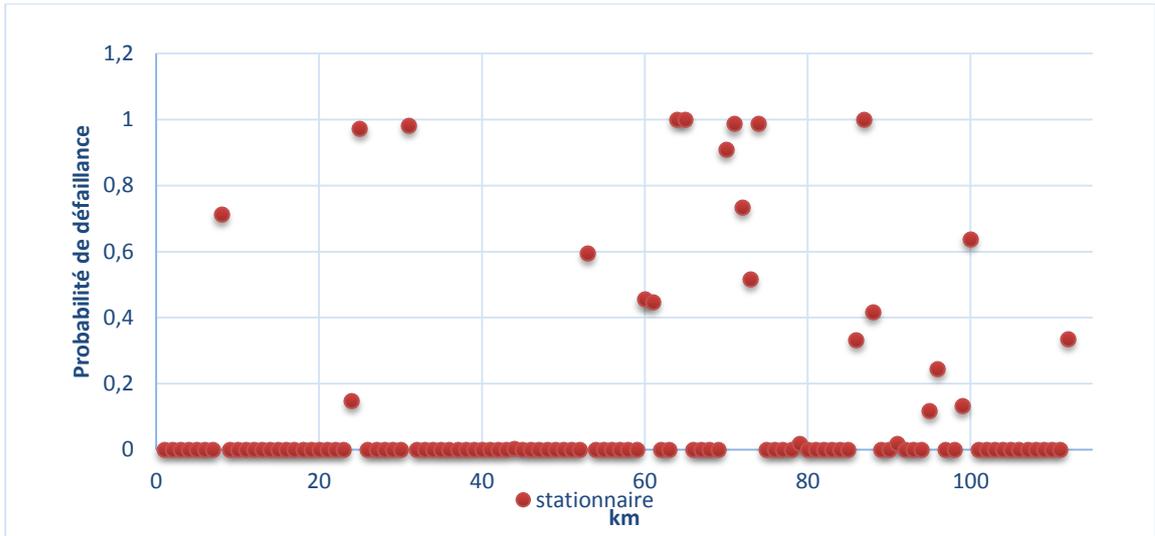


Fig V.16 : Probabilité de défaillance des kilomètres en régime stationnaire pour la 5<sup>ème</sup> année.

#### V.2.4 L'évolution des paramètres en fonction du temps :

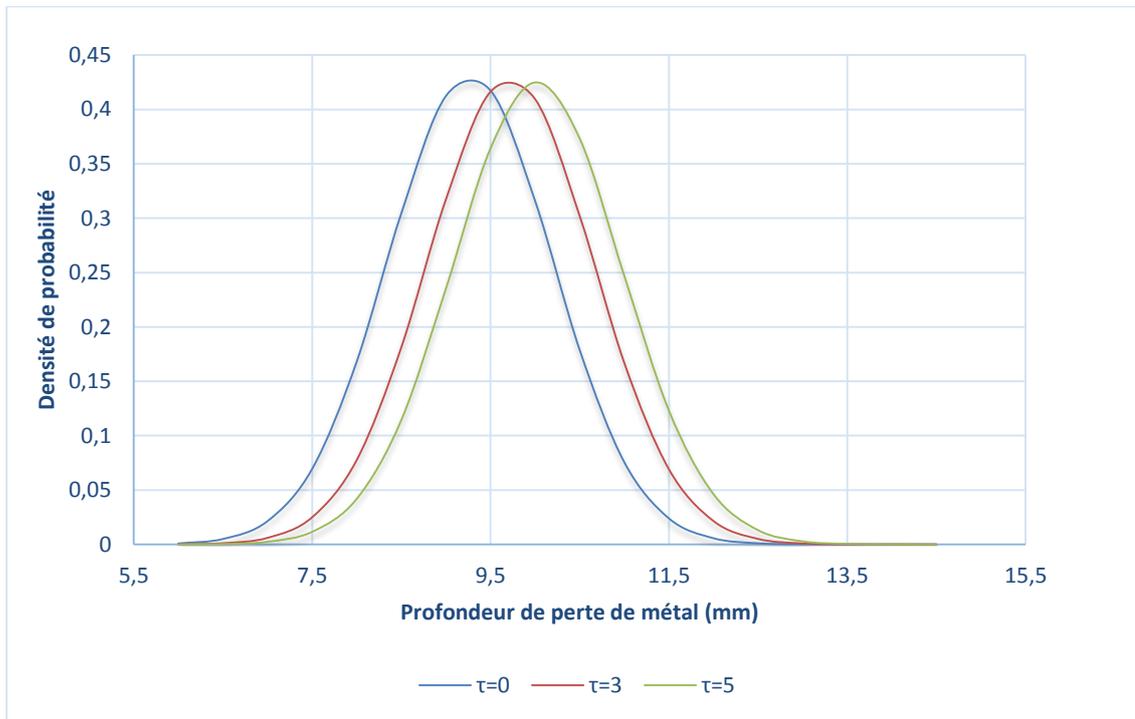
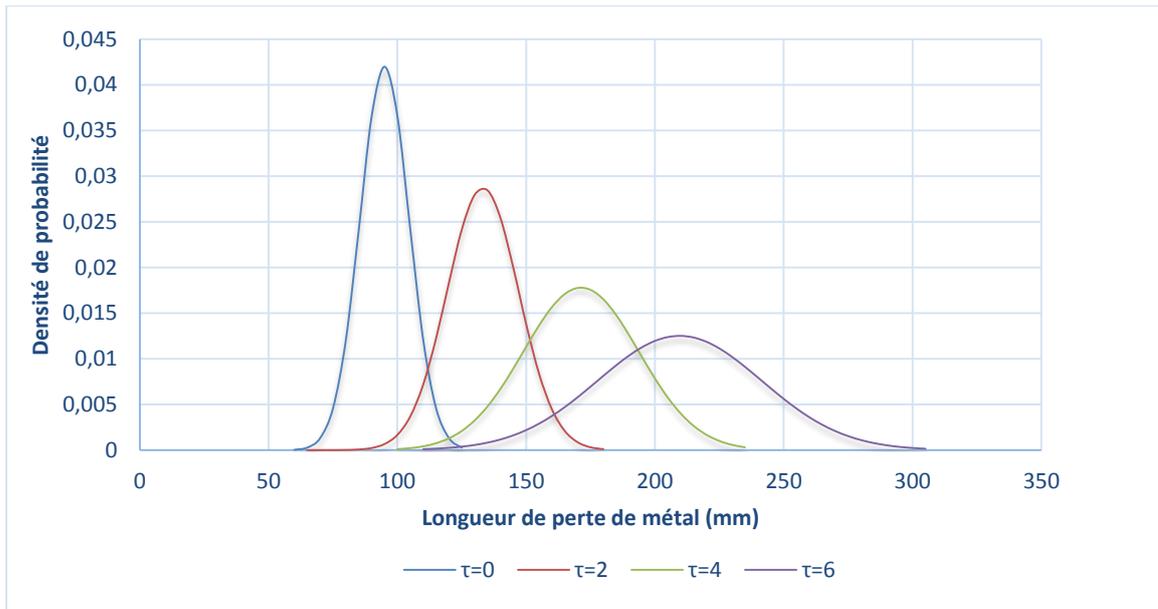
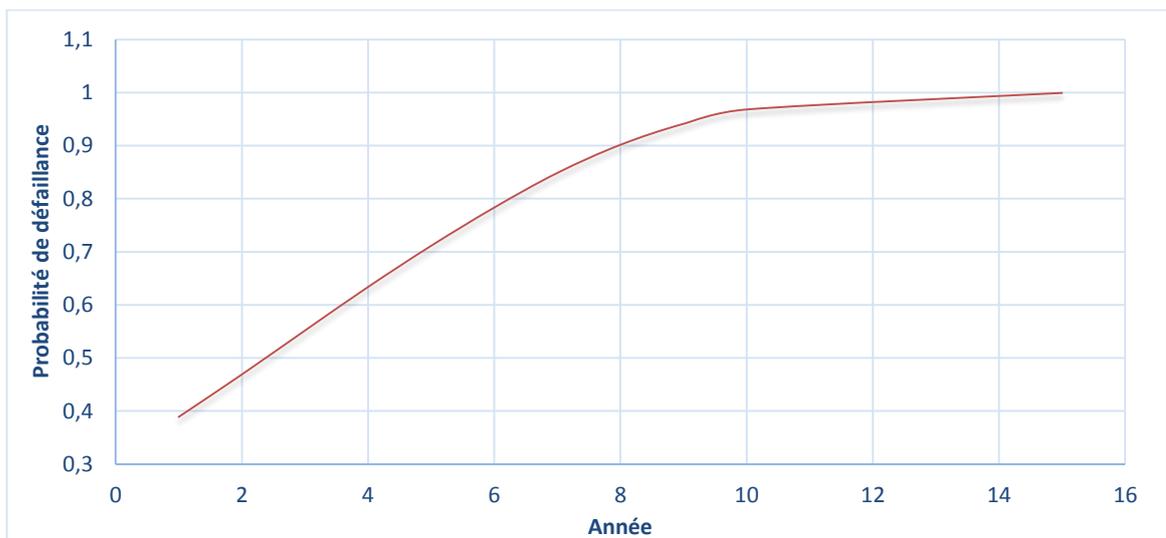


