

وزارة البحث العلمي والتعليم العالي



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° d'ordre : M...../GE/2025

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN Électronique

Spécialité : Électronique des Systèmes Embarqués

Par

KROUCHI AHMED & ELHAOUT HOUARI

Intitulé du sujet

**Réalisation d'un système de mesure du niveau d'un réservoir gas-oil
d'une station-service**

Soutenu le 29/06/ 2025 devant le jury composé de :

Président :	BENOUALI A.	Grade MAA	Université de Mostaganem.
Examineur :	HENNI S.	Grade MCA	Université de Mostaganem
Encadrant :	LARBI BEKLAOUZ H.	Grade MCB	Université de Mostaganem
Co-encadrant :	BENTOUMI M.	Grade MCA	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

*Avant toute chose, nous exprimons notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, **ALLAH**, qui nous a accordé la santé, la volonté, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.*

Nous adressons un remerciement tout particulier à nos chers parents pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements constants et leur amour tout au long de notre parcours académique.

*Nos remerciements les plus sincères vont également à notre encadrant, Monsieur **BEKLAOUZ HADJ LARBI** ainsi qu'à notre Co-encadrant Monsieur **BENTOUMI MOHAMED** qui s'est investi corps et âme pour la réussite de ce projet. Qu'Allah les récompense pleinement et les accorde bénédiction et succès dans toutes les étapes de leur vie.*

Nous remercions chaleureusement l'ensemble de nos enseignants. Sans votre dévouement, vos efforts et vos précieuses connaissances, nous n'aurions jamais pu atteindre ce niveau.

Nos sincères remerciements vont aussi aux membres du jury pour le temps qu'ils ont consacré à l'examen de notre mémoire, ainsi que pour leurs remarques constructives.

Enfin, nous tenons à remercier tout le corps professoral du département de Génie électrique pour le travail remarquable accompli afin de créer un environnement propice à l'apprentissage et au développement de chacun d'entre nous.

Dédicace

À la mémoire de ma chère mère, Celle qui m'a donné la vie, qui m'a élevé avec amour et tendresse.

Qu'Allah t'accorde Sa miséricorde et t'ouvre les portes de Son paradis.

À mon père, mon soutien dans les moments les plus durs.

Merci pour ta présence constante, tes sacrifices silencieux, et ton amour inconditionnel.

Ta confiance m'a donné la force d'avancer.

À mes enseignants, pour leur précieuse transmission du savoir.

A mes amies de la promotion ESE merci pour tous.

A mon binôme merci pour ta collaboration, ton sérieux et ta bonne humeur tout au long de ce travail.

Ce fut un réel plaisir de partager cette expérience avec toi.

KROUCHI AHMED

Dédicace

*À mes chers parents,
qui ont fait preuve d'un courage, d'un amour et d'un soutien inestimables tout au long de
mon parcours académique.*

*Votre patience, vos sacrifices silencieux et votre foi en moi ont été ma source de force à
chaque étape.*

Je vous dédie ce travail avec toute ma gratitude et tout mon amour.

*À tous mes enseignants,
merci pour votre dévouement, votre bienveillance et votre persévérance à transmettre le
savoir.*

A madame BOUTERFA NAÏMA merci pour vos conseils en or et votre motivation

A tous mes amis qu'ils sont ma deuxième famille merci d'être à mes côtés

A mon binôme Ahmed merci pour être un bon support pour moi durant cette aventure

Vous avez allumé en moi la flamme de la curiosité et de la rigueur.

Cette réussite est aussi la vôtre.

ELHAOUT HOUARI

الملخص

في ظل التحديات التي تواجهها محطات الوقود في تتبع كميات الوقود المخزنة بدقة، خاصة بسبب اعتمادها على أدوات تقليدية مثل القياس اليدوي، قمنا بتطوير نظام ذكي ومنخفض التكلفة لقياس مستوى الغازوال داخل الخزانات يعتمد النظام على متحكم ، وحساس فوق صوتي لقياس المستوى، بالإضافة إلى حساس حرارة لأخذ تأثير التمدد الحراري بعين الاعتبار. يتم عرض النتائج في الوقت الحقيقي على شاشة العرض و صفحة ويب، مع تخزين دوري للبيانات وتحذير تلقائي في حال تخطي حدود الحرارة الآمنة. أثبتت الاختبارات أن النظام دقيق وفعال، وقادر على العمل في بيئات حقيقية. هذا المشروع يمثل خطوة مهمة نحو تحديث مراقبة الوقود في الجزائر.

الكلمات المفتاحية

نظام قياس، مستوى الغازوال، خزان أسطواني، حساس فوق صوتي، الحرارة، صفحة ويب، تخزين البيانات، مراقبة الخزانات.

Résumé

Face aux difficultés rencontrées par les stations-service pour suivre avec précision les volumes de gasoil stockés, souvent dues à l'utilisation de jauges manuelles peu fiables, nous avons développé un système de mesure intelligent, automatisé et à faible coût. Ce système repose sur un microcontrôleur, un capteur à ultrasons pour mesurer le niveau, et une sonde de température pour intégrer les effets de dilatation thermique. Les données sont affichées en temps réel sur un écran LCD et une interface web locale, avec stockage périodique et alertes en cas de températures critiques.

Les tests menés ont confirmé la fiabilité et l'efficacité du dispositif, aussi bien en simulation que dans des conditions réelles. Ce projet constitue une solution prometteuse et évolutive pour moderniser la gestion des réservoirs dans les stations-service en Algérie.

Mots clés

Système de mesure, niveau de gasoil, réservoir cylindrique, capteur à ultrasons, température, interface web, enregistrement des données, surveillance des réservoirs.

Abstract

Due to the ongoing challenges faced by fuel stations in accurately tracking gasoil storage levels—often caused by outdated manual gauging methods—we designed an intelligent, low-cost monitoring system. The system is built around microcontroller, an ultrasonic sensor to measure liquid level, and a temperature sensor to compensate for thermal expansion. Real-time data is displayed on an LCD screen and a local web interface, with periodic data logging and automatic alerts for critical temperature thresholds.

Experimental tests demonstrated the system's reliability and effectiveness in both simulated and real-world conditions. This project offers a practical and scalable solution to modernize fuel tank monitoring in Algerian service.

Key Words

Measurement system, gasoil level, cylindrical tank, ultrasonic sensor, temperature, web interface, data logging, tank monitoring.

Sommaire

Introduction Générale.....	1
Chapitre I. Réservoirs de stockage	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 Réservoirs de stockage.....	4
I.2.1 Définition	4
I.2.2 Classification des réservoirs de stockage	4
I.2.2.1 Emplacement des réservoirs	4
I.2.2.2 Les Matériaux de fabrication.....	5
I.2.2.3 Forme des réservoirs.....	6
I.3 Capacité des réservoirs.....	8
I.3.1 Réservoir cylindrique vertical	8
I.3.2 Réservoir cylindrique horizontal.....	9
I.3.2.1 Fonds hémisphériques	11
I.3.2.2 Fonds torisphériques	12
I.3.2.3 Fonds semi-elliptiques	13
I.3.3 Réservoir sphérique.....	14
I.4 Conclusion	14
Chapitre II. Mesure de niveau	16
II.1 Introduction	17
II.2 Mesure de niveau.....	17
II.2.1 Méthodes de mesure du niveau	17
II.2.1.1 Mesure manuelle.....	17
II.2.1.2 Mesure à flotteur	17
II.2.1.3 Mesure par Ultrasons.....	18
II.2.1.4 Mesure par radar	19
II.2.1.5 Mesure par pression hydrostatique et différentielle	19
II.3 Mesure de température.....	20
II.3.1 Capteur de mesure de la température	21
II.3.1.1 Thermomètres à résistance (RTD).....	21
II.3.1.2 Thermocouples	22
II.3.1.3 Thermistances.....	22
II.4 Conclusion.....	23

Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau	24
III.1 Introduction	25
III.2 Schéma d'implémentation	25
III.2.1 Les composants utilisés	26
III.3 L'organigramme	27
III.4 Tests expérimentaux	32
III.4.1 Simulation de remplissage d'un réservoir de gasoil de 32 m³	32
III.4.2 Surveillance d'un réservoir d'eau domestique	37
III.5 Discussion des Résultats Expérimentaux	41
III.5.1 Test 1 : Simulation de remplissage d'un réservoir de gasoil de 32 m³	41
III.5.2 Test 2 : Surveillance d'un réservoir d'eau domestique	43
III.6 Conclusion	44
Conclusion Générale	45
Bibliographies	47
Annexes	48

Liste des figures

Figure 1 : Réservoirs aériens - enterrés (station-service Mostaganem).....	5
Figure 2 : Réservoir sphérique [4].....	6
Figure 3 : Réservoir horizontale (station-service Mostaganem).	7
Figure 4 : Réservoir à toit fixe (SARL COFEED-Mohammedia).....	7
Figure 5 : Réservoir à toit flottante (NZ1-SONATRACH).....	8
Figure 6 : Réservoir cylindrique vertical.....	9
Figure 7 : Réservoir cylindrique horizontal.....	9
Figure 8 : Segment et secteur.	10
Figure 9 : Réservoir avec fonds hémisphériques.....	11
Figure 10 : Réservoir avec fond torisphérique.	12
Figure 11 : Fond semi-elliptique.	13
Figure 12 : Réservoir sphérique.	14
Figure 13 : Réservoir avec échelle graduée de lecture du niveau mesurer par un flotteur (SARL COFEED-Mohammedia).....	18
Figure 14 : Capteur radar (SARL COFEED-Mohammedia).....	19
Figure 15 : capteur de pression (SARL COFEED-Mohammedia).....	20
Figure 16: capteur de température RTD (SARL COFEED-Mohammedia).....	22
Figure 17 : Schéma de câblage du système de mesure.....	25
Figure 18 : ESP32-WROOM-32	26
Figure 19 : capteur à ultrasons JSN-SR04T	26
Figure 20 : capteur de température DS18B20	27
Figure 21 : Ecran LCD 16x2 i2C	27
Figure 22 : Réservoir de gasoil de 20 m ³	32
Figure 23 : Alerte de température élevée affichée sur la page web-Risque lié aux vapeurs inflammables point d'éclair.....	36
Figure 24 : Alerte de basse température affichée sur la page web-Risque de solidification (point de coulé).....	36
Figure 25 : Capteur de niveau monté sur le dessus du réservoir	37
Figure 26: Prototype du système de mesure de niveau	38
Figure 27 : Affichage des mesures sur la page web	38
Figure 28 : Courbe de relation entre la hauteur et le volume mesuré.....	41
Figure 29 : Effet de la dilatation thermique sur le volume de gasoil.....	42
Figure 30 : Courbe de remplissage du réservoir d'eau domestique	43

Liste des Tableaux

Tableau I : Mesure expérimentales (hauteur, volume et température).....	34
Tableau II : Mesures comparatives du niveau à différentes températures.....	35
Tableau III : Mesures de remplissage du réservoir en fonction du temps.....	40

Introduction Générale

Introduction générale

Dans un contexte où la consommation de carburants, en particulier le gasoil, ne cesse d'augmenter, les stations-service jouent un rôle crucial dans la chaîne de distribution de l'énergie. Cependant, ces infrastructures font souvent face à des difficultés majeures liées à la précision du suivi des volumes stockés, notamment à cause de l'usage d'outils traditionnels comme la jauge manuelle, connue pour son manque de fiabilité. Ce manque de précision peut entraîner des pertes économiques importantes dues à des erreurs de mesure, à des fuites non détectées, voire à des cas de vol dissimulé.

Partant de ce constat, notre projet vise à développer un système intelligent, automatisé et à faible coût pour la surveillance du niveau de gasoil dans les réservoirs de stockage, spécifiquement adapté aux besoins des stations-service. L'objectif est d'assurer un suivi en temps réel, précis et sécurisé du contenu des réservoirs, tout en prenant en compte des facteurs comme la température qui influence le volume à cause de la dilatation thermique.

Ce travail a été organisé en trois parties :

Le premier chapitre est consacré aux types de réservoirs utilisés pour le stockage du gasoil, ainsi qu'aux méthodes de calcul de leur volume en fonction de leur forme géométrique.

Le deuxième chapitre s'intéresse aux technologies de mesure de niveau et de température, en détaillant les capteurs choisis et leur rôle dans l'amélioration de la précision de mesure.

Enfin, le troisième chapitre décrit la réalisation pratique du système proposé, les différents tests effectués sur le terrain, et l'évaluation de sa performance dans un contexte réel.

