

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

## MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

### INTITULE

**Approche fiabiliste dans la vérification du dimensionnement de  
réservoir de stockage**

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : MAINTENANCE INDUSTRIELLE ET FIABILITE  
MECANIQUE.

PRESENTE PAR :

**GHERS NADIR.**

**DIRECTEUR DU MEMOIRE: Pr.AMIRAT ABDELAZIZ**

**DEVANT LE JURY**

<b>PRESIDENT: Dr. LAGRED A</b>	<b>(MCA)</b>	<b>Université Badji Mokhtar Annaba</b>
<b>EXAMINATEURS: Pr. ZEGHIB N</b>	<b>(Pr)</b>	<b>Université Badji Mokhtar Annaba</b>
<b>Mr. LAISSAOUI R</b>	<b>(MAA)</b>	<b>Université Badji Mokhtar Annaba</b>
<b>Mr. GOUASMI S</b>	<b>(MAA)</b>	<b>Université Badji Mokhtar Annaba</b>
<b>Mr. KALLOUCHE A</b>	<b>(MMA)</b>	<b>Université Badji Mokhtar Annaba</b>

**Année: 2015/2016**



## *Remerciement*

*Tout d'abord, je remercie le bon Dieu qui m'a donné la force et la patience pour terminer mes études.*

*J'adresse ma reconnaissance particulière à mes parents qu'ils soient chéris, pour leur soutien et aide sans faille qu'ils m'ont apporté tout le long de ma scolarité.*

*Je tiens à remercier mon encadreur :  
Mr. **ABDE LAZIZE AMIRAT** qui a ménagé un grand effort afin de me permettre de mener à bien mon modeste travail et à qui j'exprime ma gratitude et mes respects.*

*Et je remercie également, Mr : **KHELIF Rabia**, responsable de la spécialité, pour son support et sa patience.*

*Un grand merci pour les responsables de **FERTIAL** qui m'ont facilité les tâches dans l'élaboration de ce mémoire.*

*Enfin, je remercie tous ceux qui ont participés de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

*Merci.*



## *Dédicaces*

*À l'aide d'ALLAH j'ai pu réaliser ce travail que Je dédie  
A ma mère, à mon père*

*Pour leur bienveillance et leur abnégation de m'avoir  
encourager à terminer, dans de bonnes conditions, mon  
travail.*

*A tout les membres de ma grande famille  
A tous mes amis chacun son nom  
en particulier les compagnons du long chemin avec tous  
mes vœux de succès.*

*A tous ceux que j'aime.  
A tous ceux qui m'aiment.*

*GHERS NADIR*

# Résumé

---

## **Résumé :**

Cet article couvre les méthodologies de dimensionnement des réservoirs de stockages utilisés dans les industries de procédés typiques. Il aide les ingénieurs et les chercheurs à comprendre la conception de base d'un réservoir de stockage sous la pression atmosphérique et enrichi leurs connaissances dans la sélection des normes adaptées et le dimensionnement selon les spécifications du code API 650.

Il existe plusieurs types de réservoirs distingués par la pression à supporter, la température de fonctionnement et la sécurité à prévoir. La sélection de l'un ou l'autre de ces réservoirs dépend des réglementations environnementales, de l'emplacement géographique et des matériaux utilisés.

La théorie de dimensionnement et de conception des réservoirs est bien très détaillée dans les différents codes et normes en vigueur, ainsi que les normes de choix des matériaux .

Un cas pratique présentant, le calcul d'un réservoir de stockage atmosphérique en guidant le lecteur pas à pas à faire le calcul et le dimensionnement du réservoir en se basant sur le cas d'un réservoir industriel de stockage d'ammoniac.

Dans cet exemple nous avons montré le dimensionnement des viroles d'épaisseur variable en fonction de la distribution de contrainte qui est forte en bas du réservoir.

Un réservoir industriel doit travailler en toute sécurité dans son environnement. De ce fait, une étude fiabiliste a été faite pour mettre le point sur la durée de vie et donner un aperçu du volet sécurité des réservoirs de stockage.

## **Table des figures**

### **Chapitre1 :**

Figure 1.1- variables -composant -système.....	03
Figure1.2- fiabilité pratique et fiabilité théorique.....	04
Figure 1.3- représentation des variables.....	05
Figure 1.4.- représentation approchée de la réalité physique.....	08
Figure 1.5 - scénario de défaillance en mécanique.....	09
Figure 1.6 -analyse de sensibilité fiabiliste.....	10
Figure 1.7 - analyse de la fiabilité.....	11
Figure 1.8- complexité du couplage mécano-fiabiliste.....	12

### **Chapitre2 :**

Figure2.1- les trois modes de stockage pour des liquides avec point normal d'ébullition (PNE) inférieur à la température ambiante.....	16
Figure 2.2- Réservoirs atmosphériques.....	21
Figure2.3 – Fond de réservoir.....	23
Figure 2.4 – Cuve ouverte.....	25
Figure 2.5 – Toit fixe supporté.....	27
Figure 2.6 – Toit fixe autoportant.....	28
Figure 2.7 – Réservoirs à toit fixe : pertes de produit.....	30

### **Chapitre3 :**

Figure3.1-réservoir à toit fixe (bac de stockage des produits énergétiques).....	31
Figure3.2- Forces longitudinales agissant sur mince cylindre sous pression interne.....	35
Figure 3.3-Forces circonférentielles agissant sur mince cylindre sous pression interne.....	37
Figure 3.4-construction de la robe de réservoir.....	41
Figure 3.5 -Epaisseurs de la virole pour 3 différents aciers de construction.....	44

## **Chapitre 4 :**

Figure 4.1.présentation de phimecasoft.....	46
Figure 4.2. Les fonctions de phimecasoft.....	47
Figure 4.3.modèle physique.....	48
Figure 4.4.modèle probabiliste.....	49
Figure 4.5.l'état limite.....	49
Figure 4.6. L'arbre de calcul.....	50
Figure 4.7. Étude paramétrique (diagramme de beta en fonction du temps).....	50
Figure 4.8. Evolution B en fonction du nombre d'année (A235).....	51
Figure 4.9. Evolution B en fonction du nombre d'année (A285).....	52
Figure 4.10 Evolution B en fonction du nombre d'année (A515).....	53
Figure 4.11. Evolution B en fonction du nombre d'année (A285 et A515).....	54

## **Liste des tableaux :**

### **Chapitre 2:**

Tableau2.1.-température $\theta_a$ pression absolue $p$ et masse volumique $\rho$ de quelques produits pour les trois modes de stockage.....	18
Tableau2.2.- modes de stockage et types de réservoirs en fonction du produit stocké.....	19
Tableau2.3 – Capacités maximales déterminées à partir des règles du CODRES, avec une épaisseur de robe en acier de 45 mm.....	22

### **Chapitre 3 :**

Tableau 3.1-Dimensions typiques pour les réservoirs de production (100,101)(Avec la permission de l'institut du pétrole américain).....	34
Tableau3.2- Représente les caractéristiques géométriques du réservoir de stockage de FERTIAL.....	40
Tableau3.3- calcul des épaisseurs de la virole de réservoir avec la formule 12.....	43
Tableau3.4- calcul des épaisseurs de la virole de réservoir avec la formule 8.....	44

### **Chapitre 4 :**

Tableau 4.1.represente beta en fonction du temps pour différentes épaisseurs de l'acier A235.....	51
Tableau 4.2.represente beta en fonction du temps pour différentes épaisseurs de l'acier A285.....	52
Tableau 4.3.represente beta en fonction du temps pour différentes épaisseurs de l'acier A515.....	54



## Sommaire :

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

### Chapitre 1 : première approche de la fiabilité mécanique

1.1. Généralité.....	01
1.1.2. Méthodes de fiabilité en mécanique.....	01
1.1.3. Une attitude nouvelle : vaincre des obstacles.....	02
1.2. fiabilité théorique en mécanique.....	03
1.2.1. Approche fiabiliste en mécanique.....	03
1.2.2. Chaîne : variables-composant-système.....	04
1.2.3. Fiabilité théorique.....	04
1.2.4. Sur l'information disponible.....	05
1.2.5. Variable aléatoire ou processus.....	06
1.3. Modélisation mécanique.....	07
1.3.1. Modèle de représentation de la physique.....	07
1.3.2. Un équilibre entre ressources et besoins.....	08
1.3.3. Analyse de sensibilité fiabiliste.....	09
1.3.4. Analyse fiabilité.....	10

### Chapitre 2 : état de l'art sur les réservoirs de stockage

1.1. généralité sur les réservoirs de stockage.....	13
1.2. configuration des réservoirs de stockage.....	13
1.3. modes de stockage.....	14
1.3.1. Liquides volatils qui ne bouillent pas à température ambiante.....	14
1.3.2. Liquides volatils qui bouillent à des températures inférieures ou égales à la température ambiante.....	15
a) généralité.....	15
b) Stockage sous pleine pression.....	16
c) Stockage semi-réfrigérés.....	16
d) Stockage réfrigérés etcryogénique.....	16
2. Réservoirs métalliques : stockage des liquides à température ambiante.....	20
2.1. Réservoirs atmosphérique.....	20
a) généralité.....	20
b) cuve ouverte.....	21
c) fond.....	21
d) robe.....	22
2.2. Réservoir à toit fixe.....	24
2.2.1. Généralité.....	24
2.2.2. Réservoir à toit fixe supporté.....	24

2.2.3. Réservoir à toit fixe autoportant .....	26
2.2.4. Pertes par respiration et remplissage .....	27
Conclusion .....	28

### **Chapitre 3 : méthode déterministe de calcul de la robe de réservoir de stockage**

1. introduction .....	29
2. Dimensionnement d'un réservoir de stockage .....	30
1.1. Définition des hypothèses .....	30
1.2. Choix de matériaux .....	30
1.3. Définition des codes de calcul .....	30
1.4. Calcul des épaisseurs des viroles .....	30
1.5. Calcul de l'épaisseur de la bordure annulaire .....	31
1.6. Calcul de la charpente du toit .....	31
1.7. Vérification Au Séisme .....	31
1.8. Vérification Au vent .....	31
1.9. Calcul des oreilles de levage .....	31
1.10. Calcul des événements ou des soupapes de sécurité .....	31
1.11. Calcul des réchauffeurs de masse .....	31
1.12. Calcul circuit de la mousse et de l'eau des réservoirs .....	31
1.13. Calcul de la cuvette de rétention .....	31
1.14. virole, conception de grands réservoirs de stockage .....	31
1.15. Contraintes dans des viroles minces basées sur la théorie de la membrane .....	32
1.16. Conception coquille de grands réservoirs de stockage.....	34
2. Cas pratique sur le calcul des épaisseurs de la virole .....	38
2.1. Caractéristiques géométriques de réservoirs de stockage de FERTIAL .....	38
2.2. Caractéristiques du matériau de construction .....	40
2.3. Calcul des épaisseurs du réservoir suivant API 650 .....	40
Conclusion .....	43

### **chapitre 4 : calcul fiabiliste**

1. présentation de l'outil de calcul phimecasoft.....	44
2. fonctionnalités de phimecasoft .....	45
2.1. Méthodes d'analyse de fiabilité par approximation de l'état limite .....	45
2.2. Méthode d'analyse de fiabilité par simulations .....	45
2.3. Calcul de plan d'expérience .....	45
2.4. Evaluation de méta-modèle .....	45
2.5. Analyse statique de données .....	45
3. Cas pratique .....	46
3.1. Application sur le logiciel phimeca soft .....	46
a) Modèle physique .....	46
b) Modèle probabiliste .....	47

c) Etat limite.....	47
d) Arbre de calcul.....	48
e) Etude paramétrique.....	48
3.2. Discussion des résultats .....	48
a) Cas A235 pour une épaisseur minimale de 15mm .....	48
b) Cas A285 pour une épaisseur minimale de 12mm .....	49
c) Cas A516 pour une épaisseur minimale de 7 mm .....	52
d) Cas A 515 pour une épaisseur minimale de 15 mm .....	53
e) Cas A285_A515 pour une épaisseur minimale de 15 mm .....	54
Conclusion générale.....	55
Références bibliographiques	

# Introduction générale

---

## **Introduction générale :**

Dans le cadre de la présentation du mémoire en vue de l'obtention du diplôme de master en génie mécanique, option maintenance industrielle et fiabilité mécanique, un stage de fin d'étude a été réalisé au niveau de l'entreprise FERTIAL Annaba. Ce stage concerne l'étude sur les réservoirs de stockage.

Pour évoluer notre étude, nous avons partagé notre travail en quatre parties. La première partie, nous permet de voir une approche sur la fiabilité en mécanique.

Dans le deuxième chapitre nous présentons un état de l'art sur les réservoirs de stockage des fluides pour améliorer notre connaissance sur ce domaine.

Le troisième chapitre est concerné à une méthode déterministe de calcul de la virole de réservoir de stockage à toit fixe. Nous introduisons tous les paramètres nécessaires pour l'utilisation de ce réservoir pour qu'il puisse stocker 20.000 tons. Tout en respecte les exigences de la norme API650 (Américain petroleum institute).

Le dimensionnement est nécessaire pour l'utilisation des réservoirs en toute sécurité dans la mesure où des problèmes de fatigue apparaissent lorsque la structure est soumise à des pressions variables de façon répétée et les effets de la corrosion. Le quatrième chapitre présente un calcul fiabiliste sur la durée de vie de la virole du réservoir sous l'effet de la corrosion.

Une conclusion générale reprend les principaux résultats de cette étude suivie des perspectives. Les références bibliographiques clôturent ce mémoire.

**Introduction :**

Aborder les questions de fiabilité en mécanique suppose de préciser tout d'abord dans quel contexte se situe l'approche proposée.

En effet, la fiabilité recouvre tout à la fois des méthodes largement répandues, comme la mise en œuvre des techniques statistiques du contrôle de fabrication, que de nouvelles méthodes s'intéressant à la défaillance et à l'évaluation du risque.

Ces dernières procèdent d'une démarche encore nouvelle dont la philosophie générale doit être située.

C'est donc l'objet de ce chapitre que de préciser, au travers de concepts généraux, le contexte et l'objectif, espérant ainsi susciter l'intérêt du lecteur pour une approche fiabiliste du dimensionnement. [1]

**1.1. Généralités :****1.1.1. Méthodes de fiabilité en mécanique :**

Nous nous intéressons à des méthodes qui sont développées essentiellement en relation avec la modélisation des matériaux et des structures.

Elles ont bénéficié de la mécanique de bien des acquis de disciplines scientifiques, la théorie des probabilités en premier lieu, et de l'expérience d'autres champs technologiques.

Elles s'en différencient par une relation étroite avec les modèles de comportement mécanique. Selon l'expression d'A.M.

Hasofer (auteur avec N.C. Lind de la première définition invariante d'un indice de fiabilité [HL74]), elles « apportent une précision supplémentaire » au concepteur.

Le concepteur projette des ouvrages, des structures, des machines dont les conditions de réalisation et de fonctionnement, tout au long de la durée de vie espérée, ne sont pas parfaitement connues : la conception est placée dans un univers imprécis et incertain qui peut, dans certains cas au moins, être modélisé par un aléa probabilisable.

Ce n'est pas la seule modélisation possible et certains suggèrent de faire appel aux ensembles flous ; elle n'est pas toujours possible : l'erreur grossière, voire la bêtise ne sont pas probabilisables !

En acceptant une approche par les probabilités, les méthodes de fiabilité en mécanique permettent de calculer des estimateurs de la fiabilité : probabilité notionnelle ou conditionnelle, indice de fiabilité, sensibilité de la défaillance à la description stochastique des données.

Trois champs d'application sont particulièrement visés :

- les ouvrages exceptionnels ou très novateurs pour lesquels l'expérience accumulée au cours des siècles est insuffisante.

Ce n'est pas un hasard si les premiers à exploiter le potentiel des méthodes fiabilistes furent les ingénieurs chargés de construire les plates-formes offshore ;

- les ouvrages et constructions tout à fait ordinaires dont la conception s'appuie sur des codes ou règlements dont l'évolution actuelle intègre la possibilité d'une calibration de coefficients partiels par les méthodes fiabilistes ;
- le suivi des ouvrages au cours de leur vie, qui fait souvent apparaître un état réel dégradé à la suite, par exemple, d'une fatigue entraînant une fissuration pour lequel la

stratégie d'inspection maintenance réparation peut être optimisée par la fiabilité.[1]

### 1.1.2. Une attitude nouvelle : vaincre des obstacles :

Un article déjà ancien [ASC83] soulignait dès 1983 tout l'intérêt des méthodes fiabilistes :

- elles 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 ;
- elles analysent les modes de défaillance et mesurent la fiabilité apportée par l'application cation des règlements ;
- elles permettent une répartition optimale des matériaux entre les différents composants d'une structure ;
- elles peuvent incorporer l'expérience acquise dans la conception par l'actualisation en fonction du retour d'expérience ;
- elles aident aux décisions de maintenance et de réparation dans un double objectif de sécurité et d'économie ;
- elles élargissent la maîtrise de la connaissance des incertitudes sur la réponse des structures.