Fig V.17 : Evolution de la profondeur de perte de métal en fonction des années.



**Fig V.18** : Evolution de la longueur de perte de métal en fonction des années.

Les graphes ci-dessus représentent l'évolution de la distribution de la profondeur de perte de métal ainsi que sa longueur respectivement durant les différentes années. On constate une augmentation considérable de la moyenne en fonction des années. Cette augmentation est due au phénomène de corrosion qui se manifeste avec la même vitesse en tous les points du métal entraînant une diminution régulière de l'épaisseur de celui-ci.



**Fig V.19** : L'évolution de la probabilité de défaillance du neuvième kilomètre en fonction du temps

### V.3 Estimation de l'évolution de l'état de dégradation en régime transitoire :

#### V.3.1 Simulation de la pression :

L'analyse de l'état de dégradation est basée sur le recours à un certain nombre de standards en vue d'estimer la résistance résiduelle de la canalisation en fonction des dimensions géométriques des défauts les plus critiques et d'établir une hiérarchie des défauts à réparer. La démarche décrite au paragraphe précédent se base sur des hypothèses d'écoulement stationnaire du fluide dans la canalisation. L'analyse de certains incidents sur les gazoducs corrodés à travers le monde, montre que ceux-ci peuvent avoir comme catalyseur des surpressions brusques engendrées par des phénomènes transitoires.

D'un point de vue mathématique, les régimes transitoires dans les gazoducs sont analysés par la résolution d'un système d'équations différentielles aux dérivées partielles soumises à des conditions initiales et aux limites caractérisant le cas étudié. En d'autres termes, il s'agit de définir les distributions de pression et de débit en fonction de la distance et du temps  $P(x, t)$  et  $Q(x, t)$

Compte tenu des difficultés rencontrées dans la solution des équations régissant les écoulements transitoires, l'utilisation de logiciels pour la simulation des paramètres de ce régime s'avère nécessaire.

Du point de vue pratique, on s'est intéressé à l'estimation des pressions provoquées par ces écoulements à cause des dommages possibles qu'ils provoquent sur les canalisations.

Dans notre travail, nous avons utilisé le logiciel *PIPEPHASE*.

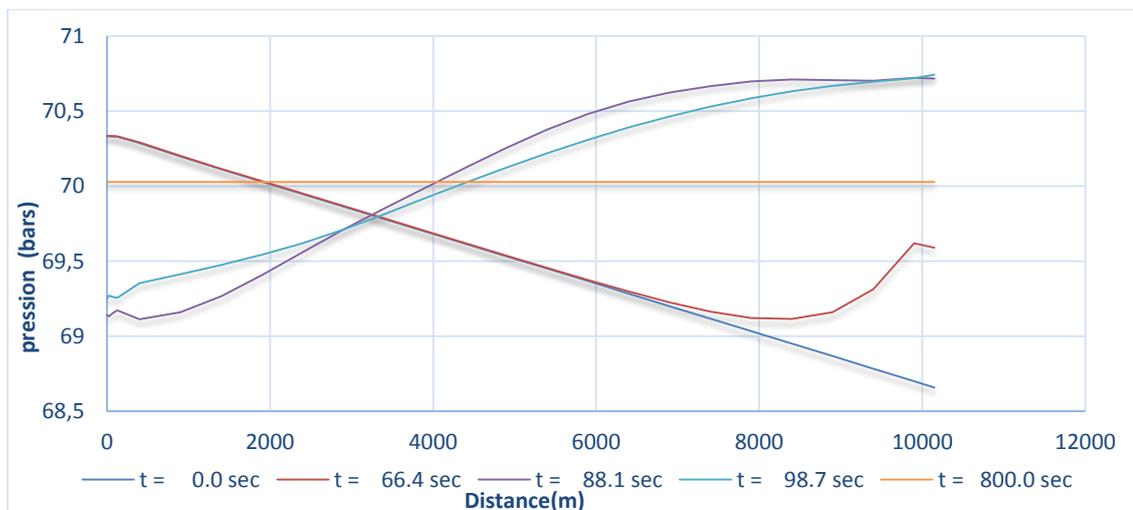
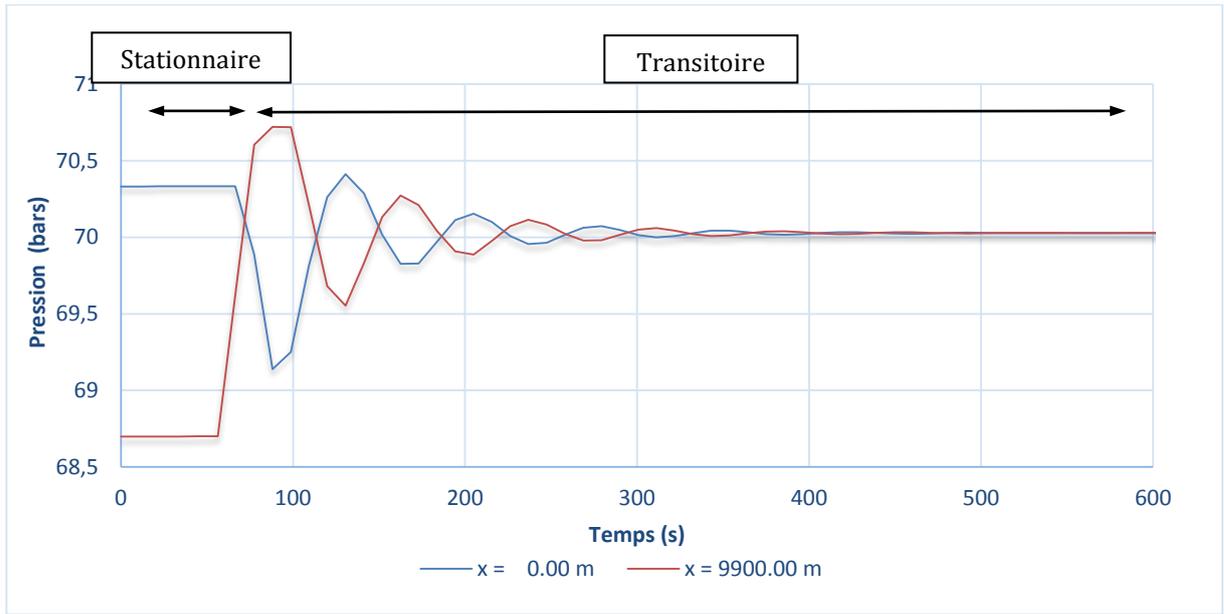


Fig V.20 : Evolution de la pression le long du premier tronçon du gazoduc suite à la fermeture de la vanne *PSI*



**Fig V.21** : Evolution de la pression en début et fin du premier tronçon du gazoduc suite à une fermeture de la vanne *PSI*.