À travers cette approche, nous espérons proposer une solution concrète, simple à déployer et capable de répondre efficacement aux enjeux de fiabilité, de sécurité et de contrôle dans les stations-service.

Chapitre I. Réservoirs de stockage

Chapitre I. Réservoirs de stockage

I.1 Introduction

Les réservoirs de stockage jouent un rôle fondamental dans de nombreux secteurs industriels, en assurant la conservation de divers types de liquides selon leur nature et leurs conditions d'utilisation. Afin de garantir une gestion optimale et un suivi rigoureux de ces installations, il est indispensable de bien distinguer les différentes catégories de réservoirs, d'en comprendre les caractéristiques techniques, ainsi que d'identifier les facteurs déterminants dans leur choix et leur mise en œuvre.

I.2 Réservoirs de stockage

I.2.1 Définition

Un réservoir de stockage est un dispositif destiné à l'entreposage de substances sous forme liquide, gazeuse ou solide (en vrac), en fonction des besoins industriels ou logistiques. Les réservoirs de stockage peuvent être fabriqués à partir de divers matériaux tels que l'acier, le plastique et le béton, en fonction des propriétés du liquide et de la substance à stocker [1].

I.2.2 Classification des réservoirs de stockage

Les réservoirs de stockage peuvent être classés selon plusieurs critères, notamment :

- **L'emplacement** (réservoirs aériens ou enterrés),
- **Les matériaux de fabrication** (acier, béton, plastique, etc.),
- **La forme et les fonctionnalités** (réservoirs cylindriques, sphériques, à toit flottant, à pression, etc.).

Cette classification permet d'adapter le choix du réservoir aux contraintes techniques, économiques et environnementales propres à chaque projet.

I.2.2.1 Emplacement des réservoirs

Les réservoirs peuvent être installés en surface, enterrés ou souterrains, selon les contraintes d'espace, de sécurité, d'environnement ou de réglementation.

- **Réservoirs aériens (installés en surface) :** Ils sont placés au-dessus du sol ou montés sur des engins mobiles, tels que les camions-citernes. Ce type de réservoir présente l'avantage d'être facilement accessible pour l'inspection, la maintenance et les réparations.
- **Réservoirs enterrés :** Ces réservoirs sont enterrés sous terre, ce qui permet d'économiser de l'espace et de protéger le liquide stocké contre les variations de

Chapitre I. Réservoirs de stockage

température extérieure. Ils sont principalement utilisés pour le stockage de carburants et de produits chimiques [1].



Figure 1 : Réservoirs aériens - enterrés (station-service Mostaganem).

I.2.2.2 Les Matériaux de fabrication

Les réservoirs de stockages peuvent être fabriqués en **acier**, **béton**, **plastique** ou à partir de matériaux composites, le choix dépendant principalement de la nature des produits à stocker, de la durabilité souhaitée et des conditions environnementales.

- **Acier (carbone ou inoxydable)** : les réservoirs en acier sont utilisés pour stocker les produits pétroliers tels que le diesel et l'essence, l'acier inoxydable est privilégié pour les produits corrosifs comme l'éthanol ou à haute température comme huiles chauffées.
- **PRFV (plastique Renforcé de fibre de verre)** : les réservoirs en PRFV sont conçus pour stocker les produits chimiques agressifs tels que l'acides et les solvants organiques.
- **Béton** : les réservoirs en béton sont utilisés pour stocker les produits pétroliers non corrosifs en grandes quantités tels que le pétrole brut et les condensats de gaz naturel.
- **Réservoirs composites** : Ces réservoirs combinent une enveloppe externe en acier pour la résistance mécanique et une doublure interne en PRFV pour la protection chimique, ils stockent les carburants.
- **Plastique (polyéthylène)** : les réservoirs en plastique sont utilisés pour stockés des produits non dangereux tels que l'eau, huiles végétales et lubrifiants légers [2].

Chapitre I. Réservoirs de stockage

I.2.2.3 Forme des réservoirs

Qu'ils soient atmosphériques ou sous pression, les réservoirs se déclinent en plusieurs types selon leur forme géométrique et leur utilisation spécifique.

a) Réservoirs sous pression

Les réservoirs sous pression sont conçus pour stocker des fluides (liquides ou gaz) à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Ils sont largement utilisés dans divers secteurs industriels, tels que le pétrole, le gaz, la chimie, ainsi que l'industrie agroalimentaire. On distingue principalement deux types de réservoirs sous pression :

➤ Réservoir sphérique

Le réservoir sphérique est un récipient sous pression, fréquemment utilisé dans les raffineries pour le stockage de liquides sous pression tels que le propane et le butane. Sa forme sphérique permet une répartition uniforme de la pression interne, offrant ainsi une excellente résistance mécanique. Ces réservoirs peuvent supporter des pressions allant de 8 à 25 bars [3].



Figure 2 : Réservoir sphérique [4].

➤ Réservoirs horizontaux

Les réservoirs horizontaux sont des récipients cylindriques allongés conçus pour contenir des liquides ou des gaz liquéfiés sous pression, comme le gaz de pétrole liquéfié (GPL – propane et butane) ou certains produits chimiques. Ils sont couramment utilisés dans les raffineries, les stations-service et diverses industries [3].



Figure 3 : Réservoir horizontale (station-service Mostaganem).

b) Réservoirs atmosphériques

Un réservoir atmosphérique est destiné au stockage de liquides à une pression proche de la pression atmosphérique. Ce type de réservoir est principalement utilisé dans les industries pétrolières et chimiques pour stocker des produits peu volatils. On distingue deux formes principales, selon le type de liquide stocké et le besoin de limiter les pertes par évaporation [4].

➤ Réservoir à toit fixe

Le réservoir à toit fixe est un réservoir atmosphérique muni d'un toit rigide, généralement en acier, soudé ou fixé aux parois du réservoir. Il est adapté au stockage de liquides peu volatils. Pour éviter les surpressions, ce type de réservoir est souvent équipé d'évents ou de soupapes, permettant l'évacuation des vapeurs [4].

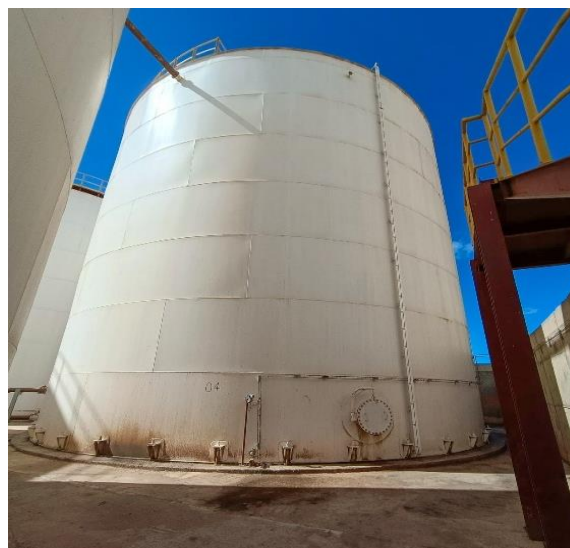


Figure 4 : Réservoir à toit fixe (SARL COFEED-Mohammedia).

Chapitre I. Réservoirs de stockage

➤ Réservoir à toit flottant

Le réservoir à toit flottant est un réservoir atmosphérique dont le toit repose directement sur la surface du liquide stocké, s'élevant ou s'abaissant selon le niveau du produit. Cette conception permet de réduire significativement les pertes par évaporation et de limiter les risques d'inflammation, ce qui en fait une solution idéale pour le stockage de liquides volatils tels que l'essence ou le pétrole brut [4].



Figure 5 : Réservoir à toit flottante (NZ1-SONATRACH).

I.3 Capacité des réservoirs

Le calcul de la capacité d'un réservoir dépend essentiellement de sa forme géométrique. Les méthodes de calcul varient selon que le réservoir soit sphérique, cylindrique vertical ou cylindrique horizontal. La capacité est généralement exprimée en litres (L) ou en mètres cubes (m^3).

Pour déterminer le volume d'un réservoir, qu'il soit totalement ou partiellement rempli, des formules spécifiques sont appliquées à chaque type de géométrie.

I.3.1 Réservoir cylindrique vertical

Le volume de liquide contenu dans un réservoir cylindrique vertical est déterminé à l'aide de la formule suivante [5] :

$$V = \pi R^2 H = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (I)$$

où :

- D : diamètre du réservoir,

Chapitre I. Réservoirs de stockage

- R : rayon ($R=D/2$),
- H : hauteur de liquide dans le réservoir.

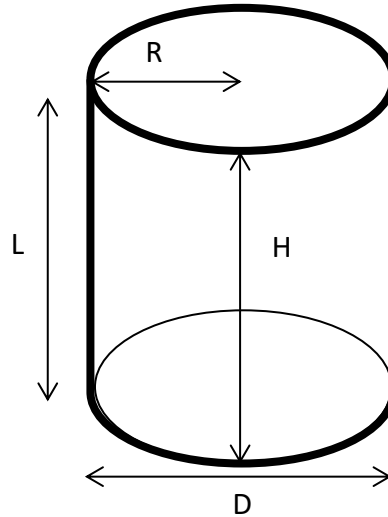


Figure 6 : Réservoir cylindrique vertical.

I.3.2 Réservoir cylindrique horizontal

Le calcul du volume d'un réservoir cylindrique horizontal dépend de son diamètre, de sa longueur, ainsi que de la hauteur de liquide présente à l'intérieur [5].

Le principe de calcul repose sur la détermination de l'aire de la surface partiellement remplie (segment circulaire), que l'on multiplie ensuite par la longueur du réservoir pour obtenir le volume total.

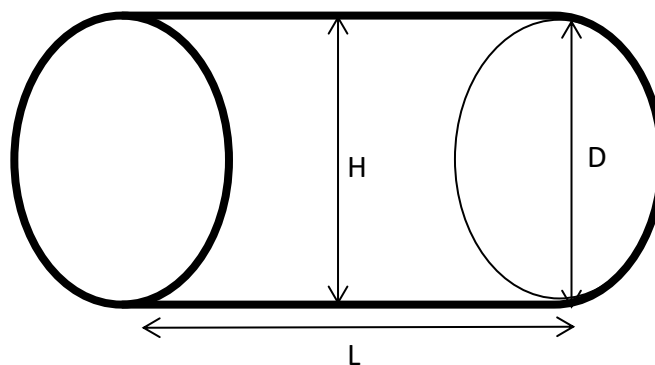


Figure 7 : Réservoir cylindrique horizontal.

D'après la géométrie analytique : :

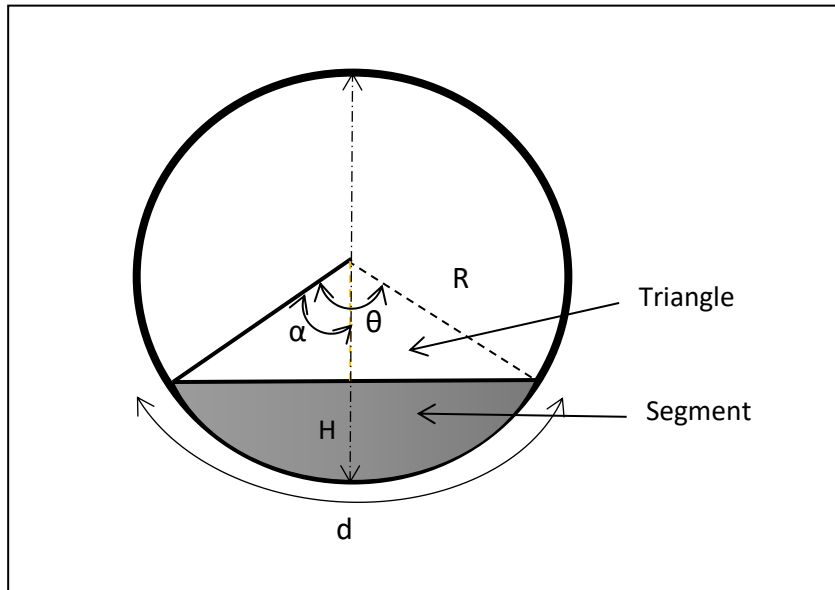


Figure 8 : Segment et secteur.

L'aire du segment circulaire (AS) est donnée par [5] :

$$AS = AC - AT \quad (II)$$

où :

- AS : aire du segment circulaire,
- AC : aire du secteur circulaire,
- AT : aire du triangle associé.