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

L'article soulignait également les obstacles à leur mise en œuvre :

- inertiels : parce qu'elles demandent une attitude nouvelle, une remise en cause des habitudes de pensée et de travail.
- culturels : parce que les probabilités (principalement) et les statistiques (dans une moindre mesure) font plus partie du bagage du mathématicien qui peut douter que de l'ingénieur qui doit avoir des certitudes.
- philosophiques : parce qu'elles soulignent explicitement l'acceptation d'un risque qui n'est qu'implicite derrière la rassurante notion de coefficient « de sécurité » ; parce qu'elles exigent du jugement et de la décision.
- et ceux dus à un manque de conviction en raison du caractère novateur des développements, de la jeunesse d'outils encore insistants et manquant d'utilisateurs avertis.[1]

## 1.2. Fiabilité théorique en mécanique :

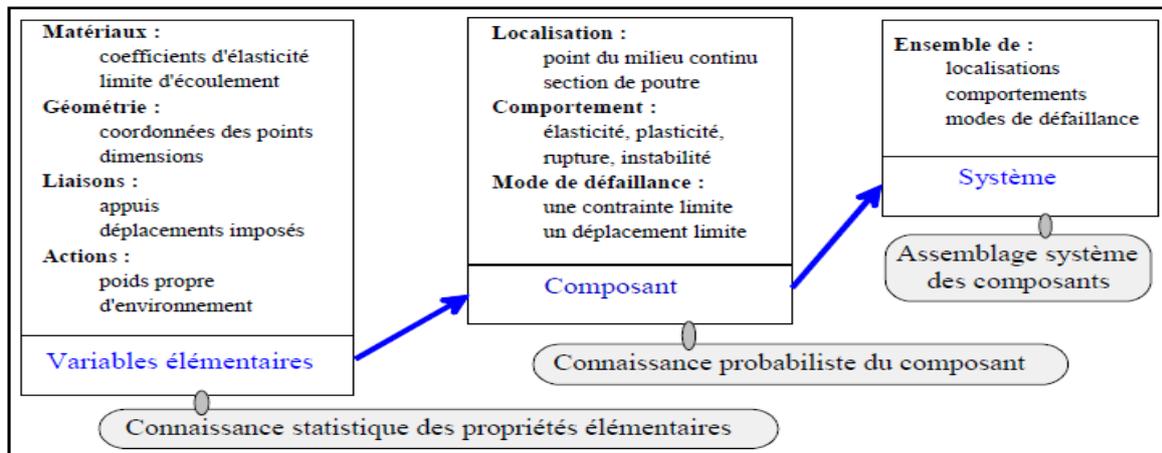


Fig1.1 — variables — composant — système.

### 1.2.1. Approche fiabiliste en mécanique :

Une approche fiabiliste en mécanique est souvent mise en œuvre dans le cadre des contrôles de qualité.

Ceux-ci permettent d'observer la dispersion de telle ou telle quantité, de rejeter des réalisations hors tolérance et de suivre leur variabilité.

Les statistiques en sont l'outil essentiel et les modélisations par variables aléatoires s'appuient sur un retour d'expérience.

L'approche fiabiliste du risque dans le dimensionnement, appliquée à des événements rares, ne permet pas (fort heureusement) un retour d'expériences sur la pièce ou le produit concerné. Elle n'est donc pas une prévision validée par un contrôle statistique.

Elle s'appuie tout d'abord sur une connaissance statistique de variables élémentaires (ou variables de base) entrant dans la modélisation mécanique : connaissance des propriétés des matériaux, de la géométrie, des liaisons et des actions.

La combinaison de variables élémentaires constitue un modèle mécanique complexe déterministe, elle s'applique en certaines localisations : chaque modèle localisé constitue un composant :

Un composant est constitué d'un élément géométrique  
(Composant physique) et de son comportement mécanique.

Celui-ci ne peut pas, généralement, faire l'objet d'une statistique des défaillances, c'est-à-dire des non-satisfactions de la performance attendue, il ne présente pas un fonctionnement binaire (en service ou en panne), il fonctionne le plus souvent en mode dégradé.

La défaillance met généralement en jeu une combinaison simple de composants complexes plutôt qu'une combinaison complexe de composants simples.

Cette dernière situation est plus fréquente en sûreté de fonctionnement.[1]

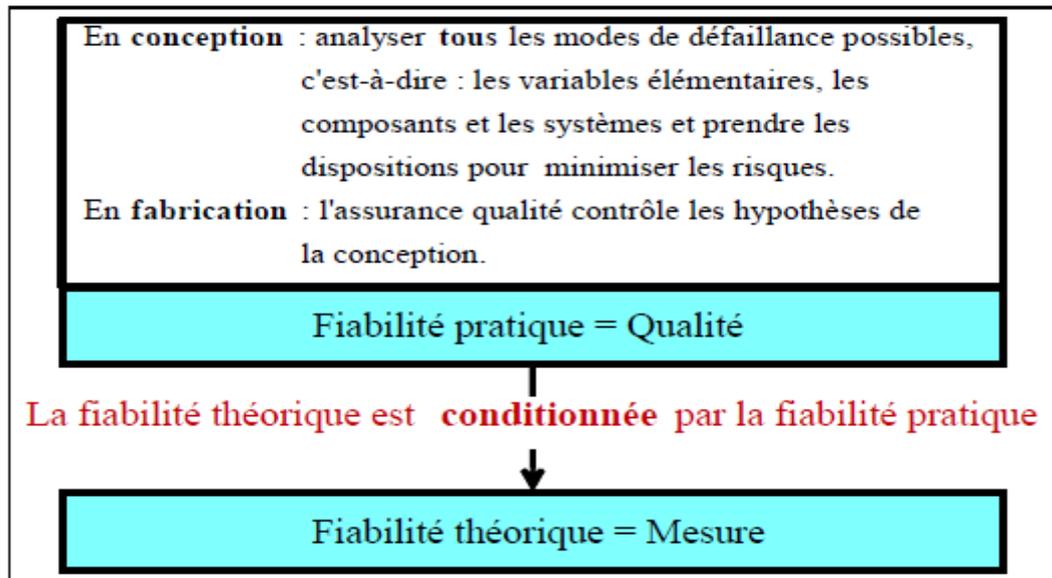


Fig1.2. — fiabilité pratique et fiabilité théorique.

### 1.2.2. Chaîne : variables - composant – système :

La chaîne : variable - composant - système est représentée sur la figure 1.1. Au niveau des variables élémentaires, il faut disposer d'une connaissance statistique minimale de tous les paramètres entrant dans la modélisation.

De celle-ci est déduite une connaissance probabiliste du composant et, enfin de l'assemblage des composants.

Il en résulte trois champs d'investigation ayant chacun leurs outils spécifiques :

- la modélisation stochastique des variables élémentaires du modèle mécanique, effectuée le plus souvent par l'analyse de données statistiques : ajustement de lois de distribution et estimation de leurs paramètres (moyenne, écart-type), évaluation de coefficients de corrélation entre variables.
- l'étude probabiliste de la défaillance des composants, en faisant appel à des méthodes de simulation, d'intégration ou d'approximation.
- l'étude probabiliste de la défaillance des systèmes (fiabilité système), en ayant recours soit à des méthodes de simulation, soit à des méthodes d'approximation (intégration multi normale).

### 1.2.3. Fiabilité théorique :

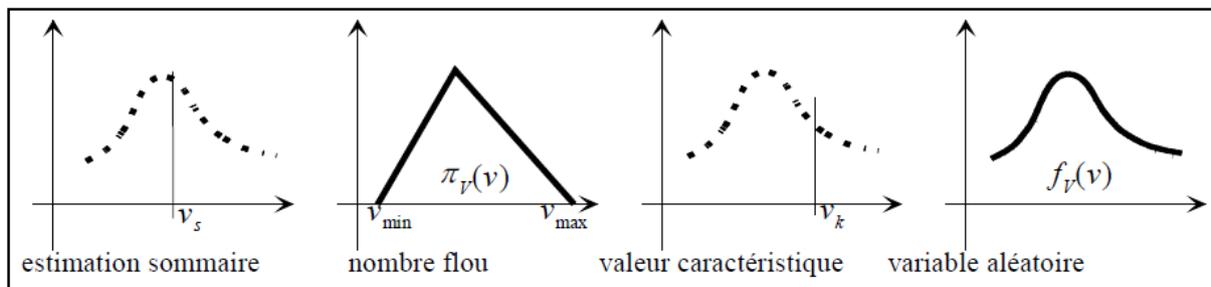
L'analyse d'une défaillance potentielle suppose (figure 1. 2) :

- en conception : d'examiner tous les modes de défaillance possibles, c'est-à-dire toutes les relations entre les variables élémentaires, les composants et les systèmes.

Cette analyse préalable est un acte essentiel car la simple identification d'une défaillance potentielle implique la mise en œuvre de dispositions pour minimiser les risques, et cela sans aucun calcul fiabiliste particulier.

Il ne sert à rien de consacrer des efforts importants sur une situation bien identifiée si une situation critique oubliée.

- en fabrication : de mettre en œuvre une assurance qualité qui contrôle le respect des hypothèses de modélisation des variables acceptées en conception et qui interdit les erreurs grossières.



**Fig1.3. — représentation des variables**

Une telle attitude est souvent dénommée fiabilité pratique, identique en fait à la qualité.

Celle-ci intervient aussi bien en conception qu'en fabrication. Ainsi, le dimensionnement des soudures en fatigue selon l'eurocode 3 suppose qu'elles soient effectuées selon des procédures bien établies.

La fiabilité théorique peut alors être mise en œuvre : elle recherche des mesures de la fiabilité, une probabilité qui ne peut être qu'une probabilité conditionnelle, en fonction d'une représentation idéale des données et des modèles.

La fiabilité théorique est conditionnée par la fiabilité pratique.[1]

### 1.2.4. Sur l'information disponible :

La modélisation des variables élémentaires nécessite de disposer d'une information toujours insuffisante (figure 1.3).

Il faut parfois se contenter d'une estimation sommaire relevant d'un jugement selon une expérience limitée :

la variable  $V$  est de l'ordre de  $v_s$ .

Une évaluation d'expert traduit une variable incertaine par un nombre flou. Sur un intervalle donné est associé, à chaque valeur de la variable, un degré de possibilité :

la variable  $V$  est comprise entre  $v_{\min}$  et  $v_{\max}$ , à  $V$  est associée la possibilité  $\pi_V(v)$ .

Un ingénieur utilise habituellement des valeurs caractéristiques généralement obtenues par majoration ou minoration d'une valeur supposée moyenne selon le sens nécessaire pour aller vers la sécurité :

la variable  $V$  est représentée par la valeur caractéristique  $v_k$ .

Enfin, un statisticien recherche si la variable peut être représentée par une distribution connue :

la variable  $V$  est une variable aléatoire de densité  $f_V(v)$ .

L'approche fiabiliste doit être compatible avec l'information disponible.

Elle apporte toujours un plus puisque le calcul probabiliste contient le calcul déterministe.

Il suffit de faire tendre l'écart-type vers zéro pour revenir à un calcul déterministe à la moyenne, mais pourquoi faudrait-il calculer à la moyenne ? Ce n'est pas ce qui est fait habituellement.

L'étude, cas par cas, du caractère aléatoire de chaque variable doit être complétée par celle des relations entre variables, traduite en première approximation (à l'ordre 2) par la corrélation. [1]

### 1.2.5. Variable aléatoire ou processus stochastique :

Notons par  $V(\omega)$  une fonction de l'aléa  $\omega$ , c'est une variable aléatoire.

Fixer  $\omega$  revient à tirer une réalisation de cette variable  $v = V(\omega = \omega_0)$ .

Considérons maintenant une fonction  $V(x, t, \omega)$  de l'espace, du temps et de l'aléa.

Une réalisation  $v(x, t, \omega_0)$  est une trajectoire de cette fonction pour un aléa fixé.

Le terme processus stochastique (ou processus aléatoire) désigne une telle fonction. Elle peut être indexée uniquement sur le temps (exemple : l'accélération d'un séisme en un point) ou sur l'espace (exemple : la répartition spatiale d'un module d'élasticité).

Dans ce dernier cas, on parle également de champ aléatoire.

Sans entrer dans la théorie des processus, notons qu'il est possible d'en effectuer une discrétisation.

Un vecteur  $\{V\}$  dont les composantes sont corrélées (matrice  $[\rho]$ ) est alors substitué au processus :

$$V(x, t, \omega) \longrightarrow \{V(t, \omega)\} = \left\{ \begin{array}{c} v_1(x = x_1, t, \omega) \\ v_2(x = x_2, t, \omega) \\ \vdots \\ v_n(x = x_n, t, \omega) \end{array} \right\}; \quad [\rho] = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & 1 & \cdots & \rho_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Une telle discrétisation conduit rapidement à des vecteurs de grande taille que les méthodes actuelles et les logiciels manipulent encore difficilement.

Elle introduit, pour les processus spatiaux, à la méthode des éléments finis stochastiques.

Fonction du temps, la plupart des actions relève d'une modélisation par des processus stochastiques indexés sur le temps.

Cependant, dans bien des cas, il est possible d'utiliser une distribution de valeurs extrêmes pour traduire le maximum (respectivement le minimum) d'une action pendant une période donnée. Considérons une variable aléatoire  $V$ , modélisant par exemple, la vitesse maximale du vent sur une année :

$$F_V(v) = \text{Prob}(V \leq v)$$

Est la probabilité que la vitesse maximale annuelle ne dépasse pas  $v$ . Au cours de  $N$  années successives, en raison de la lente évolution du climat, il est possible de considérer que les probabilités annuelles sont indépendantes et de mêmes fonctions de répartition. Si  $Y_N$  est la v.a. modélisant la vitesse maximale sur  $N$  années, il vient :

$$\text{Prob}(V_1 \leq y) \text{Prob}(V_2 \leq y) \dots \text{Prob}(V_N \leq y) = (F_V(y))^N = F_{Y_N}(y)$$

Le comportement asymptotique de  $F_{Y_N}(y)$  quand  $N \rightarrow \infty$  a été étudié pour diverses fonctions parentes  $F_V(v)$ . Il conduit à trois types de distributions dites à valeurs extrêmes :

Distributions de Gumbel, Fréchet et Weibull [Gum58], [MKL86].

Il est ainsi possible de représenter une action fonction du temps par une variable aléatoire.

La modélisation des données par des variables aléatoires ou des processus est une étape essentielle préalable à une analyse de fiabilité.[1]

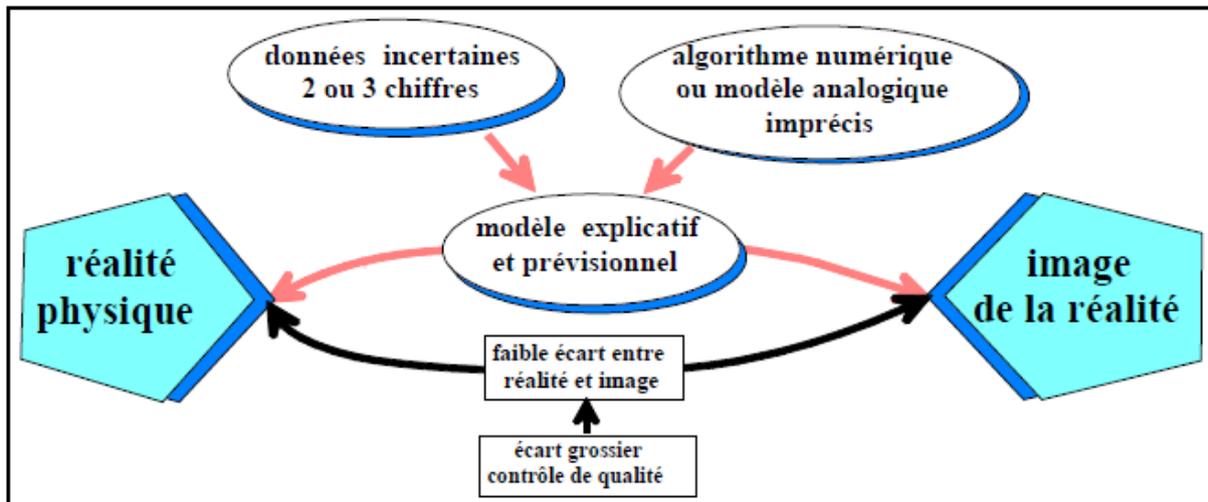


Fig1.4. — représentation approchée de la réalité physique

### 1.3. Modélisation mécanique :

#### 1.3.1. Modèle de représentation de la physique :

L'objet de la modélisation est de construire des modèles explicatifs et prévisionnels des phénomènes physiques, modèles théoriques et solutions numériques (figure 1.4).

Il existera toujours une différence entre un modèle de comportement d'une structure et la réalité physique.

Aucun matériau, aucune structure n'est tenue d'obéir aux lois promulguées par les hommes. Un écart de modélisation est normal et acceptable, des procédures de validation des modèles permettent de le maîtriser.

Il n'est pas totalement aléatoire et contient un biais systématique. En revanche, des erreurs grossières doivent être évitées par un processus d'assurance qualité garantissant une mise en œuvre et une utilisation conformes aux exigences annoncées. Deux questions sont alors à poser :

- ✓ le modèle représente-t-il bien la physique du phénomène ?

La modélisation mathématique doit expliquer et simuler la physique, la modélisation numérique doit contrôler la précision des résultats.

L'écart entre la physique et son image doit être faible, le contrôle de qualité empêchant un écart grossier.