**Interprétation du graphique :**

La fermeture d'une vanne placée sur une conduite entraîne l'apparition d'une onde de surpression se propageant à une grande vitesse, appelée célérité d'onde, vers l'amont où se trouve la station. La station de son côté se disjuncte par arrêt des compresseurs et y a création d'une dépression à la sortie de la station.

Dans cet état, la vitesse du gaz qui initialement était  $v_0$  s'annule du fait que ses particules viennent buter contre cette vanne.

La fermeture complète de la vanne, qui fait passer la vitesse de  $v_0$  à zéro, provoque derrière elle une onde de surpression, alors que dans le reste de la conduite l'écoulement persiste à la vitesse  $v_0$  et la pression  $p_0$ . Cette onde se propage vers l'amont avec une célérité ( $-a$ ). Au niveau de la vanne, la pression devient  $p = p_0 + \Delta p$ , où  $\Delta p$  est l'augmentation de la pression. Il est clair que les particules qui suivent immédiatement celles qui se sont immobilisées, sont stoppées à leur tour et ainsi de suite. Donc, l'onde de surpression (annulation de la vitesse et augmentation de la pression) se propagera à une vitesse " $a$ ", dite vitesse de propagation d'onde ou célérité, de la vanne vers la station.

En parallèle, la conduite n'est plus alimentée, il va donc se produire à partir de la station une dépression. L'onde de dépression se propage jusqu'à la vanne à une certaine vitesse.

La génération de l'onde de pression qui se déplace d'un point à un autre à la vitesse du son dans le fluide s'amortit du fait du frottement jusqu'à sa stabilisation autour d'une certaine pression qui est dans notre cas *70.93 bar*.

Le rôle des pertes de charge est négligeable quand on étudie le coup de bélier simple, c'est-à-dire la transmission d'une onde le long de la conduite. Mais pour notre étude, l'action des frottements a pour résultat d'affaiblir progressivement le phénomène. Cette usure du coup de bélier se traduira par exemple par l'amortissement progressif des ondes de la sinusoïde représentant la variation de la pression en un point de la conduite

L'enveloppe de pression maximale en transitoire le long de la canalisation de gaz est définie par la simulation de la fermeture successive des vannes de ligne installées dans les PS (12 PS) en 60 secondes (Fig.22).

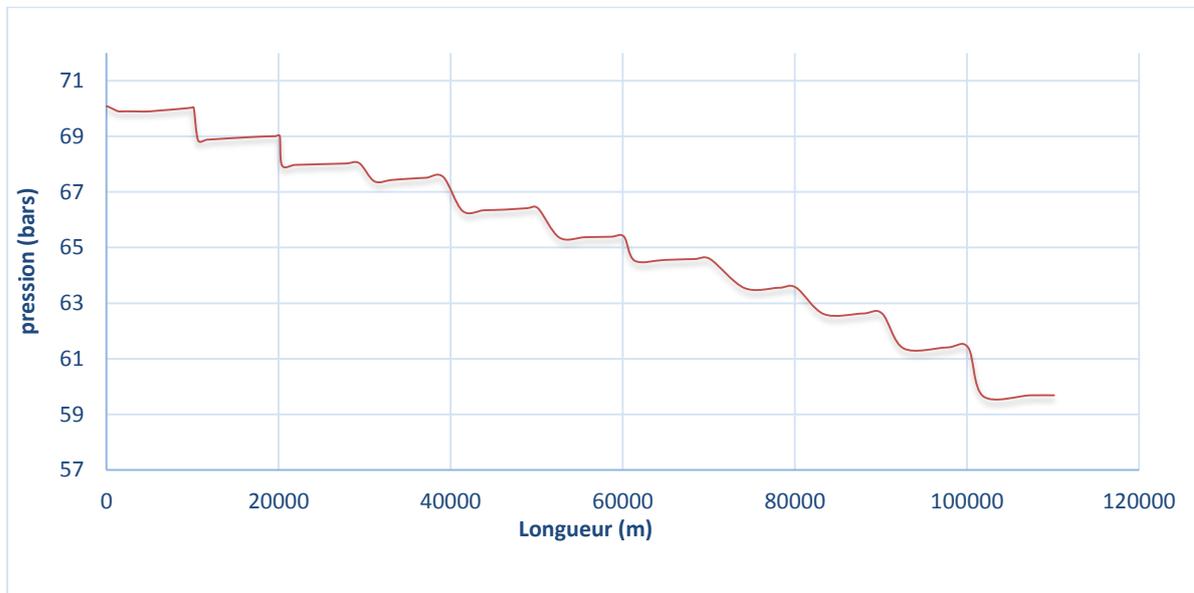


Fig V.22 : Enveloppe de la pression maximale en transitoire le long du gazoduc

### V.3.2 Modélisation de la pression :

A l'aide du logiciel *STATISTICA*, la modélisation de la distribution de pression obtenue ci-dessus nous a permis de calculer la pression en chaque point de la canalisation.

Le tableau suivant résume les modèles établis pour la détermination de cette pression.

La modélisation de pression :

$$P = b + a \cdot x^n$$

<i>x</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>n</i>
[0,10]	-0.04997	70.103	0.12879
[10,20]	-53.5432	173	0.0698
[20,30]	0.151	66.9389	0.19248
[30,40]	0.21665	64.69767	0.24347
[40,50]	0.11427	64.27129	0.27105
[50,60]	0.07172	64.25013	0.25156
[60,70]	9.9479	49.98476	0.03441
[70,80]	-0.03568	70.448	0.47825
[80,90]	-0.03536	70.47466	0.48556
[90,100]	-0.03000	70.48341	0.50997
[100,110]	-0.01619	70.32248	0.56947
[110,120]	-0.01028	70.30485	0.61723

Tab V.7 : Les coefficients des modèles de la courbe.

Toute modification du régime d'écoulement permanent dans un gazoduc notamment suite à une modification de vitesse ou du débit, provoquée par une manœuvre d'une vanne, génère un coup de bélier. Cet écoulement entraîne de brusques variations de pression comparées à la pression en régime stationnaire.

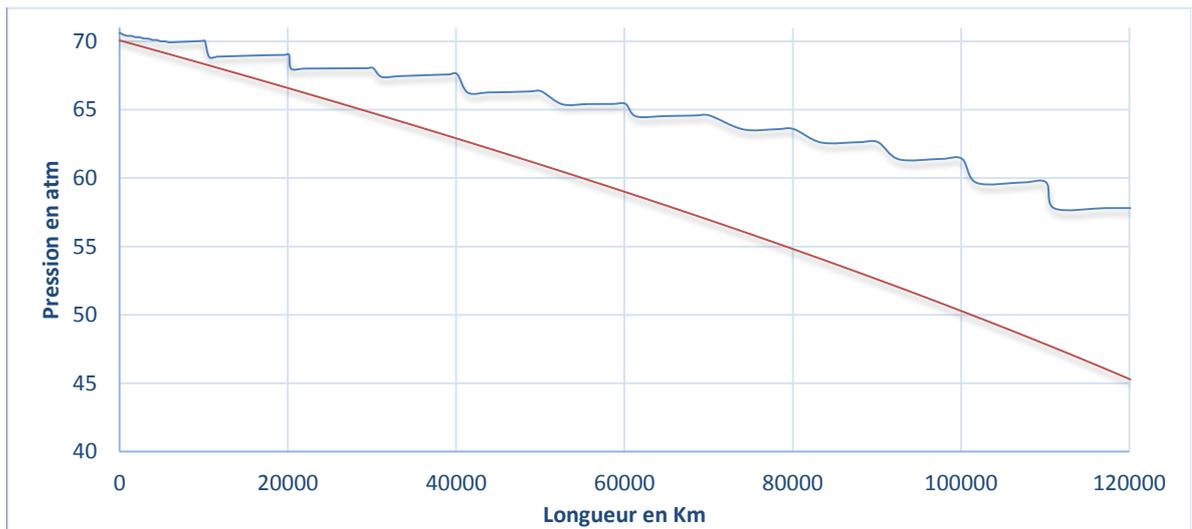


Fig V.23 : Distribution de la pression en régime stationnaire et transitoire.