La formule détaillée de l'aire du segment est la suivante :

$$AC = \frac{1}{2} dR = \frac{1}{2} R^2 \theta \quad (III)$$

Où :

$$\theta = \frac{d}{R} = 2 \cos^{-1} \frac{R - H}{R} \quad (IV)$$

$$AS = \frac{1}{2} R^2 (\theta - \sin \theta) = R^2 \cos^{-1} \frac{R - H}{R} - (R - H) \sqrt{2RH - H^2} \quad (V)$$

Le volume partiel V_p s'obtient alors en multipliant l'aire AS par la longueur L du réservoir [5] :

$$Vp = L \left[R^2 \cos^{-1} \frac{R-H}{R} - (R-H) \sqrt{2RH - H^2} \right] \quad (VI)$$

Remarque : L'angle $\cos^{-1}(\cdot)$ est exprimé en **radians**.

Par ailleurs, dans le cas des réservoirs cylindriques horizontaux, plusieurs formes de fonds peuvent être utilisées, telles que les fonds hémisphériques, torisphériques ou semi-elliptiques. Chacun de ces types présente des caractéristiques géométriques et mécaniques spécifiques, et nécessite une méthode de calcul adaptée pour déterminer la capacité réelle. Ci-dessous sont détaillées les méthodes de calcul associées à chaque type.

I.3.2.1 Fonds hémisphériques

La profondeur z de ce type de fond est égale au rayon intérieur de la tête, ce qui correspond également à la moitié du diamètre intérieur du réservoir.

Les fonds hémisphériques sont couramment utilisés lorsque des pressions de conception élevées sont requises. Toutefois, en raison de leur complexité de fabrication, ils sont plus coûteux que les autres types de fonds [5].

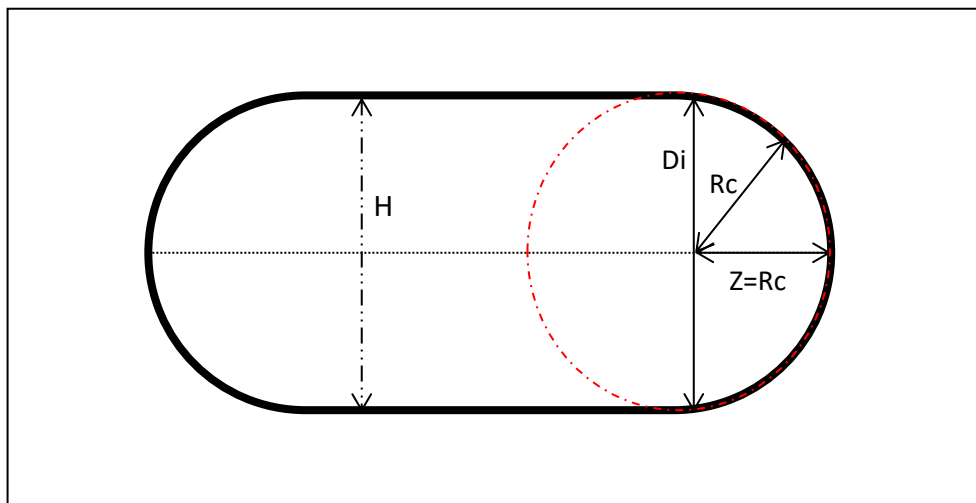


Figure 9 : Réservoir avec fonds hémisphériques.

Le **volume total** du fond est donné par l'équation suivante [5] :

$$Vc = \frac{2}{3} \pi Rc^3 \quad (VII)$$

où Rc est le rayon de la calotte intérieure

$$R_c = \frac{D_i}{2} \quad \text{(VIII)}$$

D_i : diamètre intérieur.

Le **volume partiel** occupé par le liquide est calculé par [5] :

$$V_p = D_i^3 C \frac{\pi}{12} \left[3 \frac{H^2}{D_i^2} - 2 \frac{H^3}{D_i^3} \right] \quad \text{(IX)}$$

où C a une valeur de 1 selon le code ASME et H représente la hauteur du liquide à l'intérieur du fond

I.3.2.2 Fonds torisphériques

Les fonds torisphériques sont les **plus économiques** et les **plus répandus** dans les réservoirs de traitement [5].

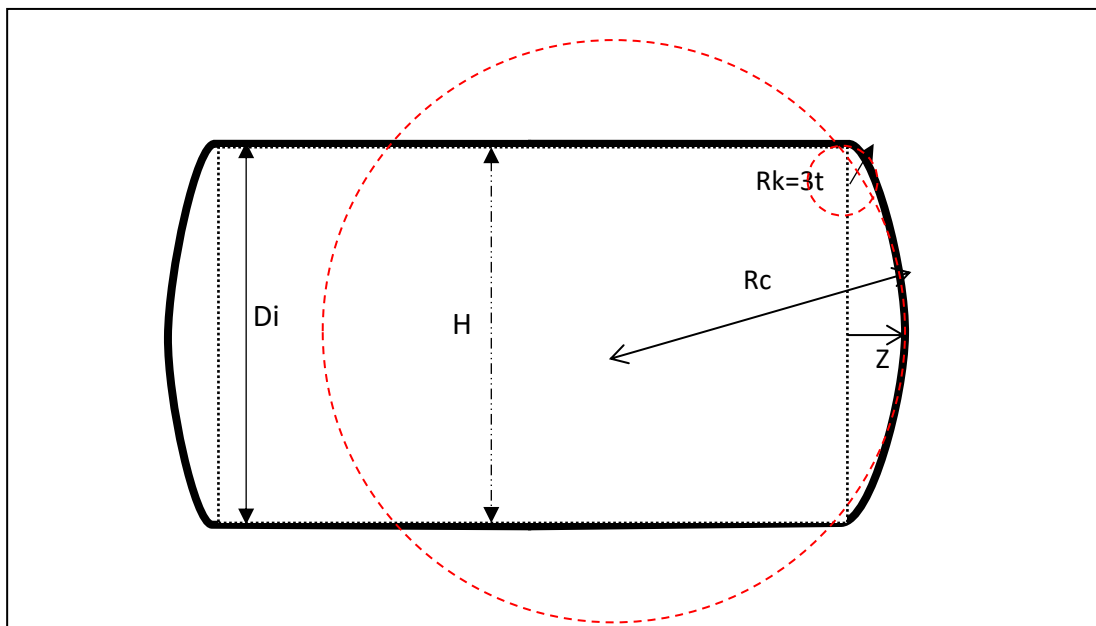


Figure 10 : Réservoir avec fond torisphérique.

La profondeur z de ce fond est donnée par l'équation [5] :

$$z = R_c - \sqrt{(R_c - R_k) - \frac{D_{ext}}{2} - t - R_k} \quad \text{(X)}$$

Chapitre I. Réservoirs de stockage

où :

t : épaisseur de la paroi.

Dext : diamètre extérieur du réservoir, défini par : $D_{ext}=D_i+t$

Rk : rayon du bord concave, défini selon les normes de conception : $R_k=3t$

Rc : rayon de la calotte interne, approximativement égal au diamètre extérieur : $R_c=D_{ext}$

Le **volume partiel** de liquide est déterminé par la même équation que pour le fond hémisphérique, avec une constante **C** spécifique [5] :

$$V_p = d_i^3 C \frac{\pi}{12} \left[3 \frac{H^2}{d_i^2} - 2 \frac{H^3}{d_i^3} \right] \quad (XI)$$

Ou la constante C pour les fonds torisphérique est calculé selon le code ASME par l'équation suivante :

$$C = 0.30939 + 1.7197 \left(\frac{R_k - 0.06 D_{ext}}{D_i} \right) - 0.16116 \frac{t}{D_{ext}} + 0.998997 \frac{t}{D_{ext}} \quad (XII)$$

Enfin, le **volume total** du fond torisphérique est donné par [5] :

$$V_c = 0.9 \left[\left(\frac{2\pi R C^2}{3} \right) z \right] \quad (XIII)$$

I.3.2.3 Fonds semi-elliptiques

Les fonds semi-elliptiques présentent une profondeur intermédiaire entre celle des fonds hémisphériques et torisphériques. Les pressions de conception associées sont également comprises entre celles supportées par les deux types précédents.

Le fond semi-elliptique le plus couramment utilisé est celui avec un rapport 2:1, dont la profondeur (z) est égale à un quart du diamètre du récipient, $\frac{1}{4} d_i$ [5].

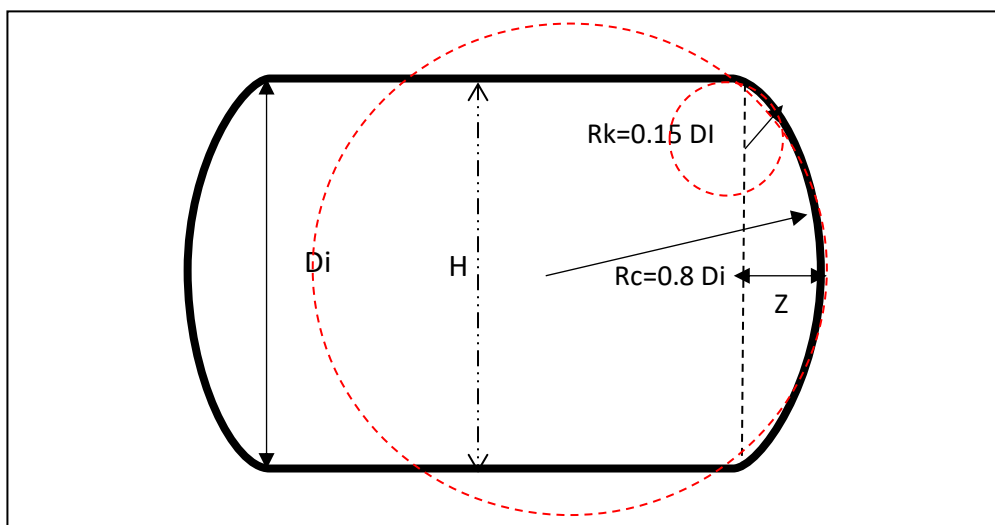


Figure 11 : Fond semi-elliptique.

Chapitre I. Réservoirs de stockage

Le volume partiel d'un liquide dans une enveloppe semi-elliptique est obtenu avec [5] :

$$V_p = di^3 C \frac{\pi}{12} \left[3 \frac{H^2}{di^2} - 2 \frac{H^3}{di^3} \right] \quad (XIV)$$

Le volume total du fond est déterminé par l'équation suivante [5] :

$$V_c = \frac{\pi di^3}{24} \quad (XV)$$

Où C a une valeur de $\frac{1}{2}$ selon le code ASME.

I.3.3 Réservoir sphérique

Le volume total d'un réservoir sphérique est déterminé par l'équation suivante [5] :

$$V_c = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{1}{6} \pi D^3 \quad (XVI)$$

Le calcul du volume partiel d'un réservoir sphérique s'effectue selon la formule mathématique suivante [5] :

$$V_p = \frac{\pi}{3} H^2 (1.5D - H) \quad (XVII)$$

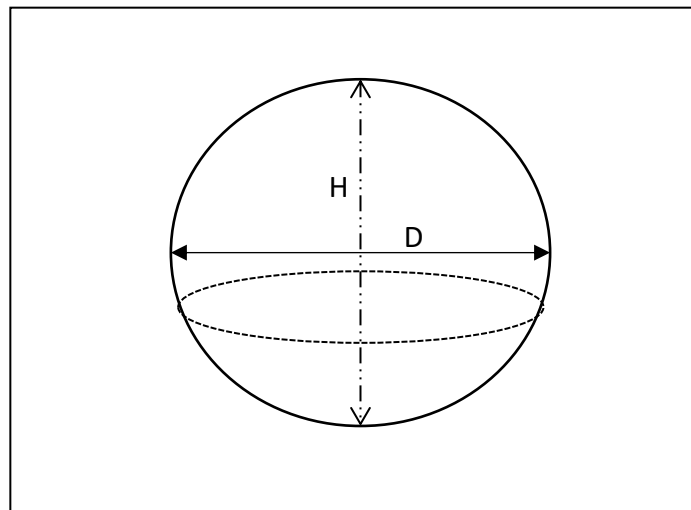


Figure 12 : Réservoir sphérique.

I.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté une vue d'ensemble des réservoirs de stockage, en mettant en évidence les principaux facteurs qui influencent leur conception et leur utilisation. En

Chapitre I. Réservoirs de stockage

particulier, l'emplacement, les matériaux de fabrication et la forme géométrique des réservoirs sont des éléments clés qui déterminent à la fois la capacité de stockage et les performances opérationnelles.