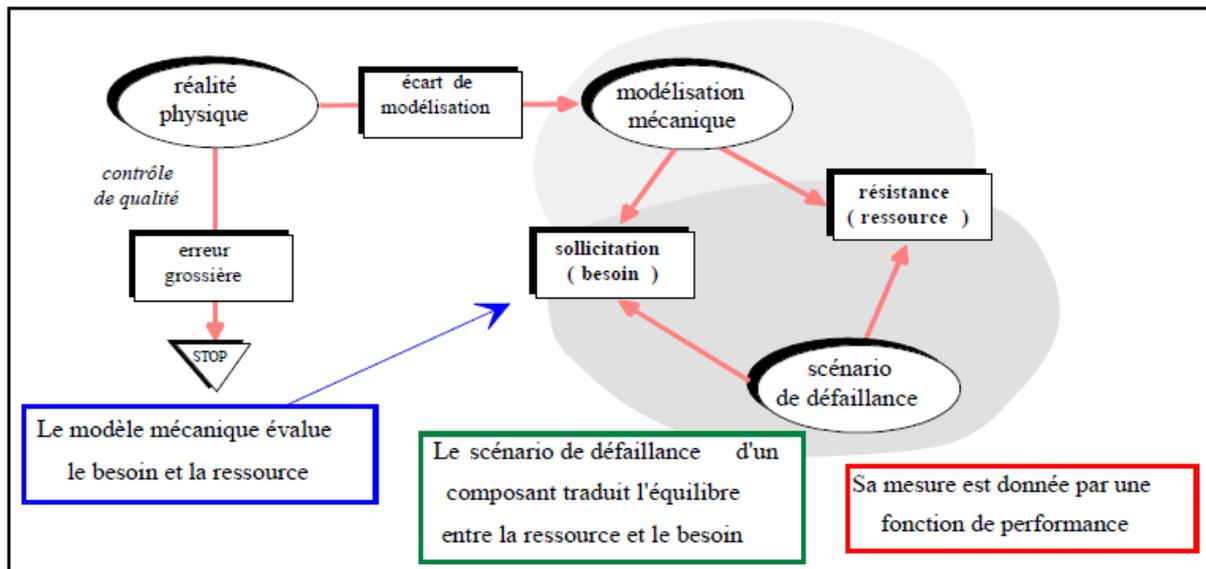
Il est donc nécessaire de disposer d'une modélisation mécanique validée : validation du modèle, de la solution numérique (densité du maillage éléments finis, tests de convergence...) et, mieux encore, de disposer d'une mesure du biais du modèle et d'une variable aléatoire d'écart.

- ✓ les incertitudes sur les données influencent-elles les variables du modèle ?

Les données introduites dans un modèle de calcul ne sont connues qu'avec quelques chiffres significatifs (2 ou 3 très souvent).

Elles présentent un caractère incertain et le concepteur doit oublier la certitude de ses habitudes et s'interroger sur la signification des valeurs qu'il retient lorsqu'il lance un code de calcul.[1]

### 1.3.2. Un équilibre entre ressources et besoins :



**Fig1.5. — scénario de défaillance en mécanique.**

Les modèles mécaniques permettent d'évaluer des besoins, ce sont les sollicitations prévues et des ressources nécessaires, ce sont les disponibilités des matériaux, leur résistance (figure 1.5).

L'analyse de fiabilité théorique s'appuie sur un scénario de défaillance combinant l'évaluation des sollicitations et des résistances souvent fonction des variables élémentaires.

Le scénario traduit l'équilibre entre la ressource et le besoin et il s'exprime par une fonction de performance.

Deux objectifs complémentaires sont alors à atteindre : estimer les paramètres (moyenne, écart-type...) et ajuster si possible une loi des variables de sollicitation ou de résistance ; estimer les probabilités d'occurrence de scénarios de défaillance, ces probabilités théoriques étant conditionnées par une fiabilité pratique de niveau suffisant, évitant toute erreur grossière.

Ce sont respectivement les objets de l'analyse de sensibilité fiabiliste et de l'analyse de fiabilité que de répondre à ces deux objectifs.[1]

### 1.3.3. Analyse de sensibilité fiabiliste :

Le modèle mécanique assure le passage entre des données d'entrée (variables de base) et des variables de sortie (fig.6).

Le problème est alors de calculer les paramètres statistiques des variables de sortie en fonction des paramètres statistiques des données d'entrée.

Une telle analyse constitue une analyse de sensibilité fiabiliste, caractérisant la sensibilité de la réponse à la variabilité de l'entrée.

Au premier ordre, une analyse de sensibilité déterministe consiste en un calcul de gradient autour d'un point alors qu'une analyse de sensibilité aléatoire recherche le rapport entre les coefficients de variation respectifs d'une variable de sortie et d'une variable d'entrée.

Deux méthodes principales sont utilisées [LGMM00] : la méthode de Monte-Carlo, qui procède par simulation, et la méthode des perturbations qui demande le calcul des dérivées de la matrice de rigidité et du vecteur des actions extérieures par rapport aux données aléatoires. La méthode de Monte-Carlo construit un échantillon dont on peut déduire les moments statistiques sans limitation d'ordre a priori. La méthode des perturbations est généralement limitée aux deux premiers moments.

La solution est relativement simple lorsque l'aléa (externe) ne porte que sur les actions et que le modèle est linéaire, elle devient beaucoup plus délicate à construire en cas d'aléa interne sur les paramètres d'état du système mécanique et de comportements non linéaires.

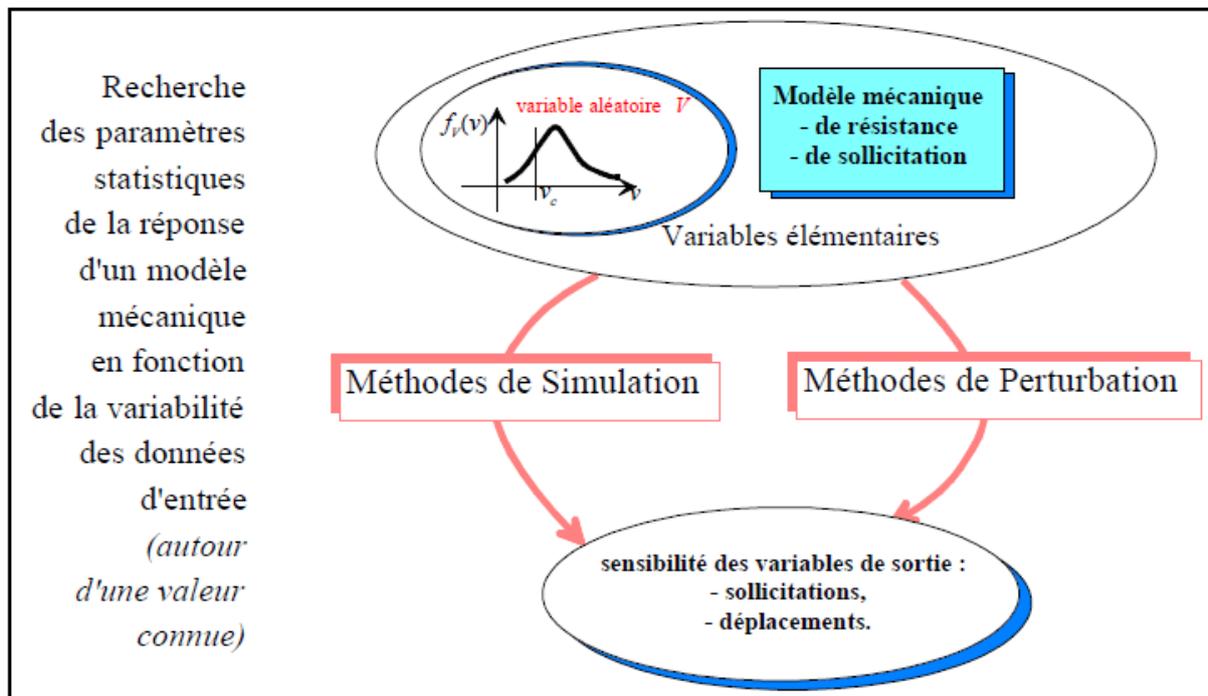


Fig1.6. — analyse de sensibilité fiabiliste.

Une analyse de sensibilité est en général conduite autour du point moyen de fonctionnement, et non autour d'un point particulièrement intéressant, le point de défaillance le plus probable.

Elle détermine si la variabilité d'une donnée est amortie ou au contraire amplifiée par le

modèle mécanique, avec les risques d'instabilité que cela entraîne.

En contexte dynamique, les méthodes de la dynamique stochastique sont maintenant bien adaptées à l'étude du processus réponse d'un système déterminé excité par un processus d'entrée, au moins s'il est Gaussien et stationnaire.

Dans l'application de la simulation, l'analyse de sensibilité repose sur la capacité de construire des échantillons statistiques synthétiques des données (qualité du générateur de nombres aléatoires, générateur de processus stochastiques) et sur la capacité d'identifier les échantillons des variables ou des processus de sortie.[1]

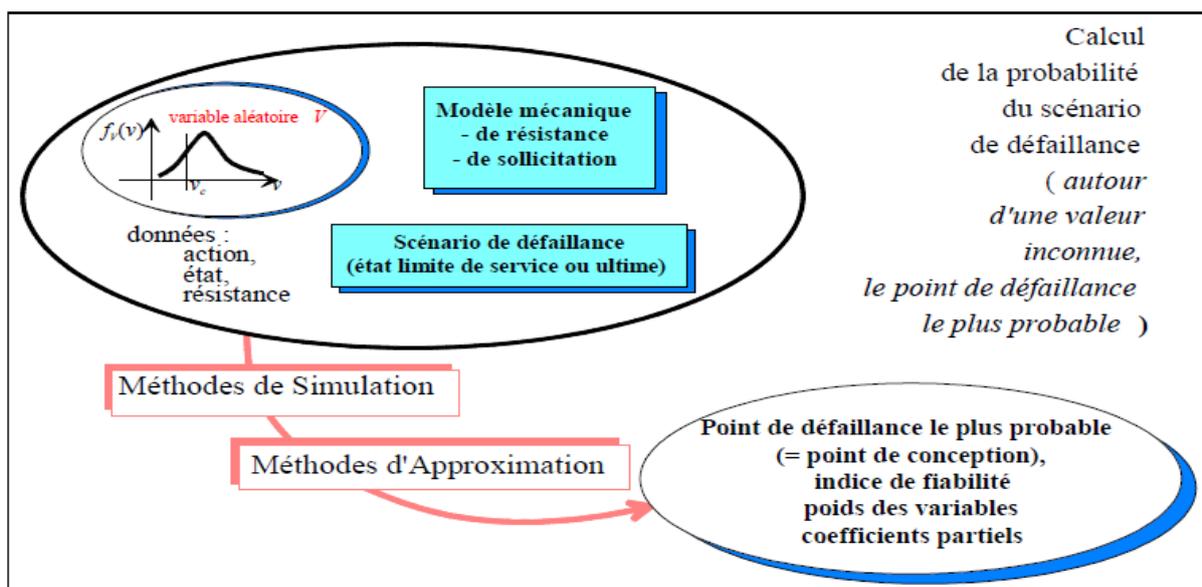
**1.3.4. Analyse fiabilité :**

L'analyse de fiabilité exige en plus un scénario de défaillance (fig.7). Il sépare les situations que le concepteur décide de considérer acceptables de celles qu'il décide de considérer inacceptables.

Selon le mot de notre collègue Vidal-Cohen : 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.

Leurs 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 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 d'état-limite de service illustrent ces deux types de situation.[1]



**Fig1.7. — analyse de fiabilité.**

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.

La fonction d'état-limite est donc la fonction de performance nulle, elle est exprimée en fonction des variables de base.

Celles-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.[1]

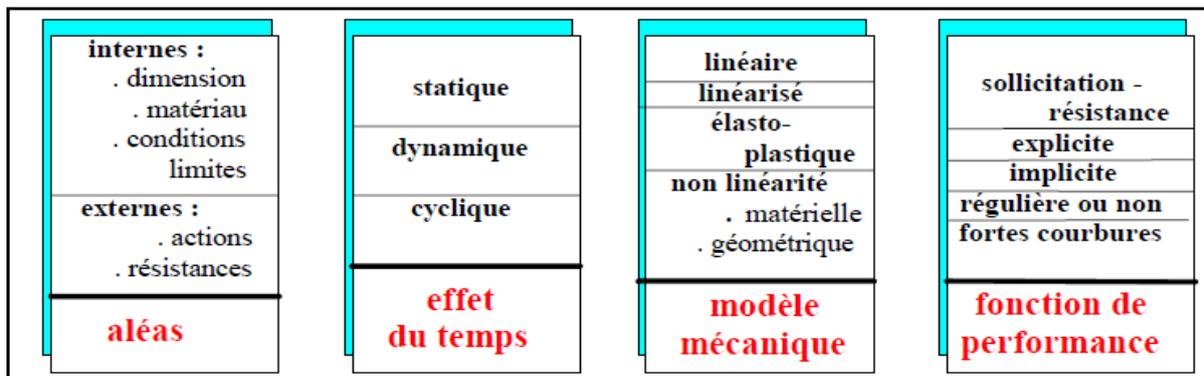


Fig1. 8 — complexité du couplage mécano-fiabiliste.

### 1.1. Généralité sur les réservoirs de stockage :

Le stockage est massif des liquides, pour les différents produits rencontrés dans l'industrie du pétrole, de la pétrochimie et de la chimie, s'effectue principalement dans les réservoirs métalliques, de construction soudée, installés à l'air libre reposant sur le sol (réservoirs aériens).

Ces réservoirs ont des capacités très variables. Elles n'excèdent pas quelques centaines de mètres cubes pour de nombreux produits chimiques, tandis que, dans le domaine pétrolier, les réservoirs de pétrole brut par exemple dépassent de beaucoup ces limites. C'est ainsi que, sur le parc de certains terminaux de chargement du moyen- orient, il existe des réservoirs de 240000m<sup>3</sup> et qu'il n'est pas rare, sur les terminaux de réception européens, de compter des réservoirs de 1000000 à 1500000m<sup>3</sup>.

Les produits stockés sont nombreux et différents. Pour chacun d'eux existe une capacité de stockage fonctionnellement et économiquement adaptée aux caractéristiques du stock envisagé. L'objet de l'article (**réservoirs métalliques pour stockage des liquides**) est d'examiner les divers types de réservoirs aériens employés et donner au lecteur une information suffisante pour lui permettre d'effectuer le choix le plus rationnel.[2]

### 1.2. Configuration des réservoirs de stockage :

Pour répondre à la grande variété des produits liquides industrielles à stocker, les constructeurs ont recours à des réservoirs de formes diverses et de conceptions différentes, étudiés pour s'adapter le plus rationnellement et le plus économiquement possible aux caractéristiques du produit à traiter.

La configuration d'un réservoir dépend de deux impératifs essentiels qui sont, d'une part, la tenue de la structure à la pression interne développée par le produit ou maintenue à un certain niveau pour faciliter l'exploitation.

La forme cylindrique est la plus courante en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de sa bonne résistance à la pression interne. Lorsque la pression interne est importante, on a recours à des formes sphériques mieux adaptées que les cylindres et qui permettent de réduire les épaisseurs de paroi.

- **réservoirs cylindriques verticaux :**

Appelés communément réservoirs, ils reposent directement sur le sol ou sur une fondation par l'intermédiaire d'un fond plat.

Ils sont habituellement équipés soit d'un toit fixe conique ou sphérique, soit d'un toit flottant qui repose sur le liquide et coulisse dans le piston formé par la robe du réservoir. Dans quelques cas assez rares, ces réservoirs sont de simples cuves à ciel ouvert, sans toit, la surface du liquide stocké étant alors directement exposée à l'atmosphère.

Lorsque ces réservoirs doivent supporter une légère pression, leur toit est généralement de forme sphérique et leur fond en périphérie peut être ancré sur une fondation circulaire en béton. Pour éviter ces ancrages et la fondation qu'ils impliquent, le fond plat peut être remplacé par un fond sphérique concave qui équilibre les effets de la pression sur le toit.

- **réservoirs cylindriques horizontaux :**

Souvent désignés par ballons, ils sont installés au-dessus du sol sur des berceaux supports. Leurs extrémités sont terminées par des fonds emboutis hémisphérique, triosphériques ou elliptiques. Ces récipients sont destinés aux stockages sous forte pression, mais leur emploi est limité en général à des **faibles capacités**.

Cependant, depuis 1975, l'utilisation de réservoirs cylindriques horizontaux de **grandes capacités** s'est développée en Europe pour répondre essentiellement à des problèmes de sécurité vis-à-vis de l'environnement. Ces stockages reposent le plus souvent directement sur le sol, sans fondation spéciale et sans berceau. Après construction, ils sont entièrement enfouis sous une couche de terre l'ordre du mètre qui constitue une protection autour de l'ouvrage en cas d'incendie ou d'explosion à proximité.

- **réservoirs sphérique :**

Appelés aussi **sphères**, ils sont généralement supportés par des poteaux disposés au niveau de l'équateur ou, quelquefois, par une jupe métallique ou un massif de béton placé sous l'hémisphère inférieur. Ces ouvrages sont parfaitement adaptés aux stockages sous forte pression et permettent la réalisation économique de grandes capacités.

- **réservoirs sphéroïdaux :**

Ils sont le plus souvent appelés **sphéroïdes**. Pour certains produits sous pression directement sur le sol préalablement préparé pour épouser la forme du réservoir. Cette formule de stockage n'est cependant pratiquement plus employée en raison du faible intérêt économique qu'elle présente en regard des difficultés de construction.[2]

### 1.3. Modes de stockage :

La géométrie des réservoirs dépend étroitement de la nature du produit stocké et de sa volatilité à la température de stockage. Cette volatilité étant connue, différents modes de stockage peuvent être envisagés. On peut les classer en fonction de la pression et de la température de fonctionnement du liquide stocké, compte tenu de la relation qui existe entre ces deux paramètres.

#### 1.3.1. Liquides volatils qui ne bouillent pas à température ambiante :

Leur point normal d'ébullition est supérieur à la température ambiante et leur tension de vapeur absolue à l'ambiant est inférieure à 1,013 bar. A température ambiante  $\theta_a$ , la pression effective au-dessus du liquide est donc nulle.