L'utilisation du modèle décrit dans le présent travail a permis de calculer la probabilité de défaillance par défaut de corrosion le long du pipeline et la probabilité de défaillance par km.

Une application sur le défaut pris comme exemple et le kilomètre à qui il appartient donne les résultats suivants :

$$P_{def} = 45\%$$

$$P_{déf/km} = 71.96\%$$

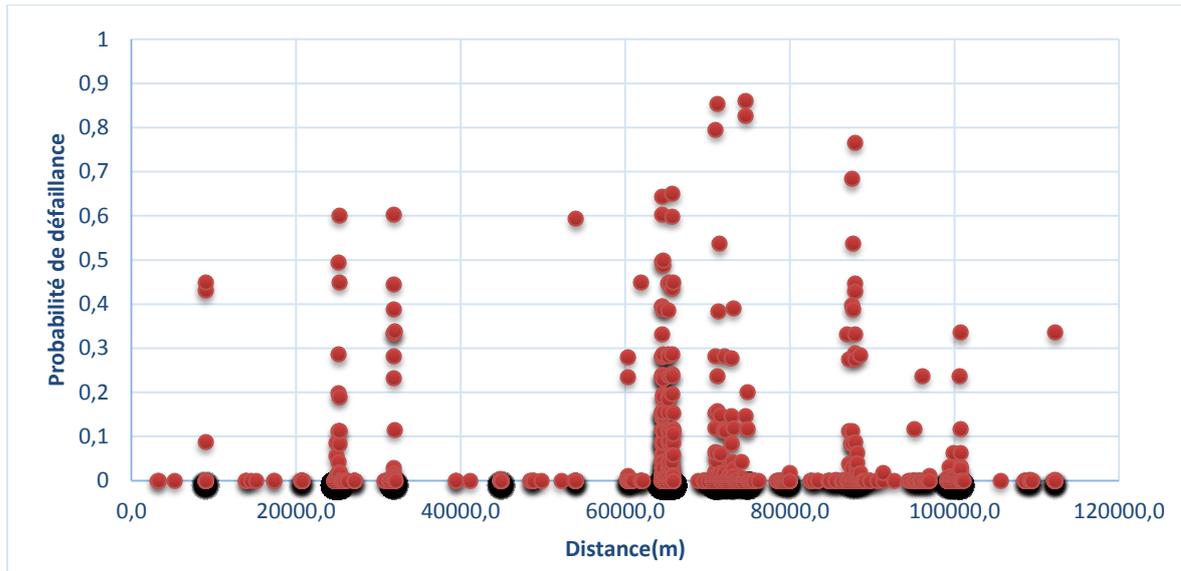


Fig V.24 : Probabilité de défaillance des défauts de corrosion en régime transitoire pour la 5<sup>ème</sup> année.

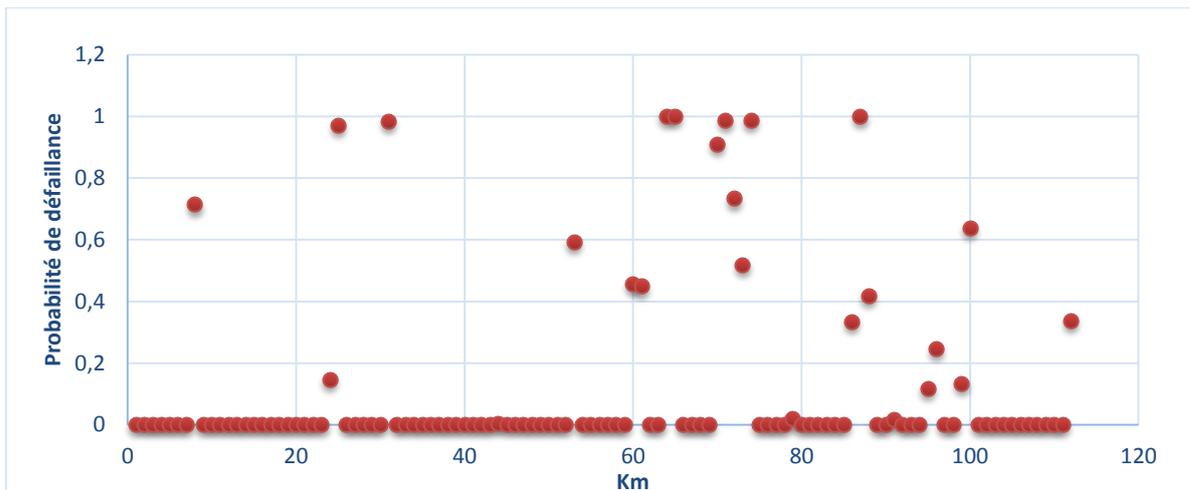
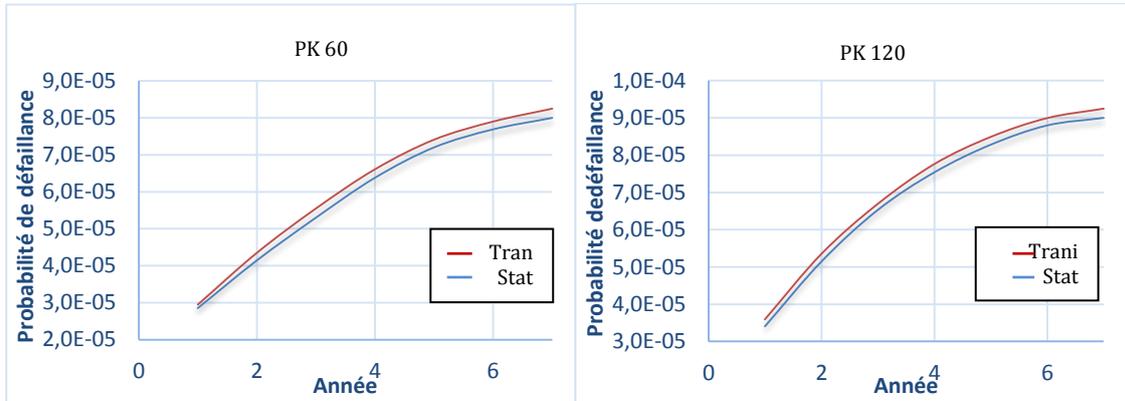
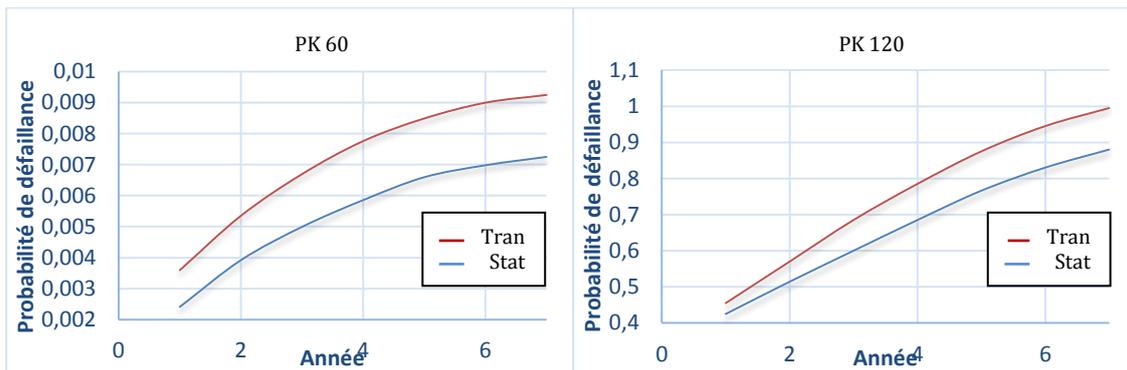


Fig V.25 : Probabilité de défaillance des kilomètres en régime transitoire pour la 5<sup>ème</sup> année.