Par ailleurs, la maîtrise des méthodes de calcul du volume, notamment pour les réservoirs cylindriques et sphériques, s'avère essentielle pour assurer un suivi précis du niveau de liquide. Cela permet non seulement de garantir une gestion optimale du contenu, mais aussi de contribuer à l'efficacité et à la sécurité de nombreux procédés industriels.

Chapitre II. Mesure de niveau

Chapitre II. Mesure de niveau

II.1 Introduction

Dans les systèmes de stockage de liquides, la mesure précise du niveau des substances est indispensable pour assurer une gestion efficace et sécurisée. Cependant, le volume réel des liquides peut varier en fonction de la température, en raison du phénomène de dilatation thermique.

Ce chapitre présente un aperçu général des principales techniques de mesure utilisées dans l'industrie, en mettant l'accent sur les méthodes de mesure de niveau ainsi que sur les capteurs de température associés, indispensables pour garantir une lecture fiable et adaptée aux conditions de fonctionnement.

II.2 Mesure de niveau

La mesure de niveau regroupe l'ensemble des méthodes et techniques permettant de déterminer avec précision la hauteur et, par extension, le volume des substances stockées dans un réservoir.

II.2.1 Méthodes de mesure du niveau

Le choix de la méthode de mesure dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature du produit stocké (liquide, visqueux, corrosif, etc.), les caractéristiques du réservoir (taille, forme, accès) et les conditions d'exploitation (pression, température, atmosphère explosive, etc.). Dans l'industrie, les méthodes de mesure de niveau les plus couramment utilisées sont présentées dans les paragraphes suivants.

II.2.1.1 Mesure manuelle

La mesure manuelle est une méthode traditionnelle de mesurer le niveau des réservoirs, compatible avec la plupart des bacs atmosphériques. Elle repose sur l'utilisation d'un ruban de mesure spécialement conçu, souvent en acier inoxydable, équipé d'un poids à l'extrémité et gradué en millimètres ou en fractions de pouces. Cette technique permet de mesurer le niveau de liquide dans un réservoir en déterminant soit le creux (niveau bas), soit le plein (niveau haut). Elle sert également de méthode de vérification pour l'étalonnage et l'évaluation des performances des jauges modernes [6].

II.2.1.2 Mesure à flotteur

Un flotteur est un instrument servant à mesurer le niveau d'un liquide à l'intérieur d'un réservoir. En effet, le flotteur va monter ou descendre en fonction du niveau du liquide, et cette

Chapitre II. Mesure de niveau

variation sera transformée par un mécanisme qui permettra l’affichage visuel sur une échelle. [6].



Figure 13 : Réservoir avec échelle graduée de lecture du niveau mesurer par un flotteur (SARL COFEED-Mohammedia).

II.2.1.3 Mesure par Ultrasons

La mesure de niveau par ultrasons repose sur le principe du temps de vol d’une onde acoustique. Un capteur émet un train d’impulsions ultrasonores qui se propage jusqu’à la surface du liquide ou du produit à mesurer. L’écho généré par la réflexion de ces ondes est ensuite reçu par le capteur.

La distance entre le capteur et la surface du produit est déterminée en mesurant le temps écoulé entre l’émission et la réception du signal, cette durée étant proportionnelle à la hauteur de niveau. Cette méthode est sans contact et convient particulièrement aux environnements difficiles ou aux substances agressives [7].

Chapitre II. Mesure de niveau

II.2.1.4 Mesure par radar

La technique de mesure par radar repose essentiellement sur la transmission et la réception d'ondes électromagnétiques en vue de déterminer la distance d'une surface dite cible. Un capteur radars émet un signal radio qui se propage dans l'espace jusqu'à la surface produit, se réfléchit puis revient au capteur. Suivant la méthode employée, la distance est déterminée soit par analyse du temps écoulé entre l'émission du signal et sa réception (méthode à impulsions soit par analyse de la variation de fréquence de l'onde émise et de l'onde réfléchie (méthode FMCW). Ces principes permettent de réaliser une mesure précise du niveau du produit dans un réservoir. [7].

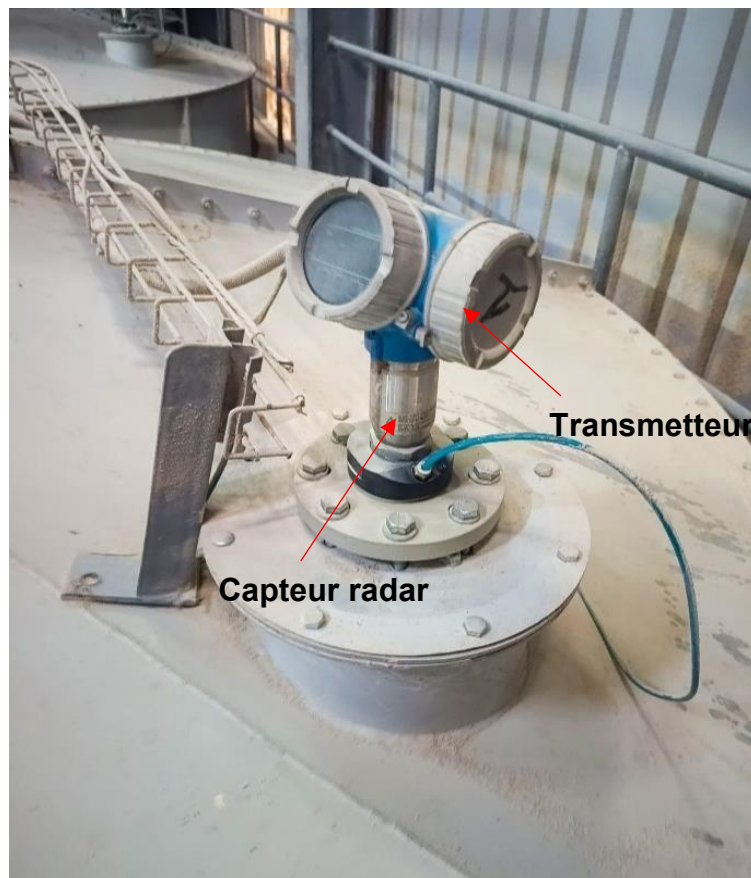


Figure 14 : Capteur radar (SARL COFEED-Mohammedia).

II.2.1.5 Mesure par pression hydrostatique et différentielle

La mesure du niveau par pression hydrostatique, utilisée dans les réservoirs ouverts, repose sur l'évaluation de la pression exercée par la colonne de liquide. En effet, la pression mesurée au fond du réservoir est directement proportionnelle à la hauteur du liquide. Cette pression est captée à l'aide d'un capteur de pression immergé ou fixé à la base du réservoir, permettant de déduire le niveau selon la relation suivante [7] :

Chapitre II. Mesure de niveau

$$P = \rho \cdot g \cdot H$$

où :

P : la pression hydrostatique (Pa).

ρ : la densité du liquide (kg/m^3).

g : l'accélération de la gravité (m/s^2).

H : la hauteur de la colonne de liquide (m).

Pour mesurer le niveau dans les réservoirs fermés, on utilise la pression différentielle, qui repose sur la comparaison de la pression entre deux points d'un réservoir. Un capteur mesure la différence de pression entre le bas du réservoir, où la pression est influencée par la hauteur du liquide, et un point de référence situé plus haut. Cette différence de pression permet de déterminer avec précision le niveau du liquide, indépendamment des variations de pression atmosphérique [7].

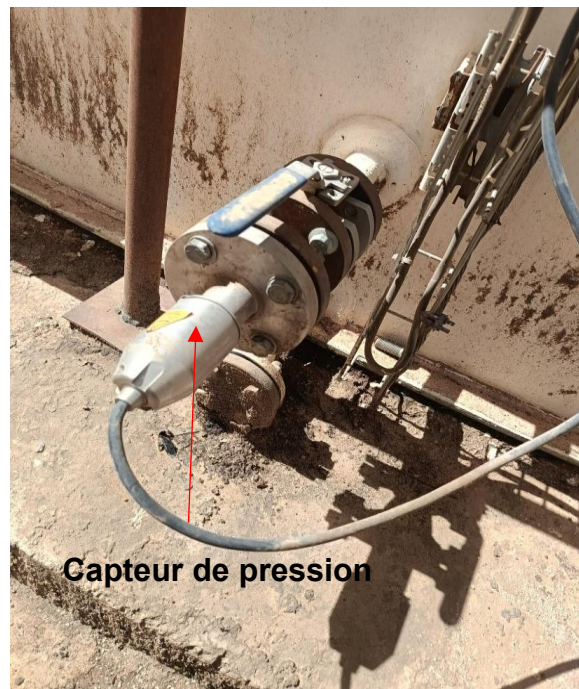


Figure 15 : capteur de pression (SARL COFEED-Mohammadia).

II.3 Mesure de température

Dans les systèmes de stockage de liquides, la prise en compte de la température est essentielle, car elle influence directement les phénomènes de dilatation ou de contraction des fluides. Ces variations de volume peuvent entraîner des erreurs dans l'évaluation du niveau réel du liquide dans le réservoir. Ainsi, le contrôle précis de la température est indispensable pour

Chapitre II. Mesure de niveau

assurer une gestion fiable des stocks, optimiser les mesures de niveau et garantir la cohérence des données de suivi.

II.3.1 Capteur de mesure de la température

Il existe plusieurs types de capteurs permettant de mesurer la température dans les réservoirs. Le choix du capteur dépend de plusieurs facteurs, tels que les conditions d'utilisation, la plage de température à mesurer, la nature du liquide, ainsi que les contraintes d'installation. Les capteurs les plus couramment utilisés dans les applications industrielles sont présentés dans les sections suivantes.

II.3.1.1 Thermomètres à résistance (RTD)

Le RTD (Resistance Temperature Detector) est un capteur de température qui est utilisé pour mesurer la température avec une précision parfaite. Son principe d'action repose sur la variation de la résistance électrique d'un métal en fonction de la température. Le platine est très souvent choisi pour son niveau élevé de précision et sa stabilité chimique. Le modèle le plus courant, le PT100, a une résistance de 100 ohms à 0°C mais sa résistance varie de manière prévisible lorsque la température augmente ce qui permet aux systèmes de mesure de déterminer la température avec une précision intégrale [8].

Les capteurs RTD sont largement utilisés dans des industries comme le pétrole, la chimie et l'agroalimentaire, où les exigences sont :

- Une grande précision (jusqu'à $\pm 0,1^\circ\text{C}$).
- Une stabilité durable.
- Une répétabilité constante, assurant des résultats identiques dans les mêmes conditions.

Ils peuvent mesurer des températures allant de -200°C à $+850^\circ\text{C}$, ce qui les rend adaptés aux environnements industriels les plus exigeants [8].

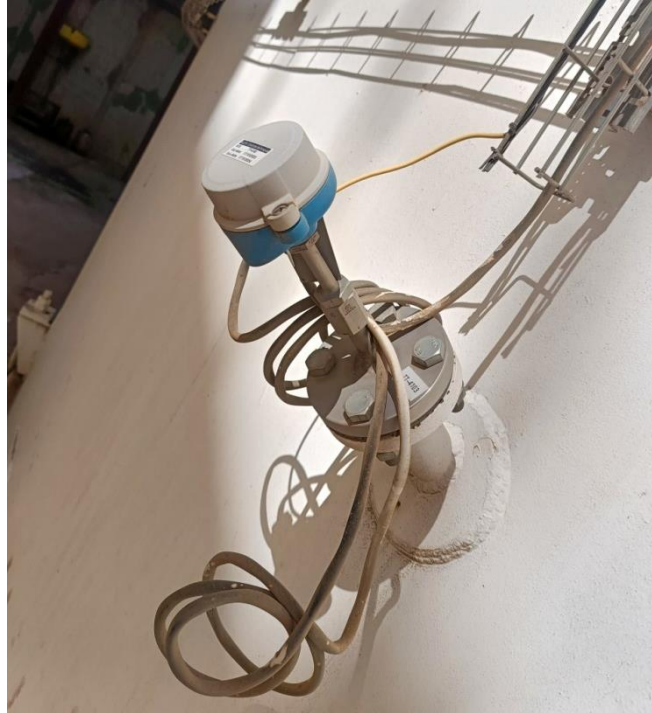


Figure 16: capteur de température RTD (SARL COFEED-Mohammadia)

II.3.1.2 Thermocouples

Le thermocouple est un capteur de température basé sur l'effet thermoélectrique. Il est constitué de deux fils métalliques de nature différente, reliés à une extrémité pour former une jonction chaude, tandis que l'autre extrémité, appelée jonction froide, est connectée au circuit de mesure. Lorsque ces deux extrémités sont exposées à des températures différentes, une tension électrique est générée, permettant de déterminer la température de la jonction chaude. Grâce à leur simplicité de conception, leur robustesse et leur capacité à fonctionner sur une large plage de températures, les thermocouples sont largement utilisés dans des environnements industriels exigeants, notamment dans la chimie, le pétrole et la métallurgie, où des mesures rapides et fiables sont essentielles. Cependant, leur faible signal électrique nécessite une amplification avant l'exploitation des données, et une attention particulière doit être portée à la compensation de la soudure froide pour garantir une mesure précise [9].