Le stockage s'effectue sous pression atmosphérique ou sensiblement atmosphérique à température ambiante (stockage libre)[2]

### 1.3.2. Liquides volatils qui bouillent à des températures inférieures ou égales à la température ambiante

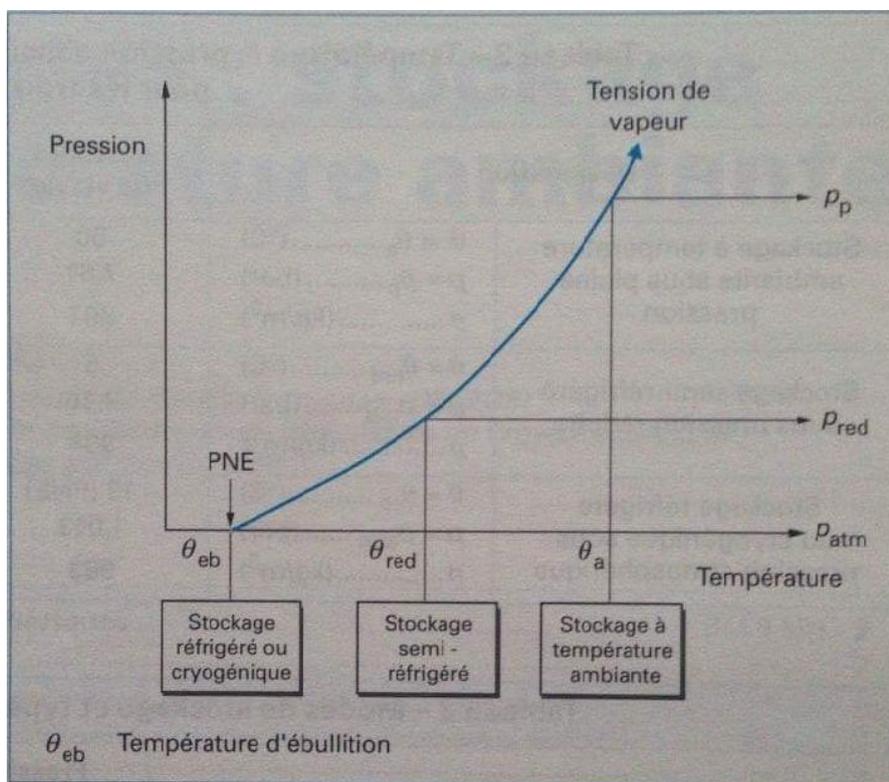
#### a) Généralités :

Leur point normal d'ébullition est inférieur ou égal à la température ambiante et leur tension de vapeur absolue à l'ambiante est supérieure ou égale à 1.013 bar. A température ambiante  $\theta_a$ , une pression effective existe donc au-dessus du liquide.

Trois modes de stockage peuvent être envisagés :

- le **stockage sous pleine pression**  $\rho_p$  à température ambiante,  $\theta_a$  (stockage libre) ;
- le **stockage semi- réfrigéré** sous pression  $\rho_{red}$  et température  $\theta_{red}$  réduites (stockage à température contrôlées) ;
- le **stockage réfrigéré ou cryogénique** (au PNE) sous pression atmosphérique  $\rho_{atm}$  et à température d'ébullition  $\theta_{eb}$  (stockage à température contrôlée).

Une illustration de ces trois modes de stockage est donnée par la figure 1 ainsi que par le tableau 2 pour quelques produits dont le PNE est inférieur à la température ambiante.



**Figure2.1.- les trois modes de stockage pour des liquides avec point normal d'ébullition (PNE) inférieur à la température ambiante**

**b) Stockages sous pleine pression :**

Ils sont réalisés avec des réservoirs directement exposés à l'air ambiant sans isolation thermique ; la température du produit stocké est voisine de la température du site et la pression d'exploitation est maximale.

**c) Stockage semi- réfrigérés :**

Ils fonctionnent sous pression d'exploitation réduite, obtenue par abaissement de la température du produit, et comprennent une isolation thermique pour limiter l'entrée de la chaleur.

Leur pression est limitée à une valeur intermédiaire comprise entre la pleine pression à température ambiante et la pression atmosphérique au PNE.

Il en résulte que les épaisseurs de parois des réservoirs sont moins importantes qu'au paragraphe 3.2.2 ; il est ainsi possible d'accroître l'importance des capacités unitaires.

**d) Stockage réfrigérés et cryogénique :**

Ils fonctionnent sous pression d'exploitation pratiquement nulle obtenue par abaissement de la température du produit jusqu'à son PNE.

Les épaisseurs de paroi sont ainsi plus faibles qu'au paragraphe 3.2.3, ce qui permet d'augmenter encore les capacités unitaires.

Ils sont pourvus d'un système isolant dimensionné pour maintenir le produit à basse température.

Par ailleurs, avec ce mode de stockage, la quantité de produit stocké est plus grande, car la densité des liquides est maximale au PNE.

Cette caractéristique constitue un avantage essentiel pour le transport sur grande distance.

Elle est à l'origine des chaînes de liquéfaction et de distribution de gaz naturel qui existent entre les pays producteurs d'outre-mer et les pays industriels.

Par convention, on désigne par **stockage réfrigérés**, les réservoirs dont la température maximale est supérieure à  $-60^{\circ}\text{C}$  car, jusqu'à cette température, les réservoirs peuvent être réalisés avec. [2]

Tableau 2.1.-température $\theta_a$ pression absolue $p$ et masse volumique $\rho$ de quelques produits pour les trois modes de stockage						
Désignation		Chlorure de vinyle	Ammoniac	Propane	Ethylène	Azote
Stockage à température ambiante sous pleine pression	$\theta = \theta_a \dots\dots\dots (c^\circ)$	50	50	50	Gazeux pour $\theta > 10c^\circ$	Gazeux pour $\theta > -147c^\circ$
	$P = P \rho \dots\dots\dots (bar)$	7.81	20.31	17.01		
	$\rho \dots\dots\dots (kg/m^3)$	861	563	452		
Stockage semi-réfrigéré sous pression réduite	$\theta = \theta_{red} \dots\dots\dots (c^\circ)$	5	5	5	-25	Gazeux pour $\theta > -147 c^\circ$
	$P = P_{red} \dots\dots\dots (bar)$	2.16	5.21	5.51	22.11	
	$\rho \dots\dots\dots (kg/m^3)$	938	632	523	430	
Stockage réfrigéré ou cryogénique sous pression atmosphérique	$\theta = \theta_{eb} \dots\dots\dots (c^\circ)$	-13 (PNE)	-33 (PNE)	-42 (PNE)	-104 (PNE)	-196 (PNE)
	$P = P_{atm} \dots\dots\dots (bar)$	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013
	$\rho \dots\dots\dots (kg/m^3)$	963	682	582	568	807

Modes de stockage		Pression de vapeur absolue $P$ et température de stockage $\theta$ du produit stocké	Exemples de produits stockés	Types de réservoirs recommandés
Stockage libre à température ambiante	A pression atmosphérique	$P=P_{atm}$ $\theta=\theta_a$ ambiante	eau, incendie et industrielle, eau potable	Curves ouvertes Réservoirs à toit fixe
		$P<0.1$ bar $\theta=\theta_a$ ambiante	Gazoles, fuels, huiles, bitumes, asphaltes, etc.	Réservoirs à toit fixe
		$0.1bar < P=P_{atm} < 0.75bar$ $\theta=\theta_a$ ambiante	Pétroles bruts, essences, carburants aviation, whi tespirit, kérozène, benzène, toluène, etc.	Réservoir à toit flottant (interne ou externe)
	Sous faible pression	$P=P_p < 1.5bar$ $\theta=\theta_a$ ambiante	Essence légère, pentane, etc	Réservoirs à toit fixe
	Sous forte pression	$1.5bar < P=P_p < 3bar$ $\theta=\theta_a$ ambiante	Essence légère, pentane, isopentane, etc.	sphéroïdes
		$1.5bar < P=P_p < 30bar$ $\theta=\theta_a$ ambiante	Butane, chlorure de vinyle, ammoniac, chlore, etc	Ballons et sphères
	Semi-réfrigéré (sous pression réduite)	$P_{atm} < P=P_{red} < 30bar$ $0^\circ c > \theta = \theta_{red} > -30^\circ c$	Propane, ammoniac, éthane, éthylène, chlore, etc	Ballons et sphères à simple paroi avec isolation

Stockage à température contrôlée par réfrigération	Réfrigéré (au PNE)	$P=P_{atm}$ $\theta=\theta_{cb}>-60^{\circ}C$	Butane, butadiène, chlorure de vinyle, ammoniac, etc	Réservoirs à simple ou à double paroi avec isolation renforcée
	Cryogénique (au PNE)	$P=P_{atm}$ $-60^{\circ}C>\theta=\theta_{cb}>-200^{\circ}C$	Ethane, éthylène, méthane, air, oxygène, ammoniac, etc.	Réservoirs à double paroi avec isolation renforcée
		$P=P_{atm}$ $-200^{\circ}C>\theta=\theta_{cb}>-273^{\circ}C$	Hydrogène, hélium, etc.	Réservoirs à double paroi avec isolation sous vide

Tableau 2.2.- modes de stockage et types de réservoirs en fonction du produit stocké

## 2. Réservoirs métalliques : stockage des liquides à température ambiante :

### 2.1. Réservoirs atmosphériques :

#### a) Généralité :

Ce sont des **réservoirs cylindriques verticaux à fond plat** que l'on peut différencier par le type de couverture.

Les **cuves ouvertes** (figure 2.2a) ne comportent pas de toit et leur emploi est limité aux quelques liquides que l'on peut, sans danger, pour leur qualité ou pour l'environnement, exposer à l'air libre.

Les **réservoirs à toit fixe** (figure 2.2b) sont pourvus d'un toit et permettent donc une meilleure conservation des liquides volatils, dangereux ou polluants.

Les **réservoirs à toit flottant** (figure 2.2c) comprennent une structure flottante, directement posée sur le liquide, que l'on installe soit dans une cuve ouverte, soit dans un réservoir à toit fixe. Ces réservoirs, en raison de leur remarquable capacité à réduire les évaporations, sont réservés au stockage des produits les plus volatils.

La **capacité maximale** de ces réservoirs atmosphériques peut être très importante. Elle est seulement limitée par la hauteur et le diamètre qu'il est possible de réaliser. Le choix de la **hauteur** est lié à la nature du terrain car les réservoirs reposent à même le sol. En tenant compte de la résistance moyenne des sols habituellement rencontrés, elle est le plus souvent comprise entre 14 et 22 m. Bien entendu, le **diamètre maximal** sera limité par la surface du terrain disponible, mais également par l'épaisseur maximale autorisée par les codes de construction pour la partie basse de la robe. Cette épaisseur est généralement fixée à 45 mm par la plupart des codes existants. Pour les réservoirs à toit fixe, le choix du type de toit peut également constituer une limitation du diamètre.[3]

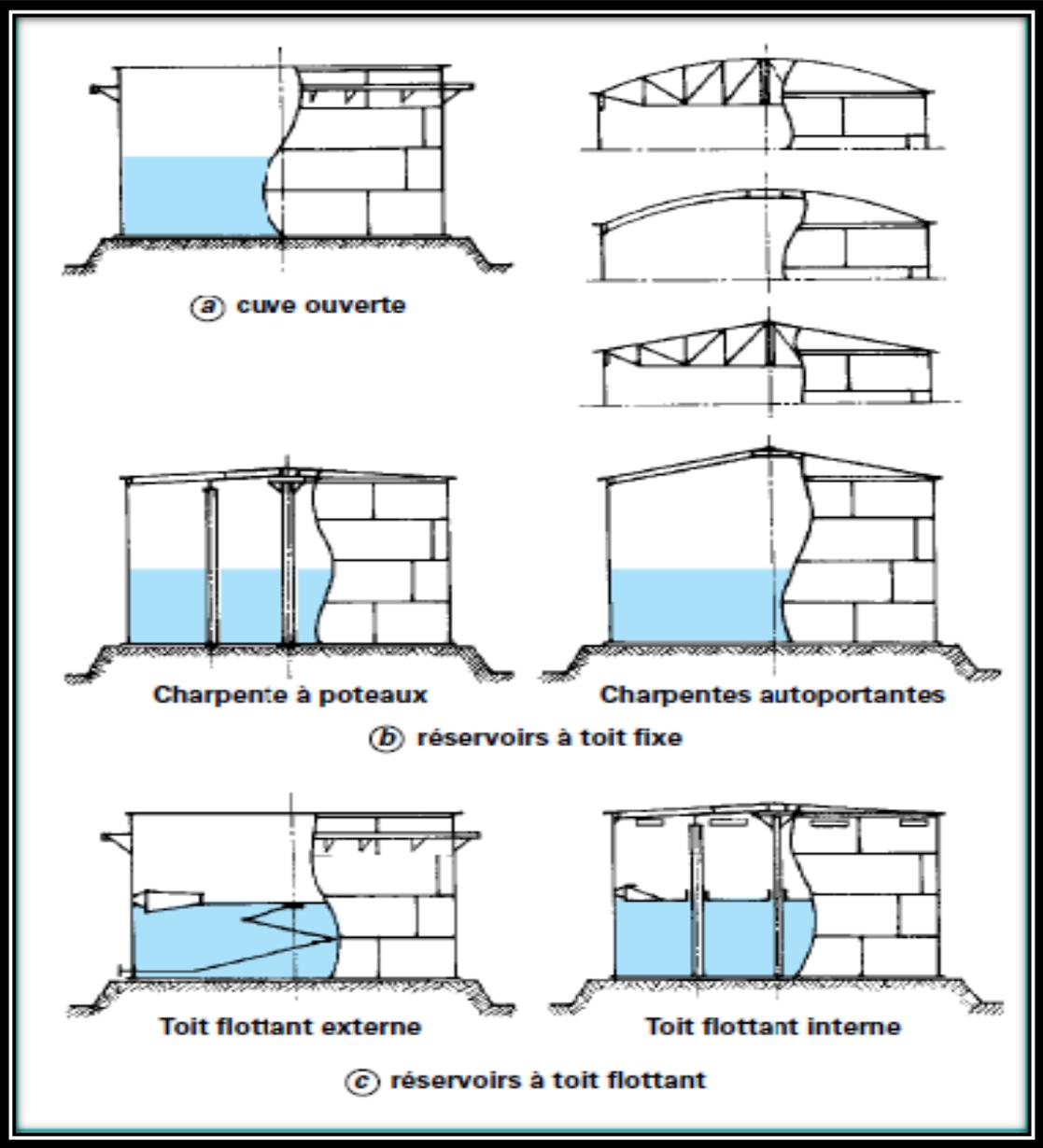


Figure 2.2. – Réservoirs atmosphériques

--	--

Hauteur de la robe	Volume et diamètre approximatifs	
	Re = 315 N/mm <sup>2</sup> (1)	Re = 335 N/mm <sup>2</sup> (1)
14 m	215 000 m <sup>3</sup> (Ø= 140 m)	245 000 m <sup>3</sup> (Ø= 150 m)
20 m	155 000 m <sup>3</sup> (Ø= 100 m)	175 000 m <sup>3</sup> (Ø= 105 m)
22 m	140 000 m <sup>3</sup> (Ø= 90 m)	155 000 m <sup>3</sup> (Ø= 95 m)

(1) Re limite d'élasticité minimale de l'acier.

**Tableau2.3 – Capacités maximales déterminées  
à partir des règles du CODRES, avec une épaisseur  
de robe en acier de 45 mm**

**b) Cuve ouverte :**

Ce type de réservoir est principalement destiné au **stockage d'eau incendie ou d'eau industrielle**.

Il ne convient pas pour le stockage d'eau potable, de produits pétroliers volatils ou de produits émettant des vapeurs polluantes.

Son utilisation est assez limitée, car les évaporations sur ce type de stockage sont très importantes. Il faut de surcroît tenir compte de la pollution importante du produit stocké (par l'atmosphère, les insectes et les oiseaux), en particulier pour les stockages de longue durée comme, par exemple, les réserves d'eau incendie.

**c) Fond :**

Il a une fonction principale d'étanchéité et assure le transfert de la charge verticale, produite par le liquide stocké, sur la fondation.

La partie centrale du fond n'est donc pas soumise à des contraintes mécaniques de tension. Par contre, la bordure périphérique, placée sous la robe et soudée à celle-ci, est fortement sollicitée par la pression hydrostatique horizontale qui agit au bas de la robe.

Le fond peut être plat ou légèrement conique avec une pente au moins égale à 0,2 % orientée vers le haut ou vers le bas.

Cette pente facilite l'élimination des dépôts en fond de bac, qui s'effectue par l'intermédiaire d'une tuyauterie traversant la robe et débouchant dans une cuvette installée au point bas du fond. Lorsqu'un tassement des fondations est attendu, la pente du fond est orientée vers le haut pour compenser les mouvements du terrain.

Le fond est réalisé à partir de tôles rectangulaires de 6 à 6,5 mm d'épaisseur minimale, soudées par recouvrement sur leur face supérieure (figure 2.3a).

En fonction des critères fixés par les codes de construction, une tôle annulaire de **bordure** peut être nécessaire sous la robe.