### V.4 Impact de la géométrie du défaut sur la probabilité de défaillance selon les deux régimes :



**Fig V.26 :** Probabilité de défaillance d'un défaut de corrosion de type piqûre localisé au milieu et à la fin du gazoduc



**Fig V.27 :** Probabilité de défaillance d'un défaut de corrosion de type cratère localisé au milieu et à la fin du gazoduc

On remarque que la probabilité de défaillance diffère selon que l'approche soit stationnaire ou transitoire. Cette différence est significative en certains points de corrosion alors qu'elle est négligeable pour autres points selon la géométrie du défaut.

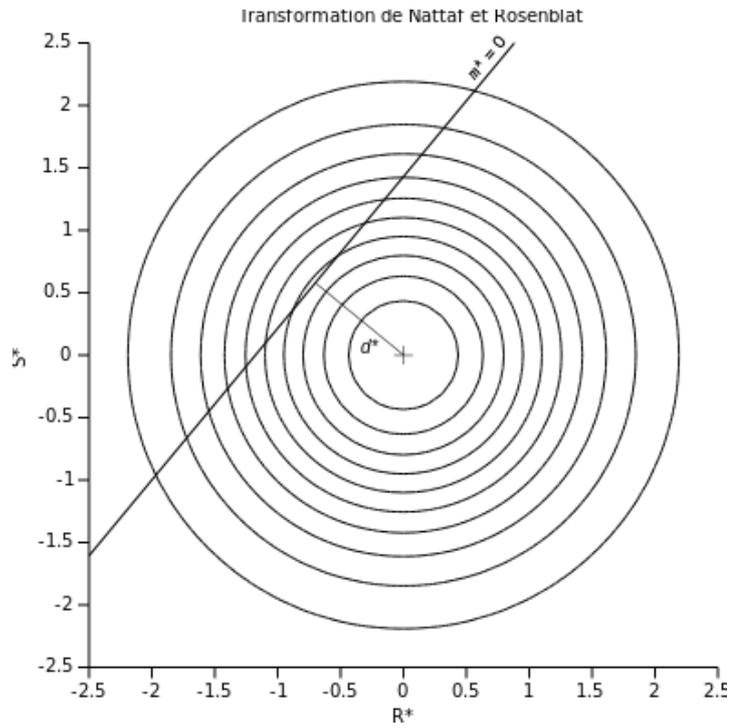


Figure V.28 : Détermination du point de conception par la méthode FORM : vue en dessus.

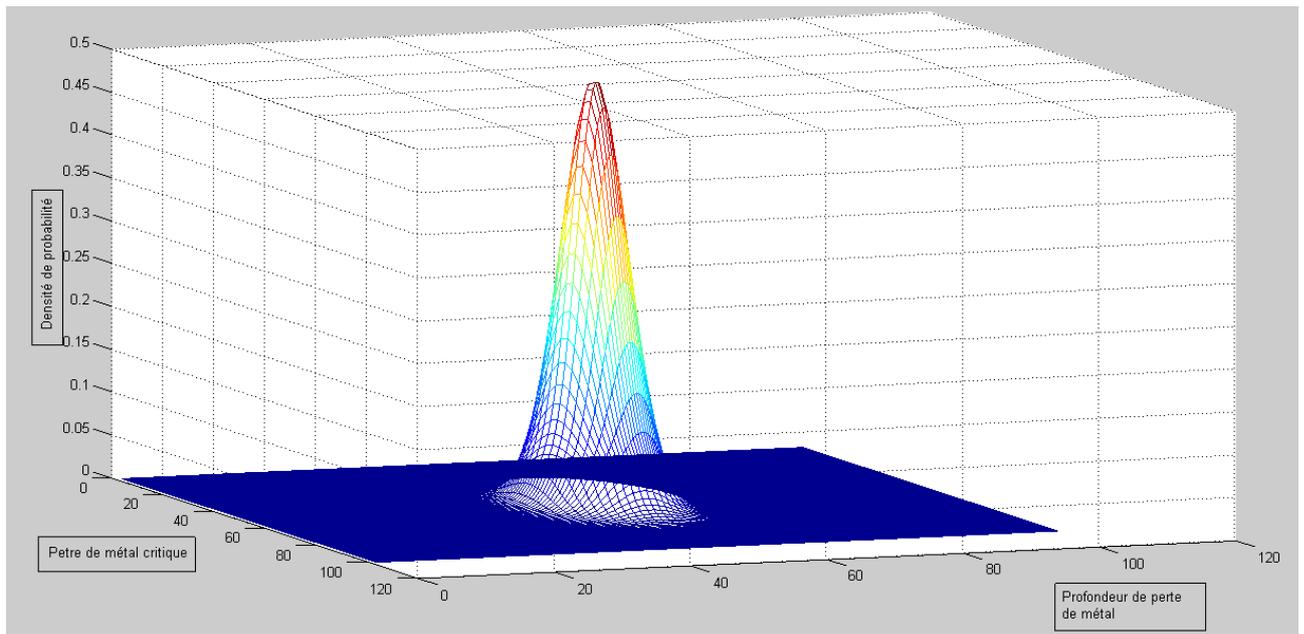
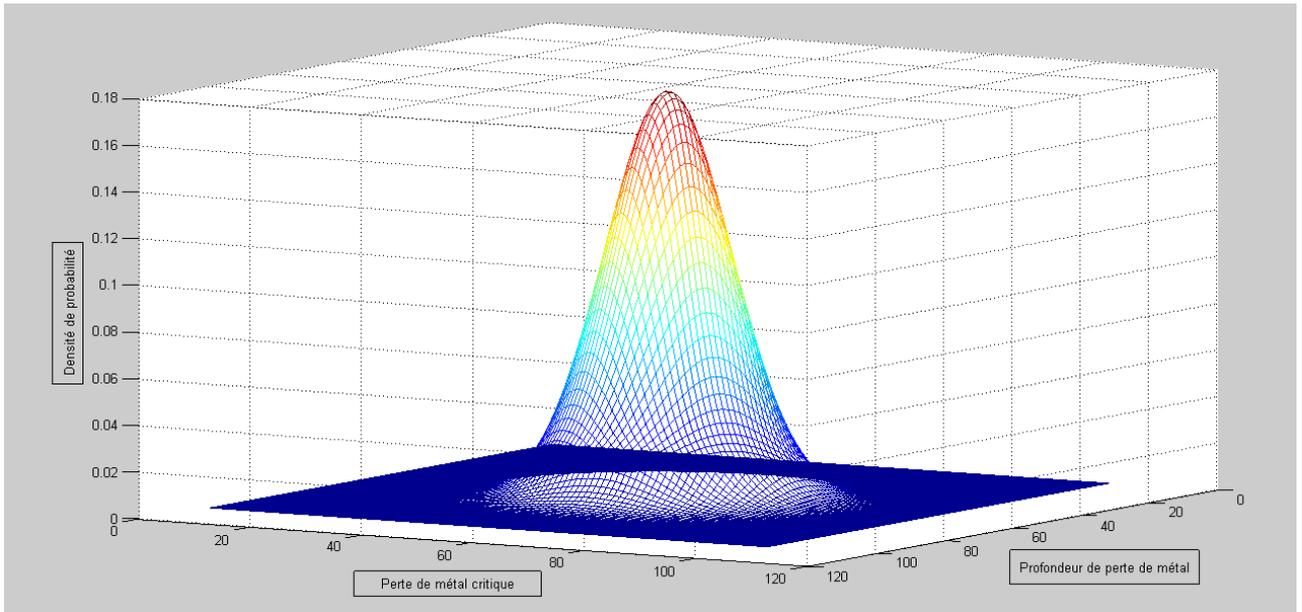


Fig V.29 : Représentation de l'évolution de la perte de métal critique et de la profondeur de la perte de métal en régime transitoire d'un défaut de corrosion type piquûre.