II.3.1.3 Thermistances

Le capteur de température thermistance fonctionne sur le principe de la variation de sa résistance électrique en fonction de la température. Contrairement aux métalliques purs utilisés pour les RTD (platinum par exemple), la thermistance est constituée d'oxydes métalliques frittés, c'est-à-dire auxquels on applique de fortes pressions puis une forte température pour les obtenir sous forme de matériau résistant et stable. [10].

Chapitre II. Mesure de niveau

Il existe deux types de thermistances, classées selon la manière dont leur résistance évolue avec la température :

- **Les thermistances NTC (à Coefficient de Température Négatif) :** leur résistance diminue lorsque la température augmente. Elles sont les plus couramment utilisées, notamment pour la mesure de température.
- **Les thermistances PTC (à Coefficient de Température Positif) :** leur résistance augmente lorsque la température augmente. Elles sont souvent utilisées comme dispositifs de protection contre les surchauffes [10].

II.4 Conclusion

La gestion efficace et sécurisée des réservoirs repose sur une évaluation précise du niveau et de la température des liquides qu'ils contiennent. Ce chapitre a présenté les différentes techniques de mesure disponibles, allant des méthodes traditionnelles aux technologies modernes telles que les capteurs à ultrasons ou radar, permettant de répondre aux exigences spécifiques des différentes applications industrielles.

Par ailleurs, la température, qui influence le volume des liquides en raison du phénomène de dilatation thermique, doit faire l'objet d'un suivi rigoureux et continu. Pour cela, des dispositifs tels que les RTD, thermocouples ou thermistances sont couramment utilisés.

En combinant une mesure fiable de ces deux paramètres — niveau et température — les industriels peuvent assurer une gestion optimale des stocks, réduire les risques opérationnels et améliorer les performances globales de leurs systèmes de stockage.

**Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure
du niveau**

Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau

III.1 Introduction

Ce chapitre présente la mise en œuvre concrète du système de mesure du niveau de gasoil développé dans le cadre de ce projet. Il expose l'ensemble des étapes de réalisation, depuis la conception matérielle jusqu'à l'évaluation expérimentale du dispositif.

Dans un premier temps, le schéma d'implémentation matériel et les modules électroniques utilisés sont détaillés. Ensuite, l'organigramme de fonctionnement du système est présenté afin d'illustrer la logique de traitement adoptée. La suite du chapitre est consacrée aux mesures expérimentales effectuées, accompagnées d'une analyse critique des résultats obtenus. Enfin, des illustrations du système réalisé viennent compléter cette présentation pour offrir une vision concrète de l'implémentation.

III.2 Schéma d'implémentation

Le schéma ci-dessous illustre la connexion des différents composants du système :

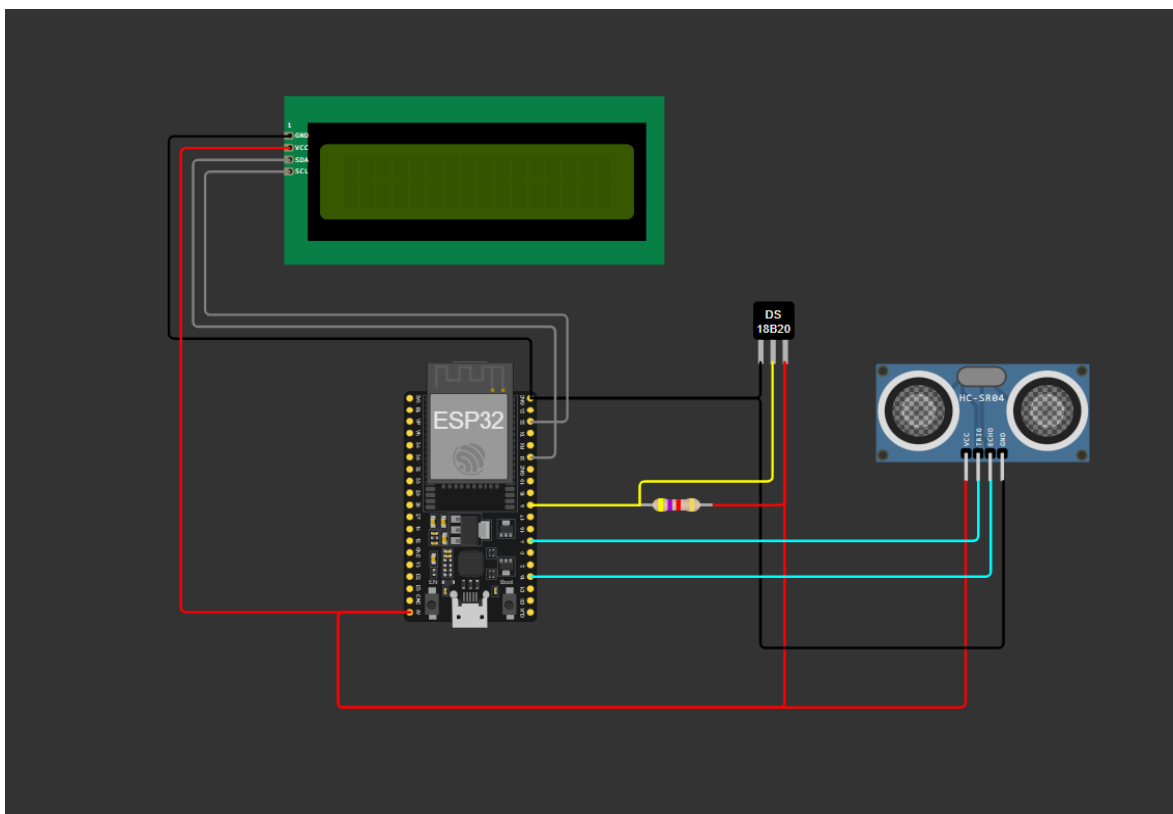


Figure 17 : Schéma de câblage du système de mesure

Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau

III.2.1 Les composants utilisés

Dans cette section, nous présentons les principaux composants matériels utilisés pour la réalisation du système de mesure, en mettant en évidence leur rôle et leurs caractéristiques.

ESP32-WROOM-32 : Nous avons utilisé la carte de développement ESP32 comme microcontrôleur principale, elle offre une connectivité WIFI intégrée, une bonne puissance de traitement, et plusieurs entrées/sorties numérique et analogique. Les caractéristiques détaillées sont données en annexe A.

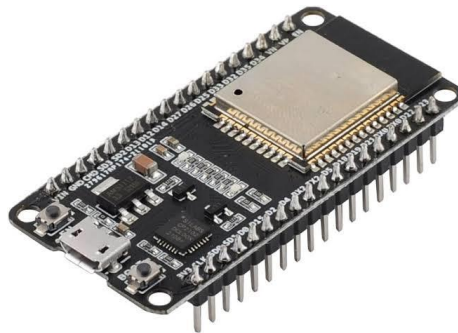


Figure 18 : ESP32-WROOM-32

Capteur à ultrasons JSN-SR04T: Ce capteur est utilisé pour mesurer la distance entre la surface du liquide et le haut du réservoir. Ce capteur est adapté à une utilisation en extérieur ou en environnement humides grâce à sa sonde étanche, il est capable de mesurer jusqu'à 6 m avec une zone aveugle d'environ 20 cm. Plus de détails en annexe B.



Figure 19 : capteur à ultrasons JSN-SR04T

Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau

Capteur de température DS18B20 : Nous avons utilisé Le capteur de température DS18B20 pour mesurer la température du liquide.il est étanche résistant à l'eau et à la poussière, ce qui rend adaptés aux environnements industriels ou humides.il communique avec l'ESP32 via le protocole ONEWIRE. Les caractéristiques détaillées sont données en annexe C.



Figure 20 : capteur de température DS18B20

Ecran LCD I2C 16x2 : Nous avons utilisé l'écran LCD I2C pour l'affichage local de l'adresse IP, du niveau du réservoir et de la température. Nous avons utilisé la version I2C afin de réduire le câblage et faciliter l'intégration avec l'ESP32. Plus de détails en annexe D.