Elle est constituée de segments de tôles rayonnants, soudés bout à bout, en général plus épais que le reste du fond (figure 2.3b).[3]

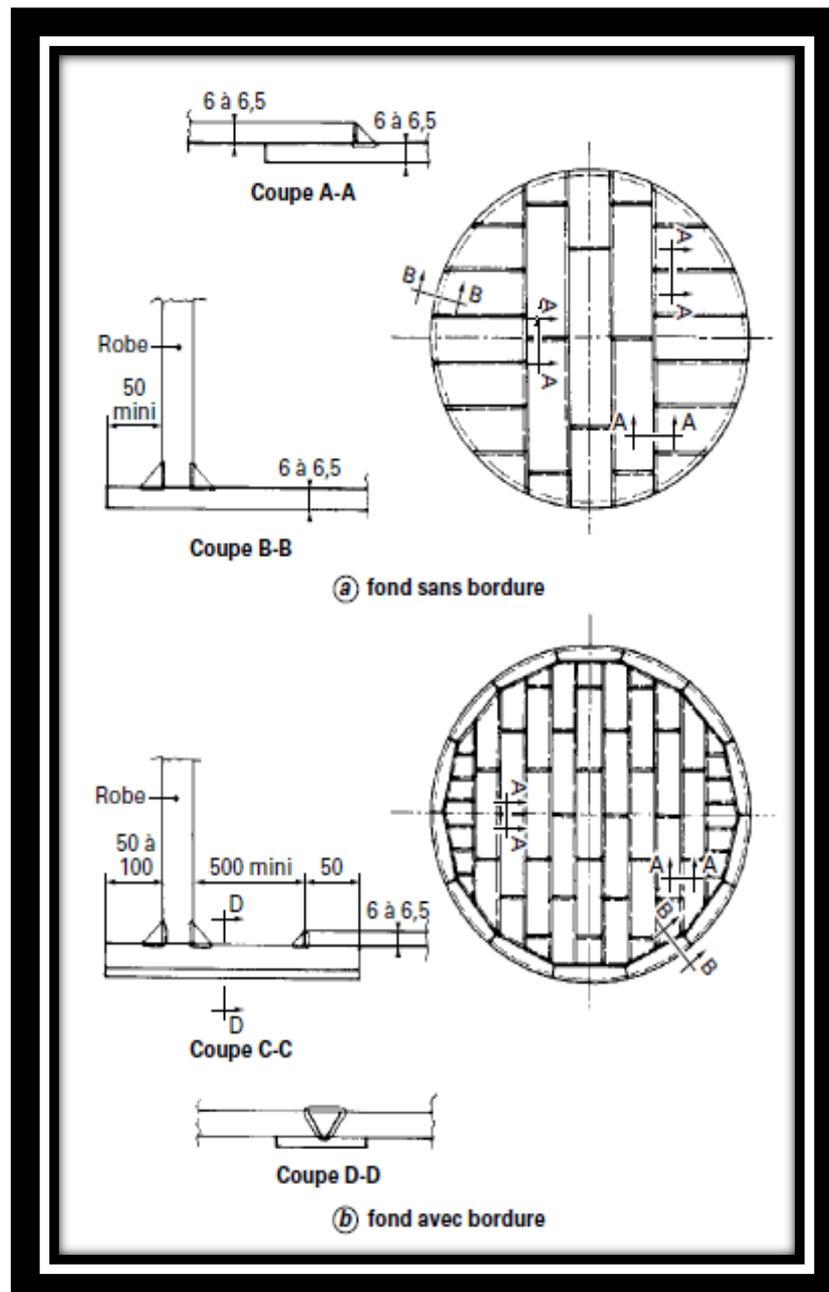


Figure 2.3. – Fond de réservoir

**d) Robe :**

Elle doit résister aux contraintes développées par la pression hydraulique du liquide stocké.

Elle est constituée de rangées de tôles rectangulaires (de longueur L) superposées, appelées **viroles**, qui sont soudées bout à bout.

Les joints verticaux de ces tôles sont généralement décalés, à chaque changement de virole, du tiers de leur longueur (figure 2.4a).

L'**épaisseur minimale** de chaque virole est calculée à partir de formules simples définies par les codes de construction.

Sa valeur dépend des dimensions de la cuve, de la masse volumique du produit stocké, des caractéristiques mécaniques des aciers employés, des coefficients de sécurité imposés par le code, de la température d'étude et de la surépaisseur de corrosion retenue.

L'**épaisseur maximale** autorisée par la plupart des codes de construction est limitée à 45 mm. Par ailleurs, pour des raisons de construction, ces codes précisent également une épaisseur minimale de robe comprise entre 5 et 10 mm suivant le diamètre du réservoir. La liaison de la robe sur le fond ou sa bordure s'effectue par une double soudure d'angle (figure 2.2).

Cet **assemblage** est très sollicité par la pression hydrostatique et les mouvements de rotation de la robe qui en découlent.

Il doit donc être considéré comme un **détail important** de la construction :

**a) Poutre raidisseuse et raidissage de robe :**

En l'absence de toit, la partie haute de la robe doit être renforcée par une poutre raidisseuse, pour conserver sa rotondité sous l'action du vent.

Cette poutre est placée en principe à un mètre du sommet.

Quand elle est assez large, elle est utilisée comme passerelle de circulation autour du réservoir.

Elle est souvent constituée de segments de tôles pliés formant sur sa partie extérieure un polygone régulier (figure 2.3b).

Un raidissage intermédiaire de dimension beaucoup plus modeste, peut être aussi nécessaire sur la robe, entre la poutre supérieure et le fond (figure 3c), pour assurer une résistance correcte au cloquage local de la paroi cylindrique soumise à la pression dynamique du vent.

On limite ce raidissage, ou on le supprime, en augmentant légèrement l'épaisseur des viroles les plus minces.

Lorsqu'il subsiste, il est réalisé par un ou plusieurs anneaux en profilés cintrés ou par de petites poutres en tôle pliée comme la poutre au vent supérieure.[3]

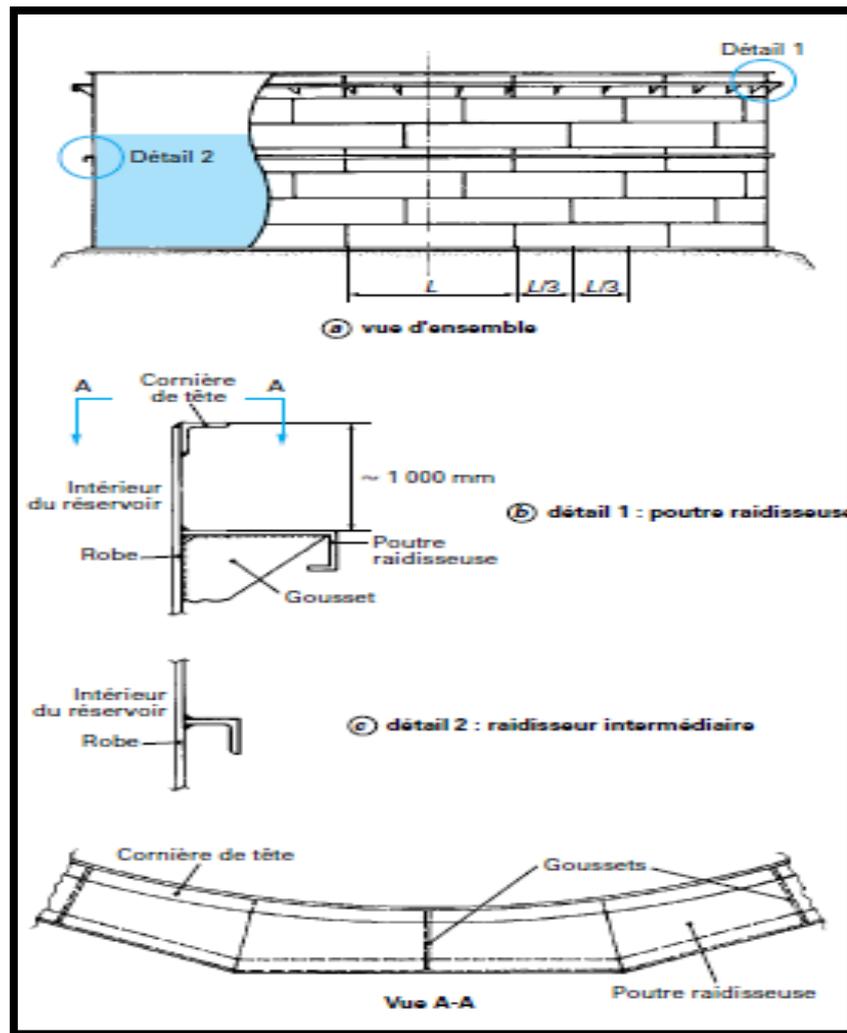


Figure 2.4 – Cuve ouverte

L'action horizontale d'ensemble du vent, agissant sur la structure, peut aussi nécessiter l'installation de boulons d'ancrage, à la base de la robe. Ils ont pour fonction de s'opposer au soulèvement du fond, lorsque le poids propre en pied de robe n'est pas suffisant pour assurer l'équilibre de l'ouvrage. Lorsqu'ils sont nécessaires, ces ancrages sont répartis à intervalles réguliers autour du réservoir sur des chaises soudées à la robe. La fondation du réservoir doit alors comporter sur sa périphérie un anneau de béton, de section suffisante pour s'opposer aux efforts de soulèvement repris par chaque ancrage.

Les effets d'un séisme peuvent également imposer la mise en place de boulons d'ancrage, mais aussi le renforcement de l'épaisseur des viroles basses et de la bordure de fond. Les vérifications pour ce cas d'étude sont clairement exposées dans l'appendice E du code de construction API-650 édité par l'American Petroleum Institute.[3]

## 2.2. Réservoirs à toit fixe :

### 2.2.1. Généralité :

Le **stockage des produits peu volatils et à faible tension de vapeur** est réalisé dans des réservoirs dont la partie supérieure est obturée par un toit fixe. Il est ainsi possible d'assurer plus facilement leur conservation et d'empêcher leur contamination par les agents extérieurs.

D'une manière générale, il s'agit de produits dont la tension de vapeur absolue à température ambiante est inférieure à 0,1 bar ou dont le point d'éclair est supérieur à 55 °C.

Les produits les plus lourds sont à l'état pâteux à température ambiante.

Ils nécessitent l'installation d'un système de réchauffage permanent, placé sur le fond des réservoirs, pour les maintenir suffisamment liquides et permettre ainsi leur transfert.

Dans ce cas, un calorifuge est prévu sur la robe et, suivant la température de réchauffage, sur le toit du réservoir.

- Le **fond** et la **robe** de ces réservoirs sont du même type que sur les cuves ouvertes. Cependant, la présence du toit fixe assure une rigidité suffisante au sommet de la robe qui permet d'éviter l'installation d'une poutre raidisseuse.
- Les toits sont de forme conique ou sphérique. Ils sont étudiés pour supporter une surcharge externe d'au moins 120 daN/m<sup>2</sup> correspondant aux effets combinés d'une charge temporaire (neige et dépression interne). La tôle de ces toits est réalisée à partir de tôles rectangulaires de 5 mm d'épaisseur, soudées entre elles par recouvrement sur leur face supérieure. La tôle est indépendante de la charpente et il n'y a pas de liaison par soudure entre ces deux éléments du toit.

On range les toits fixes en deux catégories : les **toits supportés** et les **toits autoportants** avec ou sans charpente (figure 2.4b).[3]

### 2.2.2. Réservoir à toit fixe supporté :

Les toits fixes supportés ont un profil conique assez plat avec une pente recommandée de 1/16 ou 1/12, notamment lorsque le toit est calorifugé.

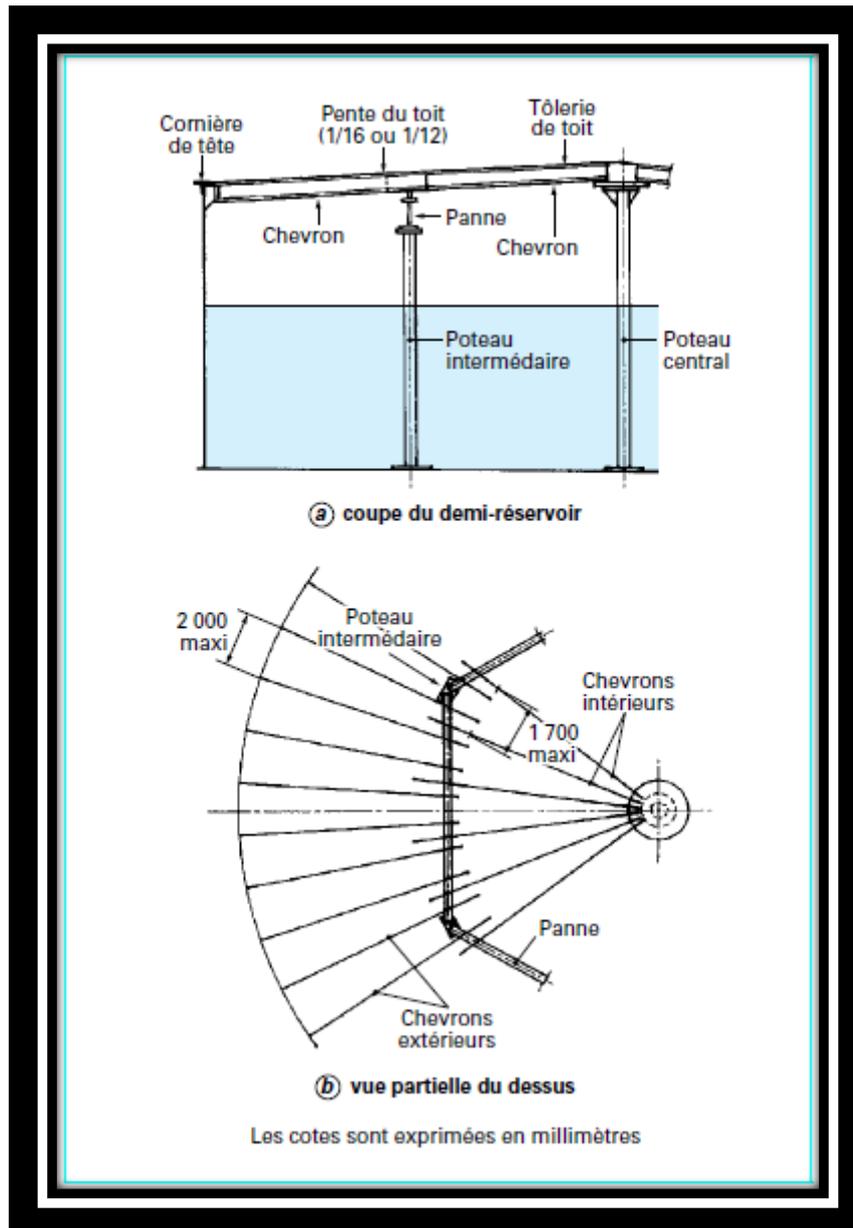
Ces toits sont constitués d'une charpente supportée par un ou plusieurs poteaux, en tubes ou en profilés, qui s'appuient sur le fond de l'ouvrage.

Les tôles du toit reposent sur des chevrons rayonnants qui prennent appui au centre du réservoir sur le poteau central, en périphérie sur la robe, et pour les réservoirs de diamètre supérieur à 25 m, sur des poteaux intermédiaires. Ces derniers sont disposés sur des cercles concentriques et sont reliés en tête par des pannes droites sur lesquelles viennent se poser les chevrons (figure 2.4).

L'espacement entre ces chevrons n'excède pas, selon les codes, 1,7 m, sauf sur la robe où il peut être porté à 2 m.

Les charpentes à poteaux sont reconnues comme des structures économiques car leur conception permet un montage simple sur le site.

Ce type de charpente peut être employé sur les plus grands réservoirs. Il n'est, en effet, pas limité en diamètre car il est toujours possible, pour l'agrandir, d'ajouter une rangée supplémentaire de poteaux, de pannes et de chevrons.[3]



**Figure 2.5 – Toit fixe supporté**

Les réservoirs avec toit sur charpente à poteaux sont étudiés pour une **surpression** et une **dépression internes** n'excédant pas respectivement + 5 et – 2,5 mbar. Cette faible pression interne n'entraîne aucun soulèvement de la robe et ces réservoirs ne comportent donc aucun ancrage, sauf lorsqu'ils sont nécessaires pour la tenue au vent ou au séisme de la structure.

### 2.2.3. Réservoir à toit fixe autoportant :

Les toits fixes autoportants sont soit coniques avec une pente de 1/5 ou 1/6, soit sphériques avec rayon de courbure compris entre 0,8 et 1,5 fois le diamètre du réservoir.

La charpente de ces toits est constituée d'éléments porteurs rayonnants, réalisés par de simples chevrons ou par des fermes métalliques. Ces éléments sont fixés en leur centre sur un anneau formant clef de voûte et prennent appui en périphérie sur le sommet de la robe, sans

l'intermédiaire de poteau (figure 2.5a). L'écartement des chevrons ou des fermes le long de la robe est compris entre 2 et 2,5 m.

On limite, en général, l'utilisation des charpentes à chevrons à des réservoirs de 25 m de diamètre pour les toits coniques et de 60 m pour les toits sphériques, tandis que les charpentes à fermes sont employées jusqu'à 60 m de diamètre quel que soit le profil du toit.

Les charpentes à chevrons sont de conception plus simple et plus économique.

Les réservoirs de diamètre inférieur à 20 m sont souvent construits avec des toits autoportants sans charpente.

Dans ce cas, l'épaisseur des tôles de toit doit être calculée à partir des formules précisées par les codes de construction.

On limite, en général, cette épaisseur à 9,5 mm de manière à conserver un assemblage par recouvrement des tôles (figure 2.5b).