**Fig V.30** : Représentation de l'évolution de la perte de métal critique et de la profondeur de la perte de métal en régime transitoire d'un défaut de corrosion type cratère.

**V.5 Impact du régime d'écoulement sur le nombre de réparation :**

Pour qu'un kilomètre nécessite une réparation il faut que sa probabilité de défaillance soit supérieure à  $10^{-3}$  pour une zone désertique et à  $10^{-5}$  pour une zone de forte densité de population.

En utilisant la relation de calcul de la probabilité de défaillance par kilomètre et un seuil de risque de  $10^{-3}$ , les défauts de corrosion à réparer ont été identifiés ainsi que la probabilité de défaillance par kilomètre après réparation des défauts.

Pour le kilomètre étudié, le nombre de réparation en fonction des années en régime transitoire et en régime stationnaire est pratiquement le même durant les quatorze premières années, puisque les défauts de corrosion sont considérés comme des piqûres de corrosion. A partir de la quinzième année, le nombre de réparation en régime transitoire dépasse celui en régime stationnaire, puisque les dimensions des défauts sont devenues importantes et les défauts ne sont plus des piqûres de corrosion, ainsi leur résistance diminue davantage que le temps passe.

Le tableau suivant résume la probabilité de défaillance avant et après réparation pour le régime d'écoulement transitoire qui est le cas le plus défavorable ainsi que le nombre de réparation à effectuer.

<i>Année</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25
<i>P<sub>f</sub> avant réparation %</i>	38.90	46.89	55.17	63.37	71.31	79.07	85.92	91.39	95.32	97.66	99.97	99.99	100
<i>Nombre de réparation</i>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	10	25	42
<i>P<sub>f</sub> après réparation %</i>	$1.39 \cdot 10^{-11}$	$8.53 \cdot 10^{-11}$	$5.25 \cdot 10^{-10}$	$3.18 \cdot 10^{-9}$	$1.85 \cdot 10^{-8}$	$1.03 \cdot 10^{-7}$	$5.79 \cdot 10^{-7}$	$4.36 \cdot 10^{-6}$	$5.72 \cdot 10^{-5}$	$6.10 \cdot 10^{-4}$	$5.51 \cdot 10^{-4}$	$9.83 \cdot 10^{-4}$	$7.31 \cdot 10^{-4}$

**Tab V.8 :** Probabilité de défaillance du neuvième kilomètre avant et après réparation ainsi que le nombre de réparation en régime transitoire

Le tableau ci-dessus montre la probabilité de défaillance avant et après réparation des défauts de corrosion en fonction des années. Il est évident qu'après réparation d'un ou plusieurs défauts, leurs probabilités de défaillance s'annulent engendrant ainsi la diminution de probabilité de défaillance

par kilomètre au-dessous de  $10^{-3}$ . Le risque de défaillance du kilomètre est ainsi éliminé et l'évolution de la probabilité de défaillance au cours des années devient moins accentuée.

Les défauts de corrosion à réparer sur tout le tronçon au cours des années ont été identifiés et regroupés dans les figures qui suivent.