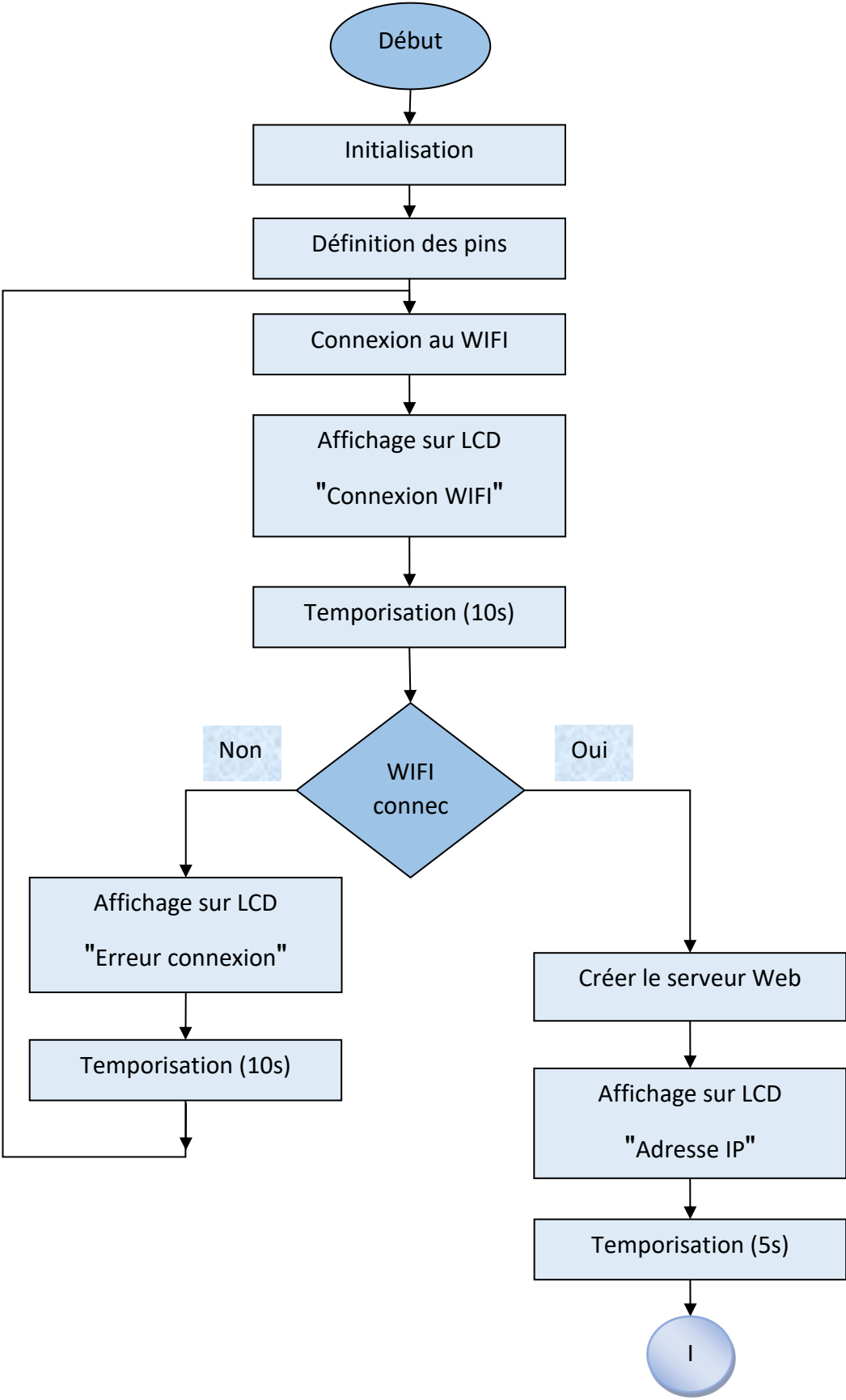


Figure 21 : Ecran LCD 16x2 i2C

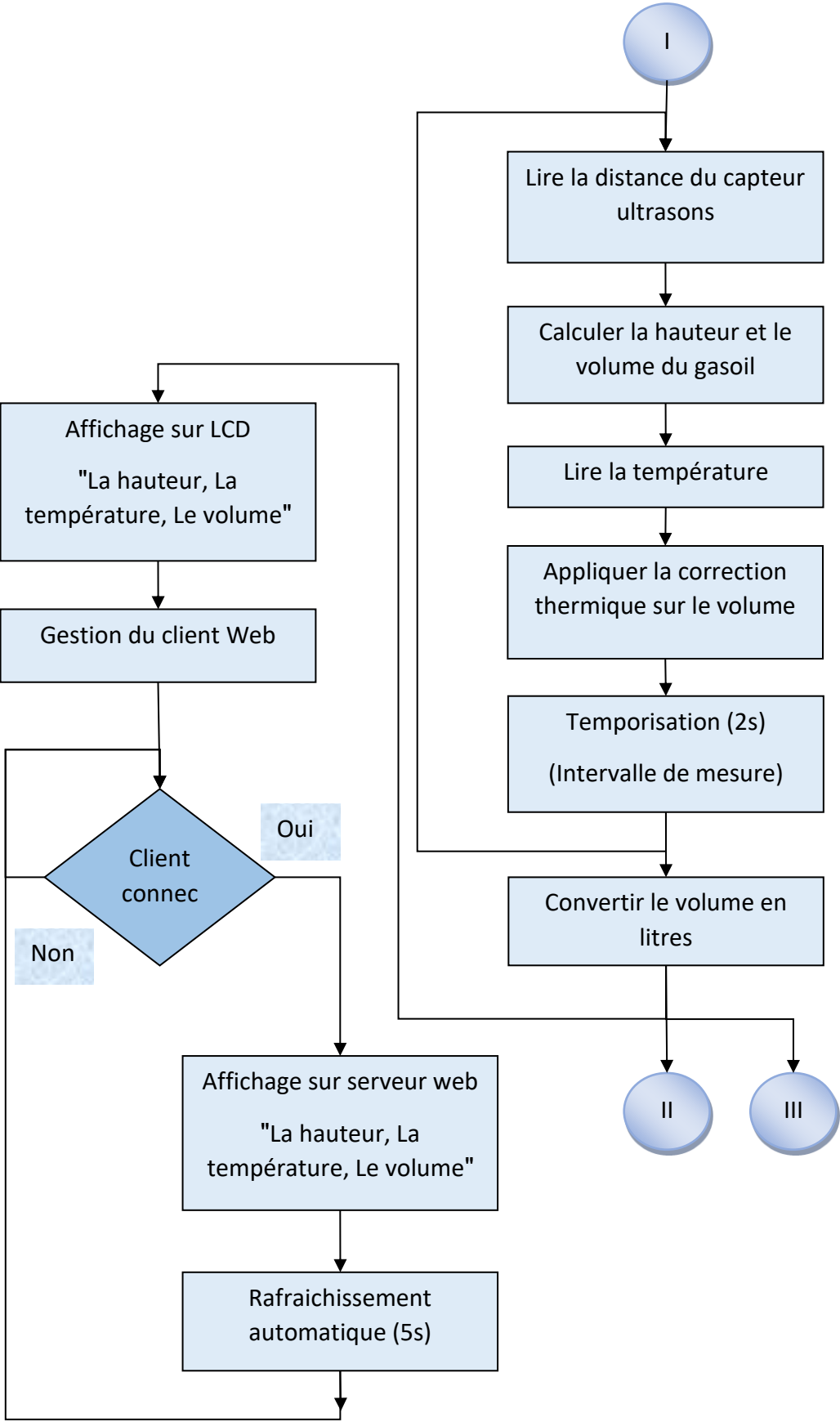
Alimentation : nous avons utilisé une alimentation externe régulée 5v pour fournir l'énergie nécessaire au système.

III.3 L'organigramme

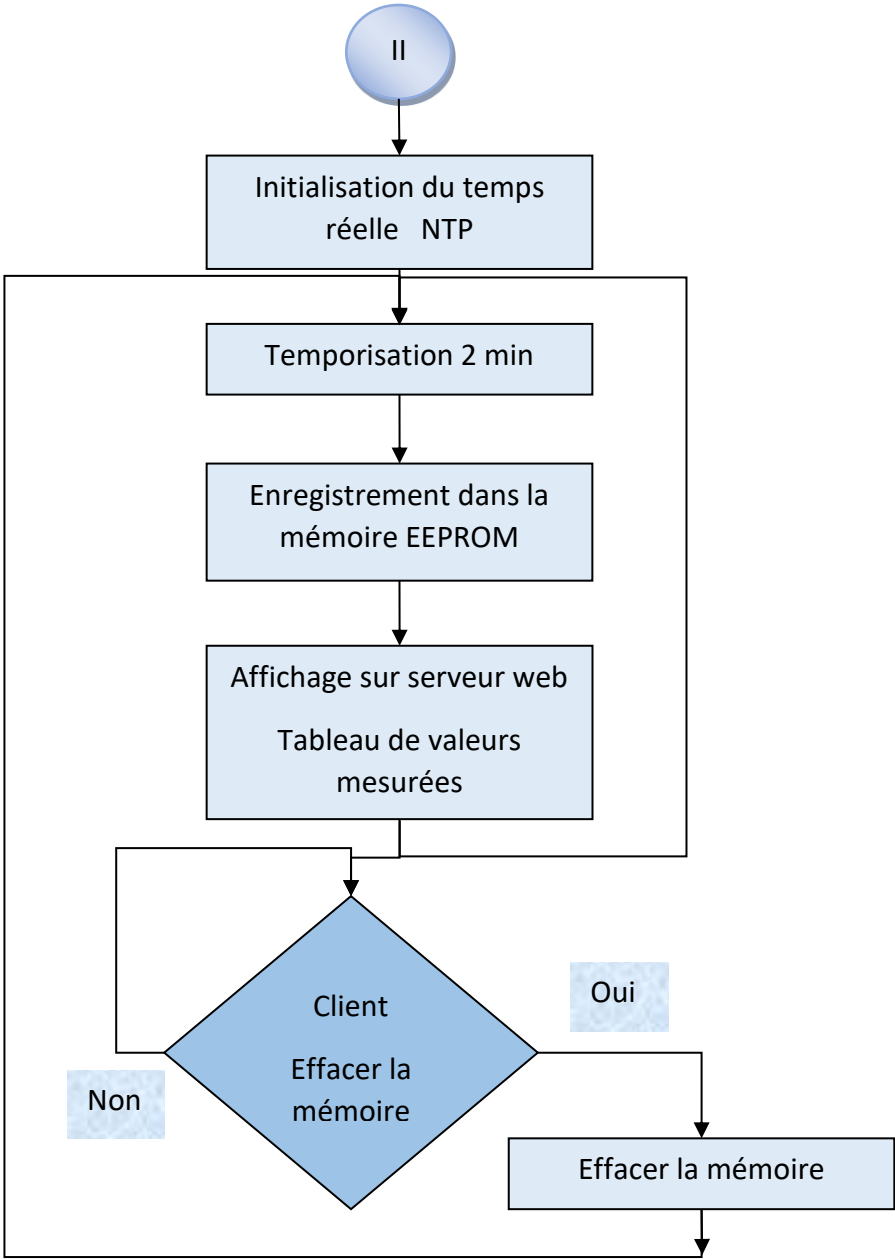
Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau

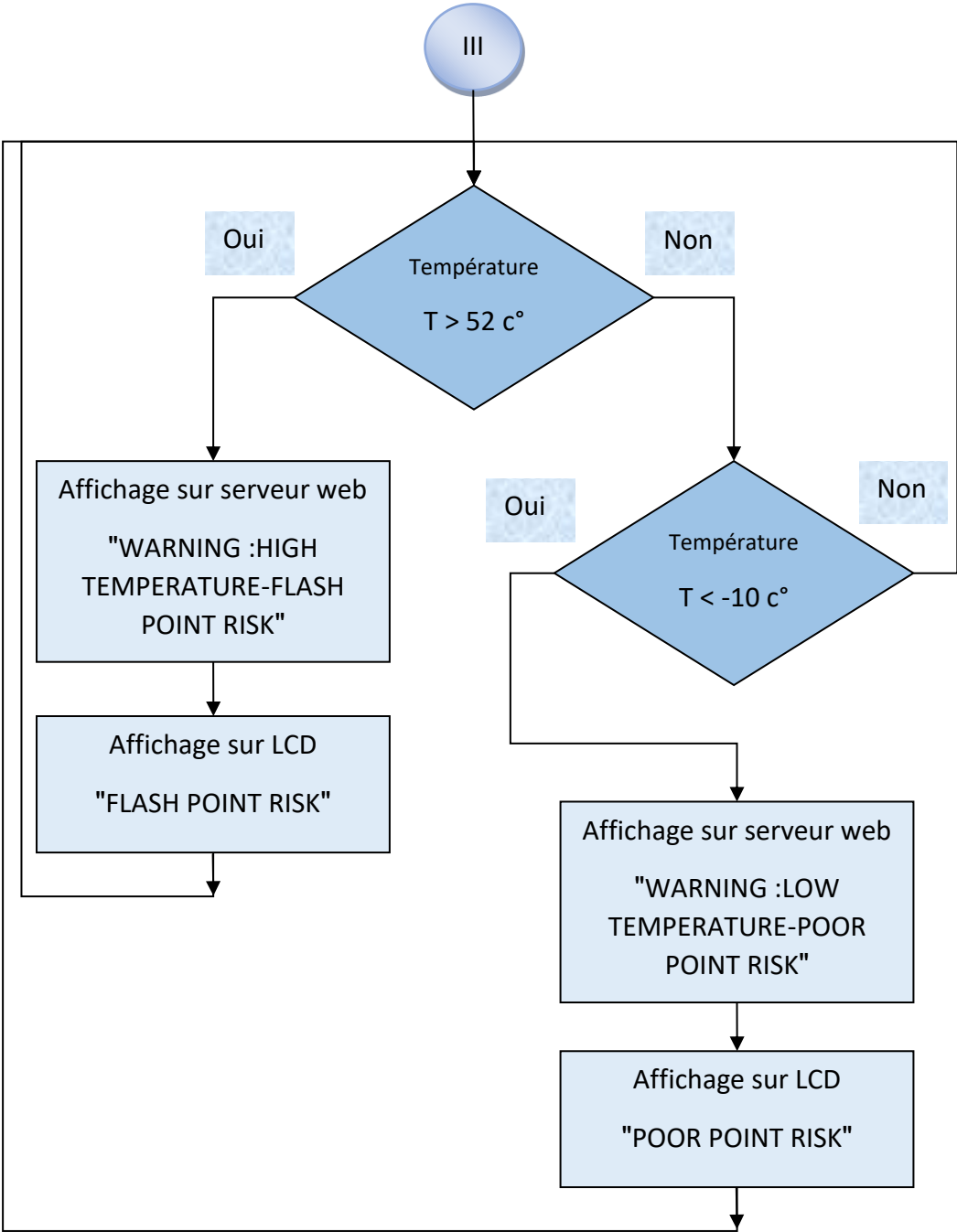


Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau



Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau





Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau

III.4 Tests expérimentaux

Dans le cadre de la vérification de la fiabilité de notre système de mesure du niveau de gasoil, deux tests expérimentaux ont été réalisés.

Le premier test consiste en une simulation de remplissage d'un réservoir vide de 32 m³, à l'aide d'un objet physique représentant la surface du liquide, afin d'évaluer la réactivité et la précision du capteur dans des conditions contrôlées.

Le deuxième test a été effectué sur un réservoir domestique d'eau d'une capacité d'environ 2,8 m³, afin de valider le fonctionnement du système dans un environnement réel et de mesurer son comportement en présence d'un fluide réel.

III.4.1 Simulation de remplissage d'un réservoir de gasoil de 32 m³

Dans un premier temps, nous avons simulé un scénario de mesure dans un réservoir de gasoil vide, d'une capacité estimée à 32 m³. En l'absence de documentation technique, les dimensions du réservoir ont été relevées manuellement à l'aide d'outils de mesure classiques.

Les dimensions obtenues sont les suivantes :

- **Longueur** : 6,6 mètres
- **Diamètre** : 2,50 mètres

Ces valeurs ont servi de référence pour l'étalonnage et la validation expérimentale du système de mesure développé.