La pente des toits coniques peut être supérieure à 1/5, mais l'angle formé par les génératrices du toit et un plan horizontal ne doit pas dépasser  $37^\circ$ . [3]

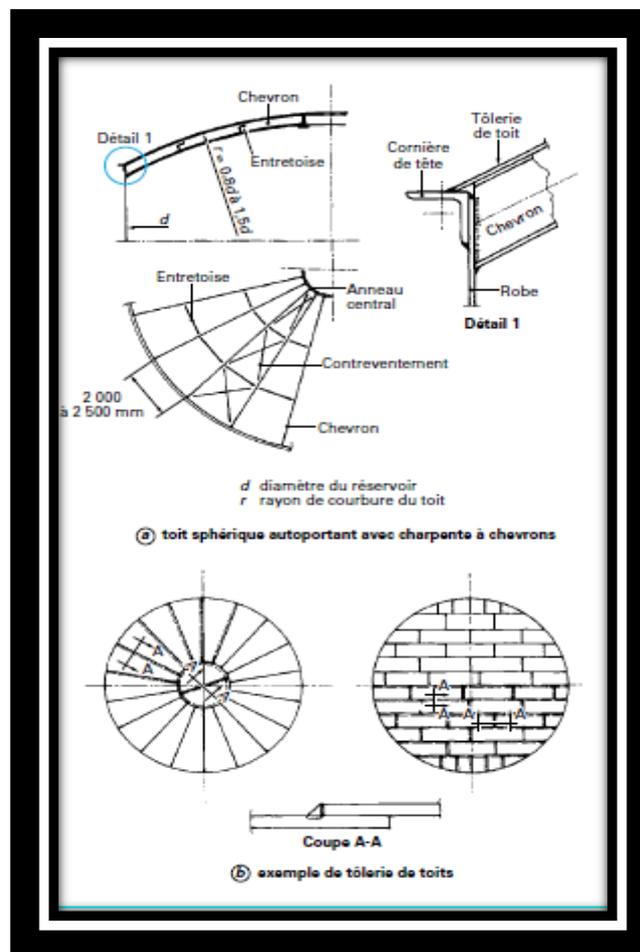


Figure 2.6 – Toit fixe autoportant

La surpression **et dépression** internes d'étude retenues pour les réservoirs à toits autoportants sont en général supérieures à celles des toits supportés en raison du profil plus profond de ces toits.

Leurs valeurs sont souvent respectivement fixées à + 25 et - 5 mbar.

On remarque que les toits sphériques présentent une meilleure tenue sous pression interne et qu'ils conviennent bien pour les réservoirs de grand diamètre.

En pratique, on limite la pression d'étude à une valeur qui permet d'éviter le soulèvement de la robe et, par conséquent, l'installation d'ancrages.

Ces derniers peuvent cependant être nécessaires pour éviter le renversement de la structure sous l'action du vent ou d'un séisme.

Dans ce cas, et lorsque cela est possible, il est recommandé de modifier les proportions du réservoir, jusqu'à ce que la structure soit stable. La mise en place d'ancrages est en effet coûteuse en raison de la nécessité d'une fondation d'un poids suffisant pour équilibrer le soulèvement.[3]

#### **2.2.4. Pertes par respiration et remplissage :**

Malgré la protection que constitue le toit, les réservoirs à toit fixe ne sont pas les capacités les mieux adaptées pour la conservation des produits stockés.

C'est d'ailleurs pour cette raison que ce type de réservoir n'est plus accepté par les autorités responsables de la protection de l'environnement pour le stockage des liquides volatils à tension de vapeur non négligeable. Les réservoirs à toit fixe sont, en effet, à l'origine de pertes importantes de produits provenant de deux phénomènes distincts que sont la respiration de la capacité et les mouvements de produits.

Un réservoir à toit fixe n'est jamais complètement rempli de liquide et il existe toujours au-dessus du produit stocké un espace gazeux, composé d'un mélange d'air et de vapeur émise par le liquide.

Cet espace de vapeur est au moins égal au volume du toit, car le niveau maximal de liquide autorisé dans le réservoir est limité au sommet de la robe.

- Au cours de la journée, lorsque le soleil chauffe le réservoir, le liquide s'évapore et la pression dans le réservoir s'élève. Les réservoirs à toit fixe ne sont conçus que pour de faibles surpressions de l'ordre de 5 à 25 mbar.
- Ces valeurs ne permettent pas de contenir, sur une journée, l'expansion provoquée par cet échauffement et le mélange air-vapeur doit être évacué dans l'atmosphère au travers des événements de toit.

Tout au contraire, le soir et durant la nuit quand la température baisse, les vapeurs se condensent et de l'air extérieur doit être admis dans le réservoir, par les événements de toit, pour éviter que la structure ne soit soumise aux effets d'une dépression interne.

Cet air se mélange ensuite, jusqu'à saturation, avec la vapeur émise par le liquide et, au cours de l'expiration du jour suivant, une nouvelle quantité de produit sera expulsée dans l'atmosphère.

Le même phénomène de respiration est produit par les variations de la pression atmosphérique. Chaque fois que cette respiration se manifeste, les pertes augmentent et le volume du liquide conservé se réduit.

Ces pertes sont appelées **pertes par respiration** (figure 2.7a).

- Lorsque l'on soutire du liquide, de l'air est également aspiré dans l'espace vapeur, et un nouvel équilibre du mélange air-vapeur se crée en provoquant une évaporation du liquide qui conduit à une réduction du volume stocké.

Par ailleurs, quand on remplit le réservoir, le mélange riche air-vapeur est expulsé à l'extérieur par les événements et perdu dans l'atmosphère.

Les pertes associées à ces mouvements de produit sont appelées **pertes par remplissage** (figure 2.7b).[3]

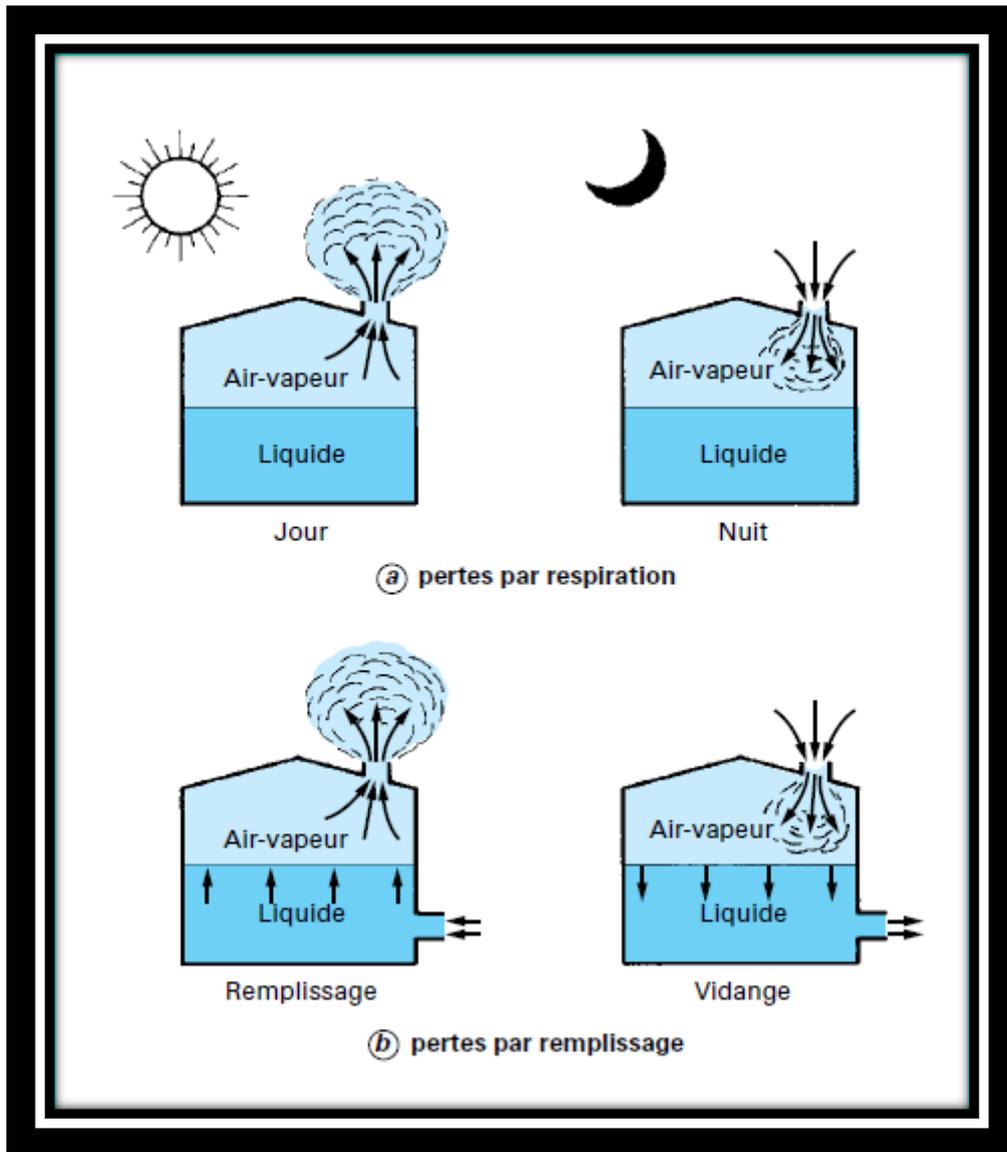


Figure 2.7 – Réservoirs à toit fixe : pertes de produit

### Conclusion du chapitre I

Dans ce chapitre, un état de l'art est donné sur la production et l'utilisation des réservoirs de stockages des fluides et les différents modes de stockage.

### 1. introduction :

Le stockage des produits peu volatils et faible tension de vapeur (inférieur à 0.1 bar) est réalisé dans des réservoirs où la partie supérieure est recouverte d'un toit fixe.

Ce dispositif permet d'empêcher leur contamination par des agents extérieurs (pluie, poussière,..). le fond et la robe du réservoir sont du même type que les cuves ouvertes.

Cependant, la présence du toit fixe assure une rigidité suffisante au sommet de la robe qui permet d'éviter l'installation d'un raidisseur.

Ce type de réservoir consiste en une enveloppe cylindrique en acier (figure3.1), avec un toit attaché en permanence et de forme variable (cône, dôme ou plat) .

L'inconvénient de ce type de stockage est que le toit reste fixe quels que soient les changements de température, de pression ou de niveau du liquide.[6]



**Figure3.1.réservoir à toit fixe (bac de stockage des produits énergétiques)**

## 2. Dimensionnement d'un réservoir de stockage :

### 2.1. Définition des hypothèses :

La définition des hypothèses de calcul passe par :

➤ Géométrie du réservoir :

La description de la géométrie du réservoir se fait à partir du cahier des charges client ou à partir d'un besoin client bien exprimé qui contient un plan de détail du réservoir ou simplement à partir des données géométrique voulu.

➤ Conditions du site :

Selon l'emplacement du réservoir, il y'a des normes de vent et de séisme relatif à chaque pays et à chaque région qui définissent la zone, la pression du vent et du séisme et la classe de l'ouvrage.

➤ Conditions de service :

Les conditions de service englobe la densité du produit, la température, la pression, la dépression, la surpression qui émanent de l'exploitant final.

### 2.2. Choix de matériaux :

Le matériau utilisé est généralement imposé par l'utilisateur final .Dans tout cas la confirmation du choix ou la proposition d'un nouveau matériau est indispensable suivant les normes en vigueur : les codes de calcul des réservoirs atmosphériques API 650, CODAP ou les normes des matériaux EN10025 OU EN 10028.

Les conditions des tôles d'acier destinées à être utilisées pour la construction de réservoir répondants à la norme API650, sont :

Les choix des matériaux dépendant essentiellement des paramètres :

- ❖ Epaisseurs des tôles.
- ❖ Température théorique du métal.

Ils ne peuvent pas être utilisés que s'ils subissent avec succès les essais tels que :

1. L'analyse de vérification de la composition chimique.
2. Les essais de caractéristique mécaniques.

Tous les métiers destinés dans la construction du bac devront être examinées avant leur mise en œuvre afin de détecter autant que possible les défauts pouvant nuire à la sécurité du réservoir.

### 2.3. Définition des codes de calcul :

C'est une étape importante du dimensionnement, parfois l'exploitant ou le constructeur à ses préférences par rapport au choix de la norme de calcul, sinon l'application :

- Choix du code de calcul du réservoir : CODAP, ASME, API.
- Choix de calcul des normes de séisme et du vent adéquates.
- Choix du code de calcul des événements et des oreilles de levage s'ils ne sont pas intégrés dans le code de calcul choisis.
- Trouver la réglementation adéquate pour l'installation des dépôts d'hydrocarbure.

### 2.4. Calcul des épaisseurs des viroles :

Pour calculer les épaisseurs des viroles il faut définir le nombre des viroles, les limites admissibles des viroles, les hauteurs du liquide pour chaque virole et les épaisseurs des viroles.

**2.5. Calcul de l'épaisseur de la bordure annulaire :**

Deux informations sont calculées, L'épaisseur minimale et la Largeur de la bordure annulaire.

**2.6. Calcul de la charpente du toit :**

Dans cette partie nous calculons le rayon de courbure du toit, le nombre de chevron du toit et nous entamons la vérification des déformations et la vérification de la résistance du toit.

**2.7. Vérification Au Séisme :**

Après avoir choisi la norme adéquate nous procédons au calcul du poids, au calcul du coefficient sismique d'accélération, au calcul des moments de renversement, au calcul de l'effort sismique et à la vérification de la résistance au renversement.

**2.8. Vérification Au vent :**

Après avoir choisi la norme adéquate nous procédons au calcul de la vitesse maximale, au calcul du moment de renversement, au calcul de la stabilité au vent, au calcul de la pression de soulèvement et au calcul des raidisseurs intermédiaires le cas échéant.

**2.9. Calcul des oreilles de levage****2.10. Calcul des événements ou des soupapes de sécurité :**

Ce calcul se fait vis-à-vis de la dépression et de la surpression.

**2.11. Calcul des réchauffeurs de masse :**

Le réchauffeur de masse est un serpentín qui est conçu pour apporter au fluide de stockage la puissance calorifique nécessaire pour compenser les déperditions et maintenir une température donnée.

**2.12. Calcule le circuit de la mousse et de l'eau des réservoirs :**

Pour assurer la protection contre le risque d'incendie du réservoir ou de l'ensemble dépôt d'hydrocarbure il faut dimensionner le circuit incendie et déterminer les équipements anti-incendie nécessaires à l'aide de dimensionnement hydraulique.

**2.13. Calcul de la cuvette de rétention :**

Pour une bonne implantation du réservoir, le calcul de la cuvette de rétention est nécessaire afin de limiter la propagation du feu, de drainer les fuites inattendus.[5]

**2.14. virole, conception de grands réservoirs de stockage :**

La majorité des réservoirs et récipients sont cylindriques, car un cylindre a une grande résistance structurelle et est facile à fabriquer, plusieurs types de contraintes peuvent se produire dans une coque cylindrique.

Ceux-ci peuvent être reconnus comme :

- contrainte longitudinale résultant de la pression au sein du récipient
- contrainte circonférentielle résultant de la pression à l'intérieur du récipient
- contraintes de soudure résiduelles résultant du chauffage localisé souligné résultant de charges superposées telles que le vent, la neige et la glace, équipement auxiliaire, et la charge d'impact.
- souligné résultant des différences thermiques
- d'autres, comme on peut rencontrer dans la pratique[4]

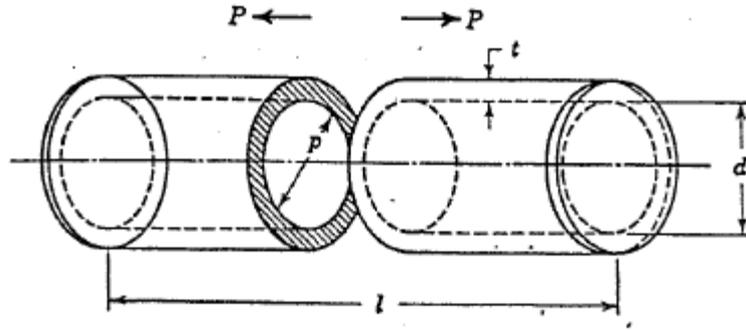
### 2.15. Contraintes dans des viroles minces basées sur la théorie de la membrane :

Équations simples peuvent être dérivées pour déterminer l'épaisseur minimale de la paroi d'un récipient cylindrique à paroi mince

	capacité de travail approximative bbl	diamètre extérieur pieds-pouces	la taille pieds	hauteur de connexion de trop-plein pieds-pouces	hauteur des poumons de passerelle pieds-pouces	localisation de connexion de la ligne de remplissage pieds-pouces	la taille des raccords pouces
90	72	7-11	10	9-6	7-7	14	3
210	166	12-0	10	9-6	7-7	14	4
200	200	10-0	15	14-6	12-7	14	4
300	266	12-0	15	14-6	12-7	14	4
400	366	12-0	20	19-6	17-7	14	4
H-500	479	15-6	16	15-6	13-7	14	4
750	746	15-6	24	23-6	21-7	14	4
L-500	407	21-6	8	7-6	5-7	14	4
H-1000	923	21-6	16	15-6	13-7	14	4
1500	1438	21-6	24	23-6	21-7	14	4
L-1000	784	29-9	8	7-6	5-7	14	4
2000	1774	29-9	16	15-6	13-7	14	4
3000	2764	29-9	24	23-6	21-7	14	4

**Tableau 3.1-Dimensions typiques pour les réservoirs de production (100,101)**

**(Avec la permission de l'institut du pétrole américain)**



**Figure3.2- Forces longitudinales agissant sur mince cylindre sous pression interne**

Avec un chiffre de la pression interne 1 présente un diagramme représentant une cuve cylindrique à paroi mince dans laquelle une contrainte uniforme, *f*, peut être assurée de se produire dans la paroi en tant que pression interne du résultat.