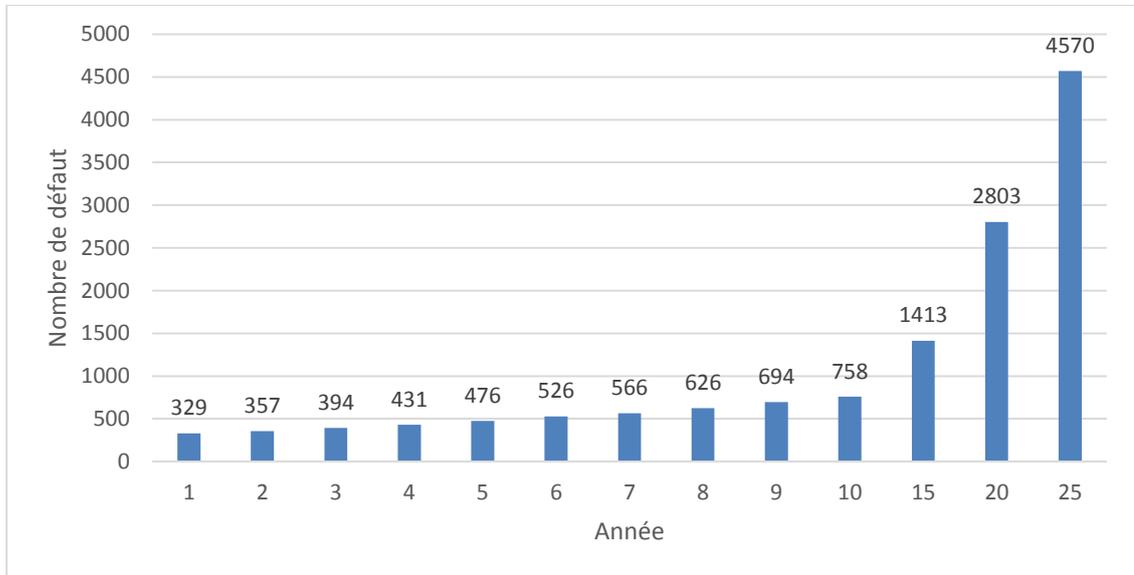


Fig V.31 : Nombre de défaut à réparer sur 25 ans selon le régime transitoire

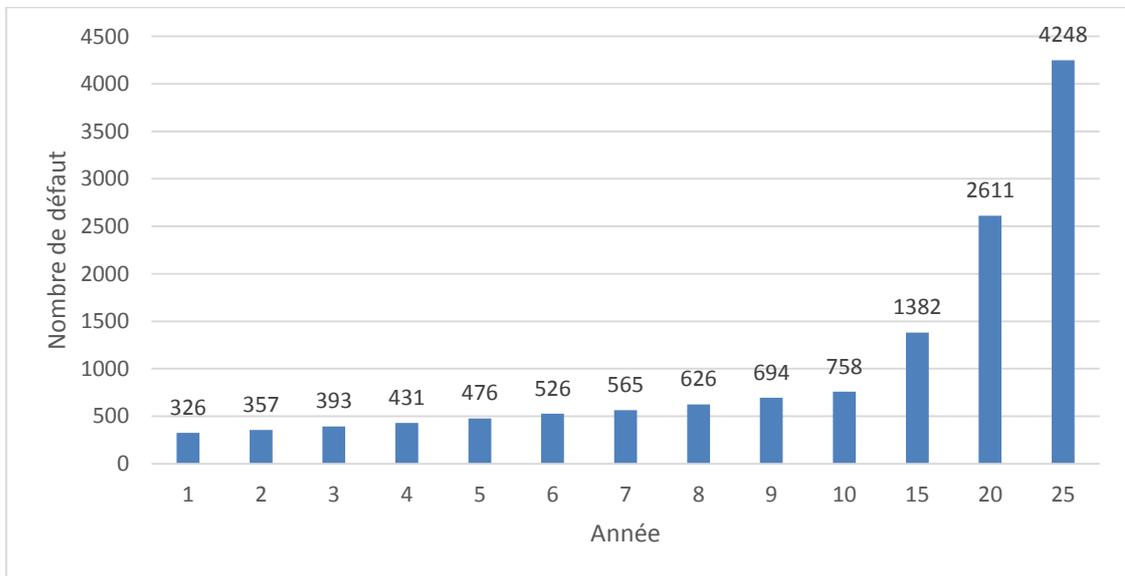
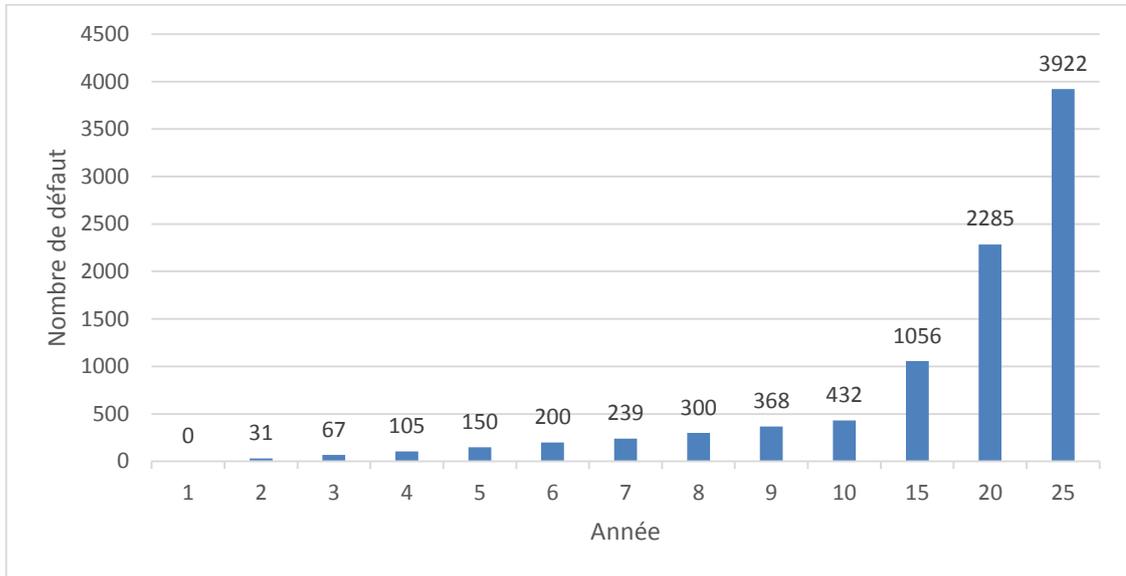
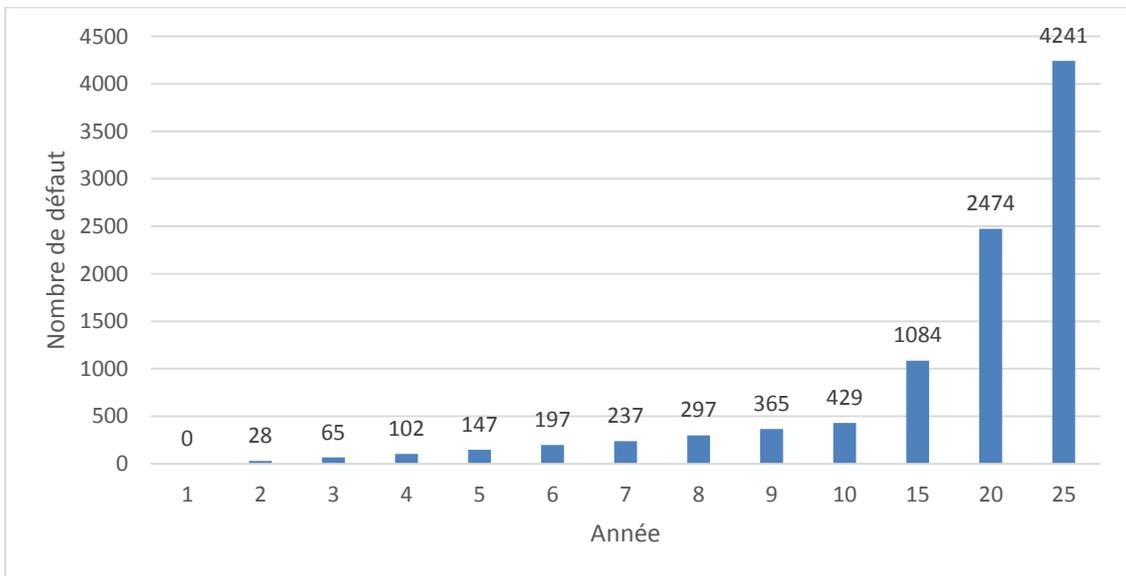


Fig V.32: Nombre de défaut à réparer sur 25 ans selon le régime stationnaire

Il s'avère que le nombre de défaut à réparer en régime transitoire est plus élevé que celui en régime stationnaire, étant donné que les pressions engendrées sont plus importantes.



**Fig V.33** : Nombre de défaut à réparer sur 25 ans en considérant que tous les défauts de la première année ont été réparés selon le régime stationnaire



**Fig V.34** : Nombre de défaut à réparer sur 25 ans en considérant que tous les défauts de la première année ont été réparés selon le régime transitoire.

## **Conclusion :**

La corrosion détériore la résistance structurelle et l'intégrité d'un pipeline, conduisant à des pertes dans l'épaisseur. La propagation de la taille de ces pertes et l'augmentation des quantités évolue avec le temps. On dit alors que la corrosion est un processus variant dans le temps, ce qui rend le pipeline comme une structure dépendante du temps et de fait sa fiabilité. En conséquence, la connaissance de l'évolution de la perte en fonction du temps est primordiale pour la quantification du risque de défaillance du pipeline corrodé. En plus de cela, la corrosion dans les pipelines est variable d'un point à un autre, unique et complexe. Le développement de la corrosion est proportionnellement influencé par son environnement et les systèmes d'exploitation de pipelines, dans lequel leurs caractéristiques ne peuvent pas toujours être décrites par des approches déterministes.

Les méthodes probabilistes semblaient être les meilleures approches pour faire face aux corrosions et elles ont été fréquemment utilisées dans la conception des structures.

La prédiction de la vitesse de corrosion a été le sujet d'intérêt de la première démarche. Il est intéressant de voir comment les vitesses de corrosion dans le sens longueur et profondeur évoluent dans le temps. Vu que notre gazoduc a fait l'objet d'une seule inspection durant la période de son exploitation, nous avons présenté une approche d'estimation de ces vitesses de corrosion par l'inférence bayésienne. Le statisticien bayésien qui cherche à mieux connaître la valeur du paramètre recherché qui est la vitesse de corrosion dans notre cas, commence par préciser l'espace des valeurs possibles avant d'entreprendre une quelconque observation. Ensuite, il exprime sa connaissance à priori sous forme d'une loi de probabilité, d'écrire la distribution des données conditionnelle aux paramètres recherchés (l'équivalent de la vraisemblance) puis combine la nouvelle observation avec celle a priori dans l'analyse envisagée (loi à posteriori). L'utilisation de la distribution a priori sur le paramètre demeure en fait la meilleure manière d'incorporer des informations supplémentaires à un modèle statistique

La distribution a priori vise à représenter un "état d'ignorance" sur la vitesse de corrosion, la distribution a posteriori correspondante pourra alors être interprétée comme résultant de l'apport propre des données. Le cadre bayésien se présente donc comme une théorie formalisée de l'apprentissage par l'expérience.