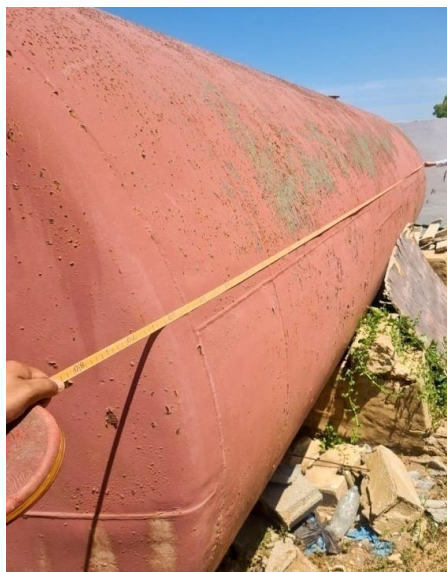


Figure 22 : Réservoir de gasoil de 32 m³

Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau

Nous avons utilisé un objet physique, positionné à différentes hauteurs à l'intérieur du réservoir, pour simuler la surface du liquide. Cette approche a été adoptée en raison de l'impossibilité d'effectuer des tests sur le réservoir en service, faute d'avoir obtenu les autorisations nécessaires.

Concernant la température, nous avons relevé la température ambiante à l'aide du capteur DS18B20, afin de prendre en compte les conditions environnementales réelles susceptibles d'influencer les mesures.

Cette simulation nous a permis de valider la capacité du système à détecter avec précision les variations de niveau, même en l'absence de liquide réel, tout en intégrant les effets possibles liés à la température.

Le tableau ci-dessous présente quelques-unes des mesures enregistrées durant la simulation, ainsi que les valeurs de température ambiante correspondantes.

Hauteur du gasoil (m)	Volume (L)	Température(c°)
0.00	0	27.1
0.01	21	27.1
0.02	32	27.1
0.03	59	27.1
0.04	108	27.1
0.05	161	27.1
0.06	197	27.1
0.07	265	27.1
0.08	314	27.1
0.09	377	27.1
0.10	447	27.1
0.20	1319	27.1
0.30	2153	27.1
0.40	3280	27.1
0.50	4597	27.1
0.60	5852	27.1
0.70	7427	27.1
0.80	8820	27.1

Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau

0.90	10468	27.1
1.00	11963	27.1
1.10	13560	27.1
1.20	15237	27.2
1.30	16820	27.2
1.40	18461	27.2
1.50	20154	27.2
1.60	21729	27.2
1.70	23269	27.2
1.80	24723	27.2
1.90	26219	27.2
2.00	27500	27.2
2.10	28217	27.2
2.20	29965	27.2
2.30	30887	27.2
2.40	31664	27.2
2.45	31990	27.2
2.46	32017	27.2
2.47	32054	27.2
2.48	32094	27.2
2.49	32107	27.2
2.50	32125	27.2

Tableau I : Mesure expérimentales (hauteur, volume et température).

Pour vérifier le comportement de notre système de mesure de niveau, nous avons effectué une simulation de mesure de niveau à différentes températures. Le capteur de température a été plongé dans de l'eau refroidie à environ 15 °C, température de référence pour le diesel, puis les mêmes mesures ont été effectuées à température ambiante, soit environ 30 °C.

Le but de cette expérience est l'analyse de l'impact de la température sur le rendement du système de mesure du niveau, avec prise en compte du coefficient de dilatation thermique du diesel.

Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau

Le tableau suivant montre certaines des mesures et valeurs obtenues au cours de cette expérience.

Hauteur du gasoil (m)	Volume (L) à 15 c°	Volume (L) à 30 c°
2.50	32395	32047
2.40	31933	31593
2.00	27818	27434
1.80	25013	24702
1.50	20280	20146
1.00	12062	11903

Tableau II : Mesures comparatives du niveau à différentes températures.

Dans le cadre de nos essais, nous avons voulu vérifier comment notre système de surveillance réagit face aux variations de température du gasoil, notamment lorsqu'elles peuvent représenter un danger selon les normes de sécurité en vigueur (ASTM D93 pour le point d'éclair, ISO 3016 pour le point de trouble).

Lorsqu'on parle de température critique pour un carburant, deux seuils sont particulièrement importants :

- Le point d'éclair (flash point), c'est-à-dire la température minimale à laquelle les vapeurs deviennent inflammables,
- Le point de trouble (pour point), où le fluide commence à se figer ou perdre sa fluidité.

Pour le gasoil, le point d'éclair se situe généralement autour de 52 °C, tandis que le point de trouble peut descendre en dessous de -10 °C, selon la qualité du gasoil et les conditions d'entreposage.

Pour simuler ces situations, nous avons plongé la sonde de température dans de l'eau chaude à plus de 52 °C, puis dans de la glace pour atteindre des températures inférieures à -4 °C. À chaque fois, le système a réagi comme prévu : en déclenchant une alerte sur la page web et un message de danger sur l'écran LCD, montrant ainsi son efficacité face aux risques thermiques liés au stockage du gasoil.

**WARNING ⚠ :HIGH
TEMPERATURE-FLASH POINT
RISK**

GasOil Tank Monitoring

Time: 18:15

Height: 2.43 m

Temperature: 52.9 °C

Volume: 31334 L

Last Hour Records

Time	H (m)	V (L)	T (°C)
<input type="button" value="Clear Memory"/>			

Figure 23 : Alerte de température élevée affichée sur la page web-Risque lié aux vapeurs inflammables point d'éclair.

**WARNING ⚠ :LOW
TEMPERATURE-POOR POINT
RISK**

GasOil Tank Monitoring

Time: 18:05

Height: 2.44 m

Temperature: -4.2 °C

Volume: 32621 L

Last Hour Records

Time	H (m)	V (L)	T (°C)
<input type="button" value="Clear Memory"/>			

Figure 24 : Alerte de basse température affichée sur la page web-Risque de solidification (point de coulée)

Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau

III.4.2 Surveillance d'un réservoir d'eau domestique

Nous avons testé le système de mesure sur un réservoir d'eau domestique d'une capacité d'environ 2,8 mètres cubes. L'objectif était d'observer le comportement du capteur JSN-SR04T en situation réelle, pendant la phase de remplissage du réservoir.



Figure 25 : Capteur de niveau monté sur le dessus du réservoir

Le système a fonctionné de manière continue durant près de 5 heures, capturant les variations de niveau à mesure que l'eau montait.

Les données étaient affichées sur un écran LCD et une interface Web, et les mesures étaient stockées dans la mémoire du contrôleur et affichées sur une page Web toutes les deux minutes en temps réel, ce qui nous a permis de vérifier la stabilité et la rapidité de la mesure dans le cadre du domicile.

Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau



Figure 26: Prototype du système de mesure de niveau

Water Tank Monitoring

Time: 14:33
Height: 0.21 m
Temperature: 23.4 °C
Volume: 419 L

Last Hour Records

Time	H (m)	V (L)	T (°C)
14:20	0.18	350	23.3
14:22	0.19	363	23.7
14:24	0.19	378	23.7
14:26	0.20	391	23.9
14:28	0.21	415	24.0
14:30	0.21	419	23.6
14:32	0.21	440	23.4

Clear Memory

Figure 27 : Affichage des mesures sur la page web

Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau

Le tableau ci-dessous montre certaines mesures prises lors du remplissage du réservoir et la température ambiante enregistrée à différents moments.

Temps	Hauteur(m)	Volume(L)	Température (°C)
14:20	0.18	350	23.3
14:24	0.19	378	23.7
14:26	0.20	391	23.9
14:30	0.21	419	23.6
14:34	0.22	443	23.0
14:41	0.22	443	22.9
14:45	0.23	489	23.5
14:49	0.24	515	23.6
14:53	0.24	528	23.1
14:57	0.25	558	23.2
15:01	0.26	571	22.9
15:55	0.35	864	23.4
15:59	0.35	883	23.3
16:03	0.36	925	23.4
16:07	0.37	946	23.9
16:11	0.38	967	23.1
16:15	0.39	1001	22.8
16:19	0.39	1008	23.0
16:23	0.39	1009	22.9
16:27	0.40	1044	22.1
16:31	0.41	1092	22.2
16:35	0.41	1101	22.8
16:39	0.42	1126	22.9
16:43	0.42	1134	22.8
16:47	0.44	1183	22.7
16:51	0.44	1194	22.4
16:55	0.45	1215	22.2
16:59	0.45	1230	22.2

Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau

17:03	0.46	1264	22.1
17:07	0.47	1282	22.0
17:11	0.47	1298	22.1
17:15	0.48	1338	21.8
17:19	0.49	1356	21.9
17:23	0.49	1356	22.1
17:27	0.50	1393	21.9
17:31	0.51	1458	21.9
17:39	0.52	1489	21.8
17:41	0.53	1495	21.8
17:55	0.55	1598	21.9
18:07	0.58	1689	21.2
18:25	0.59	1717	20.5
18:29	0.60	1740	20.5
18:33	0.61	1751	20.6
18:37	0.62	1782	20.7
18:41	0.64	1905	20.8
18:49	0.65	1926	20.8
18:53	0.66	1959	20.5
19:02	0.67	1993	20.5
19:06	0.68	2027	20.4
19:18	0.70	2109	20.3
19:22	0.72	2166	20.4
19:26	0.73	2200	20.4

Tableau III : Mesures de remplissage du réservoir en fonction du temps.

Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau

III.5 Discussion des Résultats Expérimentaux

III.5.1 Test 1 : Simulation de remplissage d'un réservoir de gasoil de 32 m³

Le premier test a permis de confirmer que le système est capable de détecter les variations de niveau avec fiabilité. La courbe représentant le volume en fonction de la hauteur montre une évolution régulière et logique, validant ainsi le bon fonctionnement du capteur de distance dans des conditions proches de la réalité, même en l'absence de liquide. On observe que le volume augmente rapidement jusqu'à un certain point, avant de se stabiliser progressivement, un comportement caractéristique des réservoirs cylindriques horizontaux dotés d'extrémités arrondies.

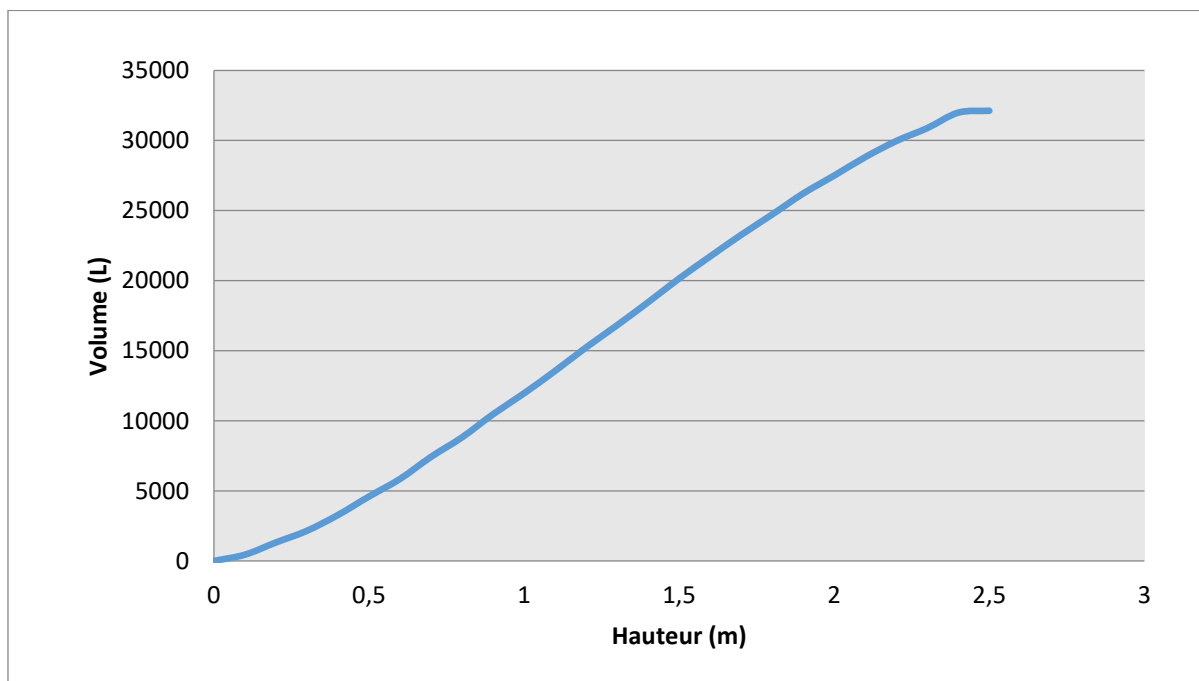


Figure 28 : Courbe de relation entre la hauteur et le volume mesuré

D'après le graphique obtenu lors de l'expérience, on peut observer que la relation entre la hauteur du liquide dans le réservoir et le volume de gasoil correspondant n'est pas parfaitement linéaire, mais suit un comportement typique lié à la forme géométrique du réservoir, qui est un cylindre horizontal.