Le nomenclature utilisé dans les figures 1 et la figure 2 est:

**L** = longueur en pouces

**D** = diamètre intérieur en pouces

**t** = épaisseur de la coque en pouces

**p** = pression interne, livres par pouce carré contrainte longitudinale de la jauge

Si on limite l'analyse à la pression souligne que, la force longitudinale, *p*, résultant d'une pression interne, *p*, agissant sur un mince cylindre *t* épaisseur, la longueur *l*, et le diamètre *d* est :

**P** = force tendant à rompre navire longitudinalement

$$P = p\pi d^2/4 \dots \dots \dots (1)$$

Et *a*=surface de métal rupture longitudinale résistant.

$$a = t\pi d \dots \dots \dots (2)$$

Donc :

$$\text{Contrainte} = P/a = \frac{p\pi d^2/4}{2a} = \frac{pd}{4t} = \text{stress induit, livres par pouce carré}$$

$$t = pd/4f$$

Contrainte circonférentielle. Si l'on se réfère à la figure et considère les contraintes circonférentielle causées par la pression interne, l'analyse qui suit peut être développée:

**p** = force tendant à rupture navires circonférentiellement.

$$=pdl.$$

**a**= surface de métal force résistante.

$$=2ll.$$

$$f=\text{force}=p/a=pdl/2ll=pd/2t.$$

**Où :**

$$t=pd/2f.$$

### 2.16. Conception coquille de grands réservoirs de stockage :

Une comparaison de l'équation avec l'équation indique que, pour une contrainte de précises admissible, le diamètre fixe, et une pression donnée, l'épaisseur requise pour contenir la pression de la condition de l'équation est le double de celle requise pour la condition de l'équation.

Par conséquent, l'épaisseur telle que déterminée par l'équation est «contrôle» et est communément utilisé «équation à paroi mince» mentionnée dans les différents codes pour les navires.

Cette équation ne tient pas compte de la corrosion et ne reconnaît pas le fait que coutures soudées ou les articulations peuvent entraîner une faiblesse.

Efficacité conjointes et surépaisseur de corrosion. Dans des récipients pour le stockage atmosphérique des joints soudés sont rarement soulignent soulagé ou radiographié. Les cordons de soudure risquent de ne pas être aussi forts que la plaque d'acier laminée adjacente de la coque. Il a été constaté par expérience que l'allocation peut être faite pour une telle faiblesse en introduisant un «facteur d'efficacité conjointe", E dans l'équation et l'équation.

Ce facteur est toujours inférieur à l'unité et est spécifiée pour un type donné de construction soudée dans les différents codes.

L'épaisseur du métal, c, a permis la corrosion est prévue, alors ajoutée à l'épaisseur requise calculée et la valeur de l'épaisseur finale arrondie à la taille la plus proche de la plaque d'une épaisseur nominale égale ou supérieure.

Équation devient :

$$t = \frac{pd}{4Ef} + c \dots\dots\dots(3)$$

Où :

**t** = épaisseur de la coquille, pouces

**p** = pression interne, en livres par pouce carré

**D** = diamètre intérieur, pouces

$f$  = le stress de travail admissible, livres par pouce carré

$E$  = efficacité du joint, sans dimension

$C$  = la corrosion allocation pouces

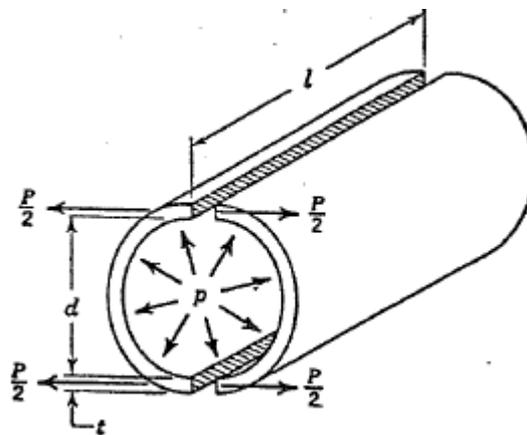
Modification d'équations. Pour les navires de forte la contrainte de service maximale admissible est considérée comme environ un tiers de la résistance ultime à la traction de l'acier, à savoir un facteur de sécurité de 3 est employé.

Ce qui est courant pour les charges structurelles statiques sur l'acier.

Les contraintes sont calculées sur l'hypothèse que le réservoir est rempli au niveau de l'eau 60F ° (densité 62,37 lb par pied cube) et que la tension dans chaque anneau est calculée à un point 12.

Dessus de la ligne médiane de l'articulation horizontale inférieure de la rangée horizontale de plaques soudées étant considère.

La pression hydrostatique dans le réservoir de stockage cylindrique varie d'un minimum dans la partie supérieure de la tige la plus sûr jusqu'à un maximum à la partie inférieure du parcours le plus bas.



**Figure 3.3-Forces circumférentielles agissant sur mince cylindre sous pression interne**

Pour déterminer l'épaisseur de la plaque pour un cours particulier, un résultat en surdimensionnement pour le reste de la plaque et ne représente donc pas une économie maximale.

Un design basé sur la pression en haut du cours se traduirait par Under design, qui ne serait pas une bonne pratique d'ingénierie.

Cependant, une certaine considération devrait être accordée à la retenue supplémentaire offerte par les plaques adjacentes un cours particulier.

Dans le cadre le plus bas, les plaques au cours de la coquille inférieure.

Ce dispositif de retenue supplémentaire vers le bord inférieur est efficace pour une distance appréciable ou une hauteur à partir du bas du parcours le plus bas.

Dans un cours intermédiaire avec un cours de plaques lourdes ci-dessous, la partie supérieure des plaques plus lourdes seront compris, ce qui aura tendance à annuler toute sollicitation excessive du fond

du cours en question. Par conséquent, une conception basée sur la pression au niveau d'une hauteur de 1 pied du bas du parcours peut être considéré comme conservateur. Les équations suivantes peuvent être dérivées si l'on suppose que la masse volumique du fluide ne doit pas dépasser celle de l'eau, qui est utilisée pour l'essai hydrostatique du réservoir.[4]

$$P = \rho \frac{(H - 1)}{144} \dots\dots\dots(4)$$

Où :

**p** = densité de l'eau à 60 ° F-62,37 lb par pied cube

**h** = hauteur, en centimètres, à partir du bas du parcours considéré au sommet de l'angle au sommet ou au fond d'un trop-plein qui limite la hauteur de remplissage du réservoir

**P** = pression interne, en livres par pouce carré

Pour le double bout à bout soudé construction conjointe, la définition ci-dessus p peut être substitué dans l'équation.[4]

Quand on utilise une conception contrainte admissible de 21.000 psi pour SA-7 plaque et une efficacité du joint de 0,85 pour un doublement soudés bout à bout la construction conjointe, les résultats de substitution suivants:

$$t = \frac{62.37(H - 1)(12D)}{2(21,000)(0.85)(144)} + c \dots\dots\dots(5)$$

Donc :

$$t = 0.0001456(H - 1)D + c \dots\dots\dots(6)$$

Où:

**t** = épaisseur de la coque, pouces

**H** = hauteur tel que défini dans l'équation, les pieds

**D** = diamètre intérieur, pieds

**c** = surépaisseur de corrosion, pouces

Si la double tour de filet pleine construction commune est supposée, l'efficacité commune correspondante, E, est de 0,75.

Alors l'équation devient:

$$t = 0.0001650(H - 1)D + c \dots\dots\dots(7)$$

Si faible hauteur en alliage acier solide est utilisée, la contrainte maximale admissible est considérée comme 60% de la limite d'élasticité minimale.

Lorsque l'on utilise deux joint bout à bout soudés et faiblement allié à haute résistance équation de construction en acier devient:

$$t = \frac{5.096(D)(H - 1)}{f_{y.p.}} + c \dots\dots\dots(8)$$

Pour tour soudé construction:

$$t = \frac{5.775(D)(H - 1)}{f_{y.p.}} \dots\dots\dots(9)$$

**3. Cas pratique :****3.1. Caractéristiques géométriques de réservoirs de stockage de FERTIAL :**

Données	Valeur
Capacité	200 tons
Diamètre du bac	500 mm
Hauteur du bac	220 mm
Pression de calcul	7 mbar
Température	3 c°
Poids spécifique max de contenu	0.16814
Hauteur max de remplissage	540 mm
Hauteur d'eau en cas d'essai	540mm
Date de fabrication	1986
Forme du toit	Hémisphérique
Conditions d'étude	Densité de calcul = 0
	Température = 3°c
Matériaux	A235,A285,A516

**Tableau3.2- Représente les caractéristiques géométriques du réservoir de stockage de FERTIAL**

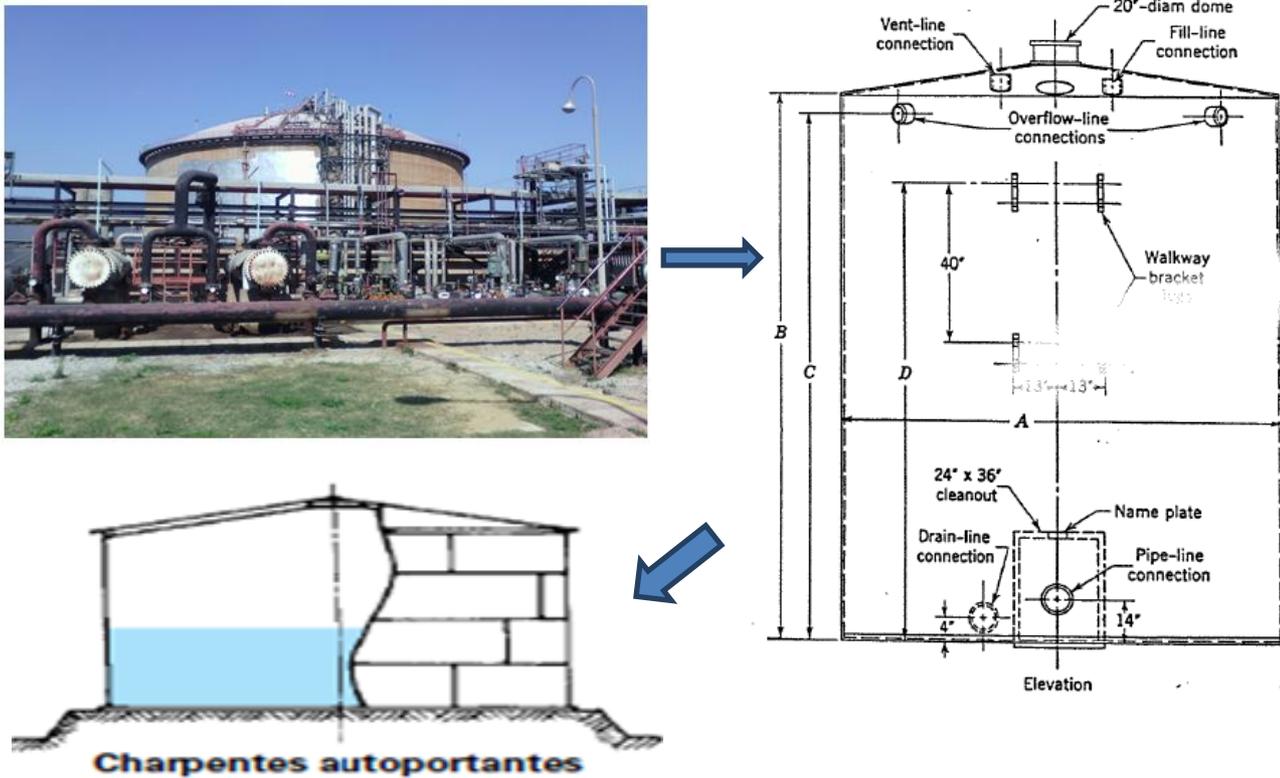


Figure 3.4–la construction de la robe du réservoir

**2.2. Caractéristiques du matériau de construction :**

- La limite d'élasticité 235 MPa
- La résistance à la traction 340MPa (API-650 5.6.2.1)
- Coefficient de poisson 0.3
- Masse volumique 7850 kg/m<sup>2</sup>

**2.3. Calcul des épaisseurs du réservoir suivant API 650 :**

Après le calcul des limites admissibles des matériaux suivant la norme API 650, l'adoption d'une surépaisseur de corrosion CA = 1mm et l'adoption du fuel comme liquide de stockage on trouve :

$$S_{d_1} := \min \left( \left( \frac{2}{3} \cdot S_{235JR_y} \right), \left( \frac{2}{5} \cdot S_{235JR_t} \right) \right)$$

$$S_{t_i} := \min \left( \left( \frac{3}{4} \cdot S_{235JR_y} \right), \left( \frac{3}{7} \cdot S_{235JR_r} \right) \right) \quad \dots\dots (10) \quad \dots\dots (11)$$

Les épaisseurs varient de haut au bas suivant la position de la virole et sont calculées suivant l’API 650 comme suit :

Calcul avec la formule 12 pour 3 différents matériaux de construction A235, A285 et A516 :

N°	Cte	H <sub>t</sub> Hauteur des toles	H <sub>i</sub> Mm	D mm	G 0,98	A235 A285 A516			Ca Mm	A235 A285 A516		
						□ <sub>e</sub> MPa				t <sub>i</sub> mm		
						235	285	516		15	12	7
1	4,9	82	722	5208	0,98	235	285	516	1	15	12	7
2	4,9	12	164	5208	0,98	235	285	516	1	14	12	7
3	4,9	12	152	5208	0,98	235	285	516	1	13	11	6
4	4,9	12	140	5208	0,98	235	285	516	1	12	10	6
5	4,9	12	128	5208	0,98	235	285	516	1	11	9	6
6	4,9	12	116	5208	0,98	235	285	516	1	10	8	5
7	4,9	12	104	5208	0,98	235	285	516	1	9	8	5
8	4,9	12	92	5208	0,98	235	285	516	1	8	7	4
9	4,9	20	800	5208	0,98	235	285	516	1	7	6	4
10	4,9	20	600	5208	0,98	235	285	516	1	6	5	3
11	4,9	20	40	5208	0,98	235	285	516	1	4	3	2
12	4,9	20	20	5208	0,98	235	285	516	1	2	2	2

**Tableau3.3- calcul des épaisseurs de la virole de réservoir avec la formule 12**

Calcul avec la formule 8 :

N°	Cte	H <sub>t</sub> Hauteur des tôles	H <sub>i</sub> mm	D mm	G	A235 A285 A516			Ca mm	A235 A285 A516		
						σ <sub>e</sub> MPa				t <sub>i</sub> mm		
1	314,688	82	17,22	52,8	0,98	235	285	516	1	17,22	19	11
2	314,688	12	17,22	52,8	0,98	235	285	516	1	17,22	19	11
3	314,688	12	17,22	52,8	0,98	235	285	516	1	17,22	19	11
4	314,688	12	17,22	52,8	0,98	235	285	516	1	17,22	19	11
5	314,688	12	17,22	52,8	0,98	235	285	516	1	17,22	19	11
6	314,688	12	17,22	52,8	0,98	235	285	516	1	17,22	19	11
7	314,688	12	17,22	52,8	0,98	235	285	516	1	17,22	19	11
8	314,688	12	17,22	52,8	0,98	235	285	516	1	17,22	19	11
9	314,688	20	17,22	52,8	0,98	235	285	516	1	17,22	19	11
10	314,688	20	17,22	52,8	0,98	235	285	516	1	17,22	19	11
11	314,688	20	17,22	52,8	0,98	235	285	516	1	17,22	19	11
12	314,688	20	17,22	52,8	0,98	235	285	516	1	17,22	19	11

**Tableau3.4- calcul des épaisseurs de la virole de réservoir avec la formule 8**

### Conclusion :

On remarque que la construction du réservoir se base sur les calculs théoriques et les toute en tenant en compte du volet pratique, cependant le montage dépend de l'environnement sur le chantier qui aussi des qualifications des ouvriers et des contrôleurs.

Les recommandations exigées par la norme API 650 est une condition indispensable.

### 1. présentation de l'outil de calcul (phimeca soft) :

L'analyse numérique de phénomène physique est souvent réalisée en utilisant des données déterministes issues d'expertises ou pondérées par des coefficients de sécurité. Cependant malgré ces précautions, le risque "0" n'existe pas et la pénalisation engendrée par les coefficients de sécurité peut s'avérer coûter cher. La variabilité naturelle empêche toute connaissance parfaite. La nécessité de prendre en compte cet aspect est donc inévitable afin de maximiser la fiabilité d'une structure sans pour autant dégrader son coût de fabrication/maintenance.