La fiabilité de la structure peut être calculée facilement tant les caractéristiques des défauts peuvent être déterminées statistiquement. Elle nous permet d'évaluer la performance d'une structure soumise à des sollicitations aléatoires. La variabilité provient principalement des natures incertaines

des phénomènes mis en jeu sur la structure. Les méthodes de fiabilité en fonction du temps permettent d'intégrer des phénomènes tels que la corrosion qui affecte les caractéristiques des matériaux. Nous avons utilisé dans cette analyse le modèle de fonction d'état limite qui fournit une approche plus facile d'évaluation de la fiabilité du pipeline corrodé soumis à une pression interne variable selon les deux régimes d'écoulement stationnaire et transitoire.

La fiabilité de la canalisation a été initialement étudiée en traitant la structure comme une unité indépendante. L'analyse a été également élaborée pour le pipeline disposé comme un système d'unités en série.

Les résultats dévoilent l'idée de ne pas ignorer les défauts peu importants, car il a été montré que les paramètres des défauts (la profondeur du défaut  $d$ , la longueur longitudinale  $l$ ) s'unissent les uns aux autres avec le temps.

Enfin, nous avons mis au point un modèle mathématique et numérique du phénomène d'écoulement transitoire engendré par la fermeture brusque d'une vanne de ligne avec la prise en compte des surpressions engendrées par les phénomènes transitoires afin de voir son impact sur la probabilité de défaillance de la canalisation.

D'après les résultats, il s'avère que la pression en régime transitoire dépasse considérablement la pression en régime stationnaire. Ceci se traduit par la génération d'une onde de pression qui se déplace d'un point à un autre à la vitesse du son dans le fluide. De ce fait, l'onde soumet la canalisation à des valeurs de pression susceptibles de dépasser les limites de résistance de l'ouvrage. Le risque de défaillance ainsi calculé en tenant compte de ce régime d'écoulement ne diffère pas amplement de celui calculé en régime stationnaire étant donné que les défauts de corrosion sont des piqûres.

L'introduction de l'analyse transitoire dans la gestion de l'intégrité d'un gazoduc doit être d'autant plus recommandée :

- en présence de pertes de métal de type corrosion généralisée
- Lorsque le seuil critique de réparation est plus rigoureux
- Lorsque les pertes de métal se concentrent à proximité des postes de sectionnement

Il est important de noter que l'introduction de l'analyse transitoire dans la gestion de l'intégrité d'un gazoduc ne se traduit pas par une augmentation significative du nombre de réparations mais uniquement par des ajustements dans le planning des réparations. Autrement dit, elle ne s'accompagne pas de surcoûts prohibitifs.

L'introduction de l'analyse transitoire dans la gestion de l'intégrité d'un gazoduc n'est pas justifiée lorsque la totalité des points de corrosion sont de type piqûres.

## **Conclusion :**

La corrosion détériore la résistance structurelle et l'intégrité d'un pipeline, conduisant à des pertes dans l'épaisseur. La propagation de la taille de ces pertes et l'augmentation des quantités évolue avec le temps. On dit alors que la corrosion est un processus variant dans le temps, ce qui rend le pipeline comme une structure dépendante du temps et de fait sa fiabilité. En conséquence, la connaissance de l'évolution de la perte en fonction du temps est primordiale pour la quantification du risque de défaillance du pipeline corrodé. En plus de cela, la corrosion dans les pipelines est variable d'un point à un autre, unique et complexe. Le développement de la corrosion est proportionnellement influencé par son environnement et les systèmes d'exploitation de pipelines, dans lequel leurs caractéristiques ne peuvent pas toujours être décrites par des approches déterministes.

Les méthodes probabilistes semblaient être les meilleures approches pour faire face aux corrosions et elles ont été fréquemment utilisées dans la conception des structures.

La prédiction de la vitesse de corrosion a été le sujet d'intérêt de la première démarche. Il est intéressant de voir comment les vitesses de corrosion dans le sens longueur et profondeur évoluent dans le temps. Vu que notre gazoduc a fait l'objet d'une seule inspection durant la période de son exploitation, nous avons présenté une approche d'estimation de ces vitesses de corrosion par l'inférence bayésienne. Le statisticien bayésien qui cherche à mieux connaître la valeur du paramètre recherché qui est la vitesse de corrosion dans notre cas, commence par préciser l'espace des valeurs possibles avant d'entreprendre une quelconque observation. Ensuite, il exprime sa connaissance à priori sous forme d'une loi de probabilité, d'écrire la distribution des données conditionnelle aux paramètres recherchés (l'équivalent de la vraisemblance) puis combine la nouvelle observation avec celle a priori dans l'analyse envisagée (loi à posteriori). L'utilisation de la distribution a priori sur le paramètre demeure en fait la meilleure manière d'incorporer des informations supplémentaires à un modèle statistique

La distribution a priori vise à représenter un "état d'ignorance" sur la vitesse de corrosion, la distribution a posteriori correspondante pourra alors être interprétée comme résultant de l'apport propre des données. Le cadre bayésien se présente donc comme une théorie formalisée de l'apprentissage par l'expérience.

La fiabilité de la structure peut être calculée facilement tant les caractéristiques des défauts peuvent être déterminées statistiquement. Elle nous permet d'évaluer la performance d'une structure soumise à des sollicitations aléatoires. La variabilité provient principalement des natures incertaines

des phénomènes mis en jeu sur la structure. Les méthodes de fiabilité en fonction du temps permettent d'intégrer des phénomènes tels que la corrosion qui affecte les caractéristiques des matériaux. Nous avons utilisé dans cette analyse le modèle de fonction d'état limite qui fournit une approche plus facile d'évaluation de la fiabilité du pipeline corrodé soumis à une pression interne variable selon les deux régimes d'écoulement stationnaire et transitoire.

La fiabilité de la canalisation a été initialement étudiée en traitant la structure comme une unité indépendante. L'analyse a été également élaborée pour le pipeline disposé comme un système d'unités en série.

Les résultats dévoilent l'idée de ne pas ignorer les défauts peu importants, car il a été montré que les paramètres des défauts (la profondeur du défaut  $d$ , la longueur longitudinale  $l$ ) s'unissent les uns aux autres avec le temps.

Enfin, nous avons mis au point un modèle mathématique et numérique du phénomène d'écoulement transitoire engendré par la fermeture brusque d'une vanne de ligne avec la prise en compte des surpressions engendrées par les phénomènes transitoires afin de voir son impact sur la probabilité de défaillance de la canalisation.

D'après les résultats, il s'avère que la pression en régime transitoire dépasse considérablement la pression en régime stationnaire. Ceci se traduit par la génération d'une onde de pression qui se déplace d'un point à un autre à la vitesse du son dans le fluide. De ce fait, l'onde soumet la canalisation à des valeurs de pression susceptibles de dépasser les limites de résistance de l'ouvrage. Le risque de défaillance ainsi calculé en tenant compte de ce régime d'écoulement ne diffère pas amplement de celui calculé en régime stationnaire étant donné que les défauts de corrosion sont des piqûres.

L'introduction de l'analyse transitoire dans la gestion de l'intégrité d'un gazoduc doit être d'autant plus recommandée :

- en présence de pertes de métal de type corrosion généralisée
- Lorsque le seuil critique de réparation est plus rigoureux
- Lorsque les pertes de métal se concentrent à proximité des postes de sectionnement

Il est important de noter que l'introduction de l'analyse transitoire dans la gestion de l'intégrité d'un gazoduc ne se traduit pas par une augmentation significative du nombre de réparations mais uniquement par des ajustements dans le planning des réparations. Autrement dit, elle ne s'accompagne pas de surcoûts prohibitifs.

L'introduction de l'analyse transitoire dans la gestion de l'intégrité d'un gazoduc n'est pas justifiée lorsque la totalité des points de corrosion sont de type piqûres.