PhimecaSoft permet d'introduire la notion d'aléa dans toute problématique physique. Ainsi l'analyse n'est plus déterministe mais stochastique. Fort de son interface graphique multiplateforme, PhimecaSoft est d'une utilisation simple. L'organisation du logiciel suit le schéma en 4 phases du traitement des incertitudes :

- Modélisation physique de la problématique,
- Modélisation probabiliste des données d'entrée,
- Propagation de l'incertitude pour l'analyse de sensibilité ou de fiabilité,
- Détermination de l'influence des données d'entrée sur le résultat de sortie.[6]

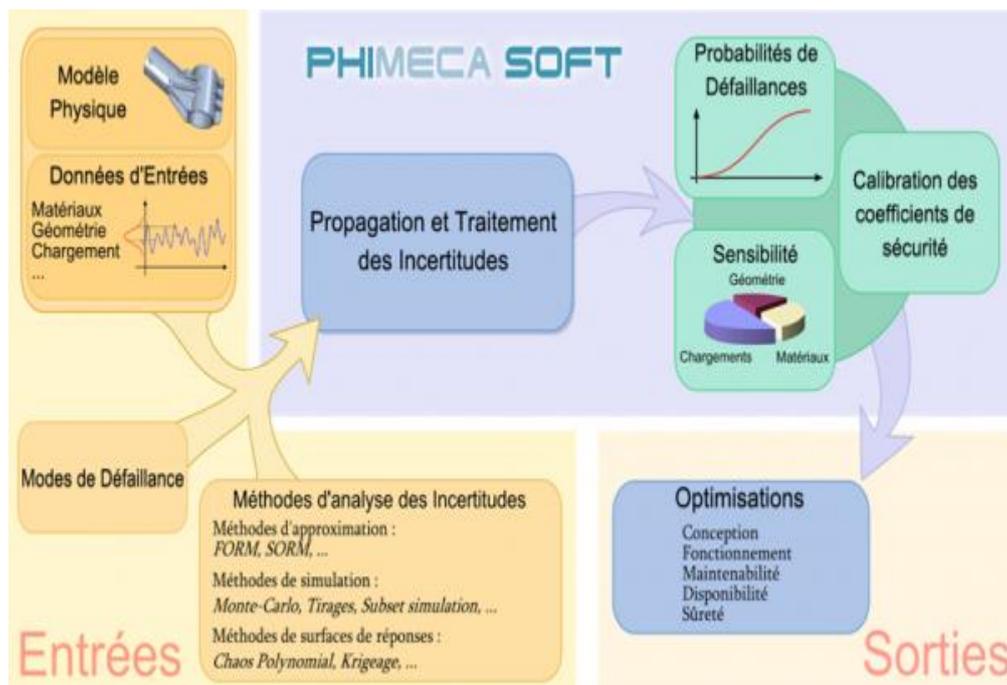


Figure 4.1.présentation de phimecasoft

## 2. Fonctionnalités de PhimecaSoft :

### 2.1. Méthodes d'analyse de fiabilité par approximation de l'état limite

- First-order reliability method (FORM)
- Second-order reliability method (SORM)
- Multi-FORM
- 2SMART

### 2.2. Méthodes d'analyse de fiabilité par simulations

- Simulation de Monte-Carlo
- Tirage d'importance
- Tirage conditionnel
- Tirage directionnel
- Simulations par sous-ensemble (Subset simulation)

### 2.3. Calcul de plan d'expériences

- Déterministe : complet, axial, factoriel, composite
- Aléatoire : Hypercube latin, Monte-Carlo, quasi-Monte Carlo

### 2.4. Évaluation de méta-modèle

- Chaos polynomial (plein, creux)
- Régression à Vecteurs de Support (SVR)
- Krigeage

### 2.5. Analyse statistique de données

- Calculatrice statistique
- Inférence par maximum de vraisemblance[6]

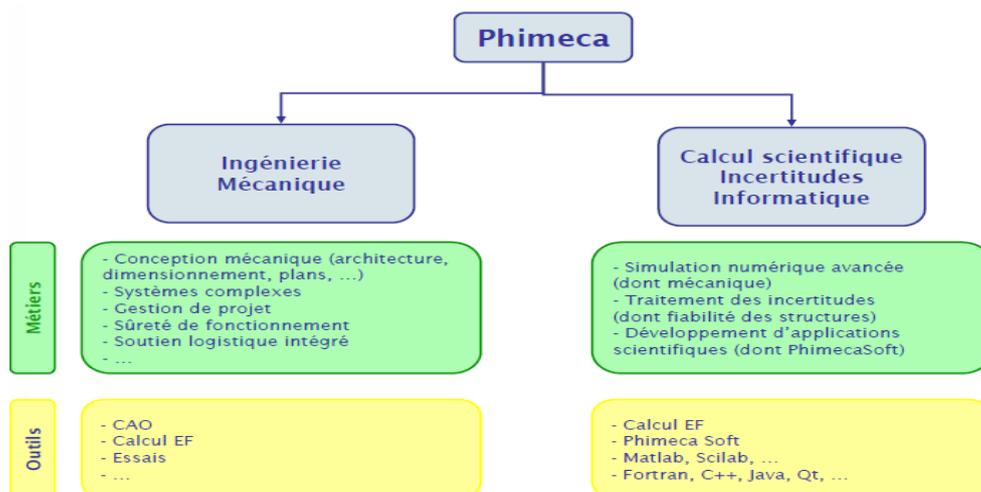


Figure 4.2 : les fonctions de phimecasoft

### 3. Cas pratique :

#### 3.1. Application sur le logiciel phimecasoft :

Pour l'acier A285 avec 15 mm d'épaisseur :

##### a) le modèle physique :

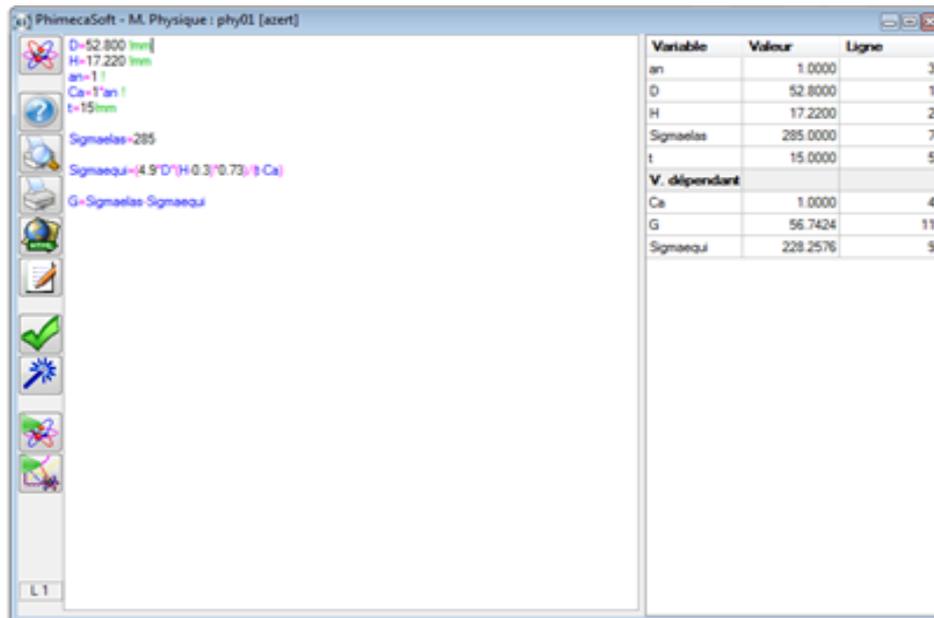


Figure 4.3.modèle physique

**D**=le diamètre du bac

**H**=la hauteur du bac

**Ca**= l'épaisseur de la corrosion

b) le modèle probabiliste :

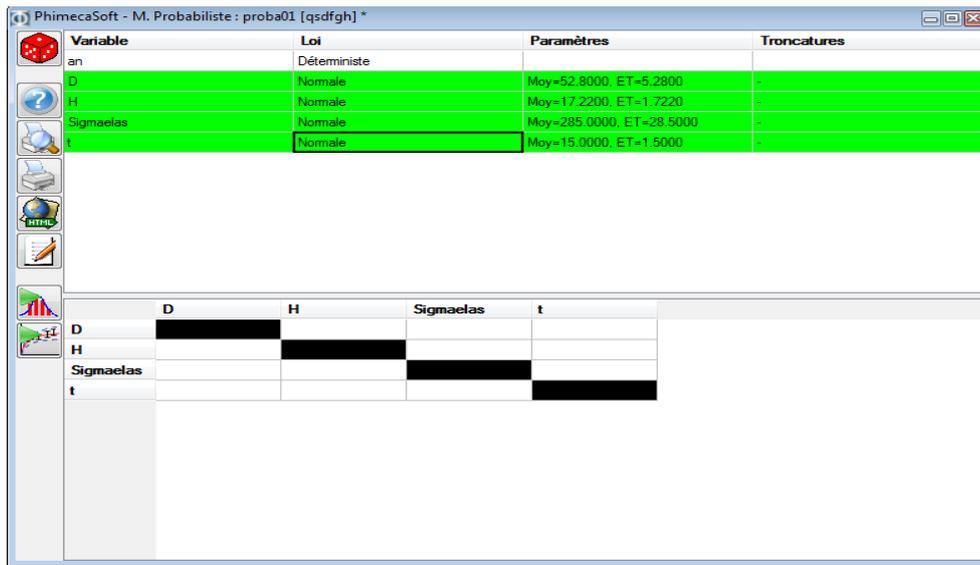


Figure 4.4.modèle probabiliste

c) état limite :

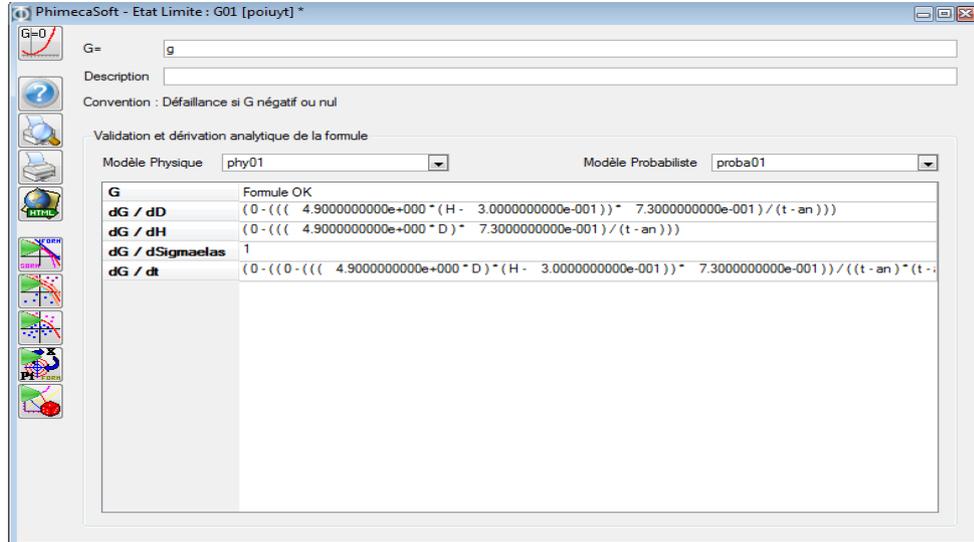


Figure 4.5.l'état limite

## d) arbre des calculs :

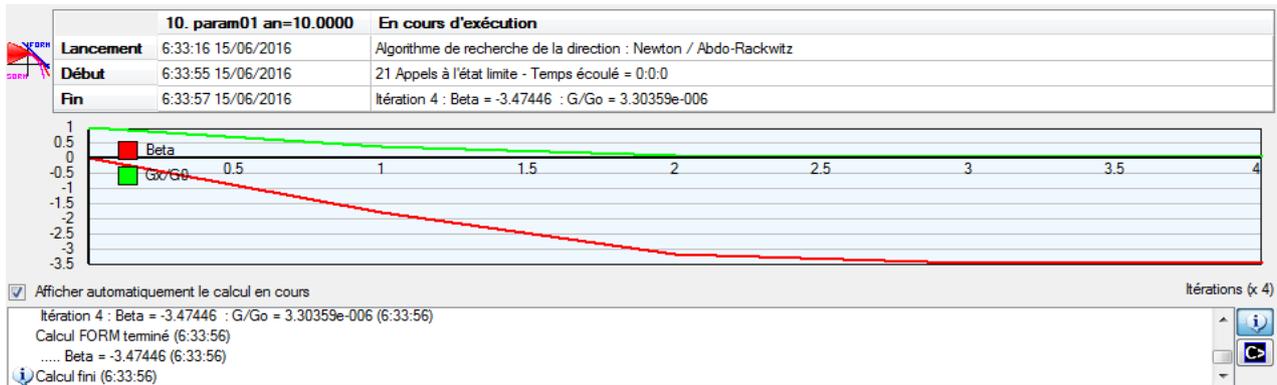


Figure 4.6. L'arbre de calcul

## e) Etude paramétrique :

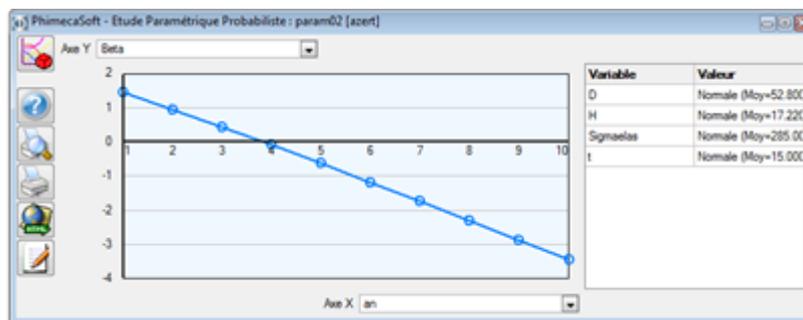


Figure 4.7. Étude paramétrique (diagramme de beta en fonction du temps)

## 3.2. Discussion des résultats :

Les résultats déterministes donnent les épaisseurs minimales à utiliser en fonction de la résistance de l'acier.

Le calcul fiabiliste est effectué par rapport aux épaisseurs donné par les résultats déterministes.

## 1) Cas A235 pour une épaisseur minimale 15/23/30mm :

Si on choisit un matériau à faible résistance 235 MPa le calcul montrent qu'il faut des épaisseurs supérieures à 23 mm pour assurer la durée de vie de la virole, sur l'effet de la corrosion qui se propage à 0.1 mm/année.

Pour 23 mm, la durée de vie est garantie pour 6 ans.

La est réalisé pour un indice de fiabilité  $\beta$  acceptable est 3.7192 équivalent à une probabilité de défaillance de  $P_f=10^{-4}$ .

année	Beta		
	15	23	30
1	0,624	3,8465	5,2721
2	0,577	3,8155	5,2558
3	0,5293	3,7873	5,2387
4	0,4823	3,7299	5,2442
5	0,4351	3,7264	5,2039
6	0,3875	3,6717	5,1863
7	0,3377	3,6682	5,1686
8	0,2917	3,6124	5,1508
9	0,2436	3,612	5,1329
10	0,1954	3,5824	5,1148

**Tableau 4.1.represente beta en fonction du temps pour différentes épaisseurs de l'acier A235**

## 2) Cas 285 pour une épaisseur minimale de 12mm :

Pour un matériau de 285 MPa pour une épaisseur minimale de 12 mm, le calcul fiabiliste montre que pratiquement toutes les valeurs de l'indice de fiabilité  $\beta$  sont inférieures à la valeur acceptable 3.72.

année	Beta		
	15	23	30
1	0,624	3,8465	5,2721
2	0,577	3,8155	5,2558
3	0,5293	3,7873	5,2387
4	0,4823	3,7299	5,2442
5	0,4351	3,7264	5,2039
6	0,3875	3,6717	5,1863
7	0,3377	3,6682	5,1686
8	0,2917	3,6124	5,1508
9	0,2436	3,612	5,1329
10	0,1954	3,5824	5,1148

**Tableau 4.2.represente beta en fonction du temps pour différentes épaisseurs de l'acier A285**

**3) Cas 516 pour une épaisseur minimale de 7 mm :**

Les résultats fiabiliste sur phimeca soft ne convergent pas et ne donne pas des résultats.

**4) Cas A 515 pour une épaisseur minimale de 15 mm :**

année	Beta		
	15	23	30
1	0,624	3,8465	5,2721
2	0,577	3,8155	5,2558
3	0,5293	3,7873	5,2387
4	0,4823	3,7299	5,2442
5	0,4351	3,7264	5,2039
6	0,3875	3,6717	5,1863
7	0,3377	3,6682	5,1686
8	0,2917	3,6124	5,1508
9	0,2436	3,612	5,1329
10	0,1954	3,5824	5,1148

**Tableau 4.3.represente beta en fonction du temps pour différentes épaisseurs de l'acier A515**

**5) C A285\_A515 pour une épaisseur minimale de 15 mm :**

En utilisant l'épaisseur minimale obtenue par pour l'acier à 235 MPa, le calcul fiabiliste a été réalisé en changeant le matériau et en gardent la même épaisseur.

L'épaisseur de 15 mm reste faible et ne peut pas être prise comme garantie.

L'épaisseur 23 mm pour l'acier A516 est valable jusqu'à 8 ans.

L'épaisseur de 30 mm est la plus recommandé pour une durée de vie de 10 ans pour l'acier A516, par contre pour l'acier A285 elle n'est garantie que pour 7 ans.

**Conclusion :**

D'après ce chapitre on a conclu que le calcul fiabiliste est nécessaire pour l'utilisation du réservoir de stockage en toute sécurité dans la mesure de ou des problèmes de fatigue apparaissent et sous l'effet de la corrosion.

## Conclusion générale

---

### **Conclusion générale :**

L'état de l'art est donné sur la production et l'utilisation des réservoirs de stockages des fluides et les différents modes de stockage.

Le stockage des fluides dans les réservoirs occupe une place primordiale, pour cette raison notre objectif est d'étudier les réservoirs de stockage et de mieux comprendre les paramètres de construction ainsi que les phénomènes de rupture pour une conception fiable.

Le dimensionnement d'un réservoir est une étape délicate nécessitant un savoir-faire pointu pour répondre aux exigences de la norme et de la réglementation en vigueur. La prise en charge du volet sécurité est primordiale et nécessite des réflexions qui dépassent l'étude à l'utilisation finale pour se rendre compte de toutes les éventualités et éviter la défaillance.

On remarque que la construction du réservoir se base sur les calculs théoriques et les toute en tenant en compte du volet pratique, cependant le montage dépend de l'environnement sur le chantier qui aussi des qualifications des ouvriers et des contrôleurs.

Les recommandations exigées par la norme API 650 est une condition indispensable.

Le calcul fiabiliste est nécessaire pour l'utilisation du réservoir de stockage en toute sécurité dans la mesure de ou des problèmes de fatigue apparaissent et sous l'effet de la corrosion.

### *Références bibliographiques :*

- [1] : Maurice LEMAIRE, "fiabilité des structures en mécanique couplage mécano-fiabiliste statique" mars 2002.
- [2],[3]:Technique de l'ingénieur édition 2008 l'article [BM6590]et l'article [BM6592].
- [4] : Documentation FERTIAL.
- [5] : Norme API 650.
- [6] : Site WIKIPEDIA.
- [7] : Fadila AYATI, « les modes de stockage d'hydrogène et élaboration d'un programme informatique pour la conception d'un réservoir d'hydrogène sous forme liquide » 2007.
- [8] : thèse de BELHOUCHE et MOUHOUB « étude du réservoir de stockage des produits pétroliers » 2010.