Ensuite, à partir de cette zone, la pente du graphique devient plus marquée, ce qui signifie que le volume de gasoil augmente plus rapidement avec la hauteur. Cela correspond à la partie centrale du réservoir, où la section est plus large et plus régulière.

Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau

Enfin, lorsque l'on approche du sommet du réservoir, au-delà de 2,5 mètres environ, la courbe commence à se stabiliser. Cela indique que l'augmentation du volume devient de moins en moins significative, malgré une élévation de la hauteur. Ce phénomène s'explique par la courbure supérieure du réservoir, qui réduit la variation de volume disponible.

Ainsi, la forme de la courbe obtenue reflète fidèlement l'influence de la géométrie du réservoir cylindrique horizontal sur la relation hauteur-volume. Elle confirme également que le système de mesure est capable de détecter ces variations avec précision, ce qui valide son efficacité.

Dans cette expérience, nous avons cherché à analyser l'effet de la température sur le volume mesuré de gasoil, en comparant les volumes corrigés à la température de référence de 15 °C et ceux mesurés à 30 °C. L'objectif est de démontrer l'importance de la correction thermique dans les systèmes de mesure industriels et de valider la capacité de notre système à détecter ces écarts de manière fiable.

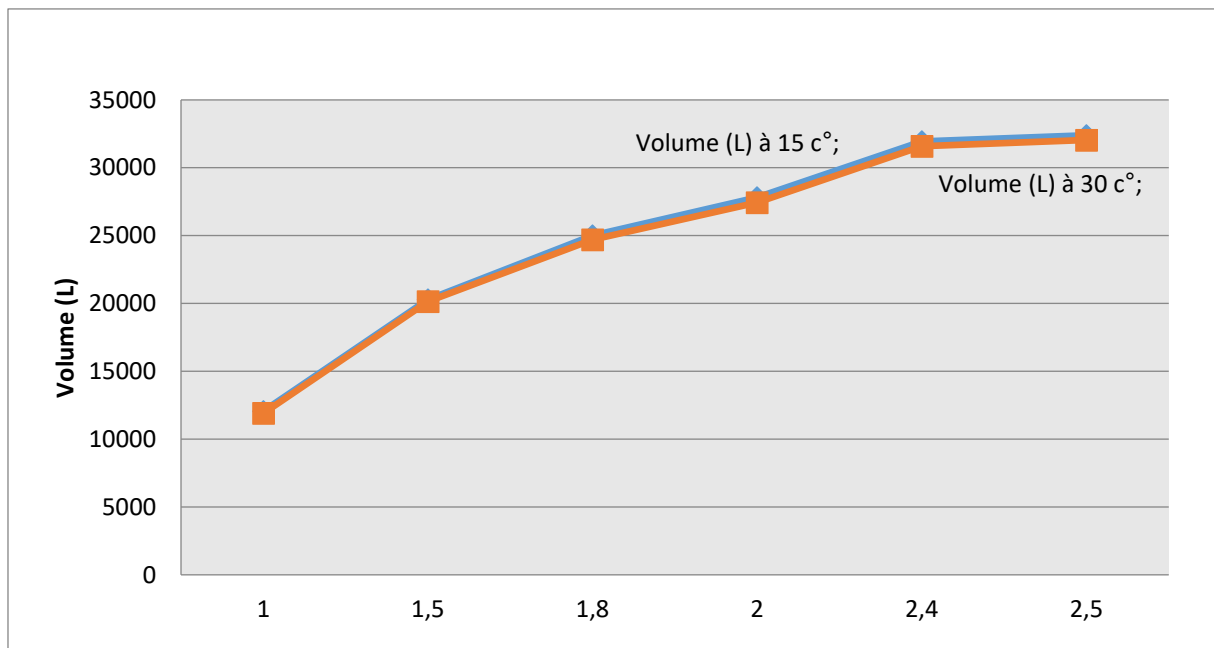


Figure 29 : Effet de la dilatation thermique sur le volume de gasoil

Le graphique obtenu met en évidence une légère diminution du volume mesuré à 30 °C par rapport au volume corrigé à 15 °C, pour un même niveau de gasoil. Cette différence s'explique par la dilatation thermique du carburant : à température plus élevée, le gasoil occupe un volume plus important pour une même masse, ce qui nécessite une correction pour obtenir une valeur de référence standardisée à 15 °C.

Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau

Bien que l'écart de volume entre les mesures à 15 °C et à 30 °C puisse sembler faible (de l'ordre de 1 à 2 %), son impact devient rapidement significatif dans les contextes industriels où l'on manipule de grandes quantités de carburant.

Dans notre cas, par exemple, lorsque le volume mesuré dépasse 20 000 litres, la différence devient clairement perceptible, pouvant atteindre plusieurs centaines de litres.

Cela met en évidence l'importance de la correction thermique dans les systèmes de mesure, afin de garantir une précision fiable et d'éviter des erreurs importantes dans les calculs liés aux quantités stockées ou livrées.

III.5.2 Test 2 : Surveillance d'un réservoir d'eau domestique

Dans cette deuxième test, l'objectif était d'observer comment le capteur de niveau réagit en conditions réelles, lors du remplissage progressif d'un réservoir d'eau domestique. Le système a fonctionné en continu pendant plusieurs heures, ce qui nous a permis d'analyser la fiabilité des mesures dans un contexte d'utilisation quotidienne.

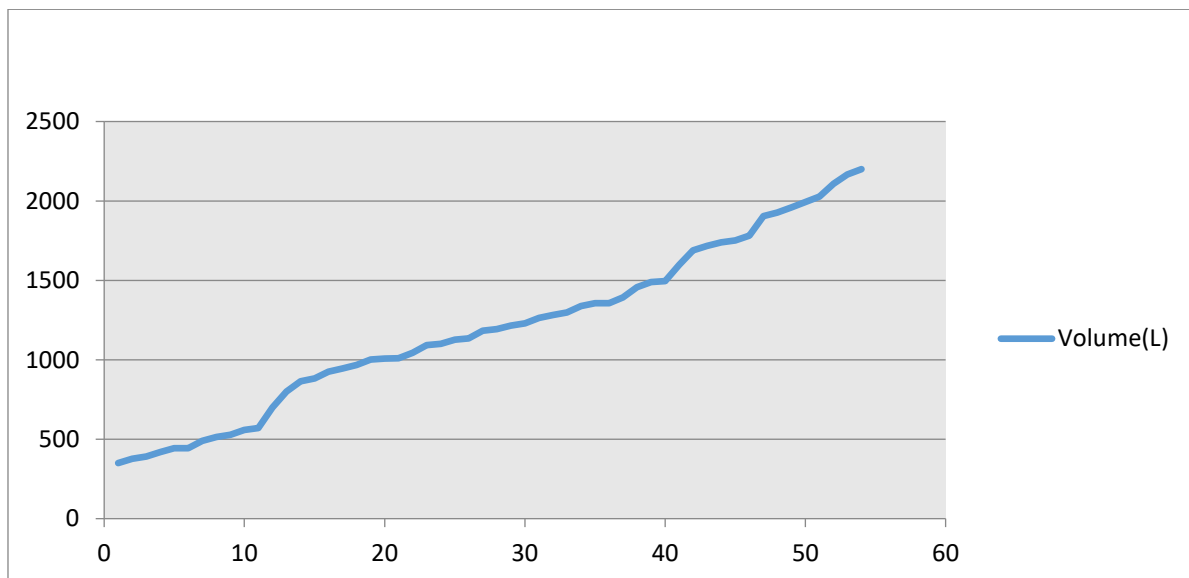


Figure 30 : Courbe de remplissage du réservoir d'eau domestique

La courbe obtenue montre une montée progressive du volume d'eau en fonction de la hauteur mesurée, ce qui est cohérent avec la forme du réservoir, de type horizontal ovoïde. Contrairement aux expériences précédentes, la mesure n'a pas commencé à partir d'un niveau nul et n'a pas atteint le remplissage complet. On observe donc une portion partielle de la courbe, qui commence déjà avec un certain volume d'eau.

Chapitre III. Réalisation pratique du système de mesure du niveau

On remarque également quelques fluctuations dans la courbe, notamment vers la fin du remplissage. Cela est probablement dû à l'irrégularité du débit d'entrée d'eau, mais aussi aux utilisations domestiques simultanées pendant la phase de test, entraînant de légères baisses momentanées du niveau. Malgré cela, le système a su réagir avec précision, en affichant les données en temps réel et en maintenant une bonne stabilité globale.

III.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de concrétiser la conception théorique du système de mesure à travers sa mise en œuvre pratique. Après avoir présenté le schéma global du dispositif ainsi que l'organigramme de fonctionnement, nous avons procédé à une série de tests expérimentaux dans différents contextes.

Les résultats obtenus ont confirmé la capacité du système à mesurer avec précision le niveau d'un liquide, à afficher les données en temps réel et à stocker les mesures de manière fiable. Les expériences ont également permis de mettre en évidence l'influence de la géométrie du réservoir et de la température sur les mesures, justifiant l'intégration de corrections thermiques.

Ainsi, la réalisation pratique a non seulement validé les choix techniques effectués, mais elle a aussi démontré l'efficacité et la stabilité du système dans des conditions proches de l'utilisation réelle.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail a été mené dans le but de répondre à un besoin réel observé dans de nombreuses stations-service en Algérie : l'absence de précision dans la mesure du niveau de gasoil stocké, souvent confiée à des méthodes manuelles dépassées et peu fiables. Ces imprécisions peuvent avoir des conséquences économiques sérieuses, notamment en cas de fuites non détectées ou de vols internes.

Grâce à l'utilisation de technologies modernes comme le microcontrôleur ESP32, les capteurs ultrasoniques pour la mesure du niveau, et la sonde de température DS18B20, nous avons pu concevoir un prototype capable de mesurer avec exactitude le volume de gasoil, en tenant compte des variations dues à la température. Les données sont affichées en temps réel sur un écran LCD et une interface web locale, ce qui permet un suivi simple, rapide et efficace.

Les tests effectués ont démontré la fiabilité du système, et sa capacité à remplacer les jauges manuelles par une solution électronique beaucoup plus précise. En outre, ce projet peut être étendu à l'avenir pour intégrer un stockage historique des données, une alerte en cas de baisse anormale du niveau, ou une supervision à distance à travers une plateforme en ligne.

En conclusion, le système proposé représente une alternative pratique, économique et évolutive pour améliorer la gestion des stocks de gasoil dans les stations-service, en réduisant les pertes, en augmentant la transparence, et en renforçant la sécurité du stockage.

Bibliographies

1. *Above Ground Storage tanks practical (Guide to Construction, Inspection, and Testing)* CRC press taylor & francis Group
2. **DARWESH, ALI.** *THE TANKS.*
- 3 *Benchmark stockage en raffinerie Maîtrise du vieillissement des installations*
4. *Technologie des parcs de stockage et terminaux.* s.l. : Département Génie des transports U.M constantine, (2019-2020).
5. *HOW TO CALCULATE THE VOLUMES OF PARTIALLY FULL TANKS.* **Barderas, Antonio Valiente.** 2015, International Journal of Engineering and Technology.
6. **Emerson.** *The Engineer's Guide to Tank Gauging.* 2021.
7. **Endress+Hauser.** *mesure de niveau.*
8. **OMEGA.** *Mesure de la température volume 1 capteurs et sondes de température RTD.*
9. **CITEC.** *Thermocouples GENERALITES.* Bussy-Saint-Maartin : s.n., 2020.
10. *capteur de température-ISET radés/L3GMEN.* **Ramzi, Laabidi.**

Annexes

Annexe A

Élément	Spécification
Certifications RF	Voir les certificats pour ESP32-WROOM-32
Certification Wifi	Wifi Alliance
Certification Bluetooth	BQB
Certification verte	RoHS/REACH
Fiabilité	HTOL/HTSL/uHAST/TCT/ESD
Protocoles Wifi	802.11 b/g/n (802.11n jusqu'à 150 Mbps)
Support agrégation	A-MPDU et A-MSDU, intervalle de garde de 0.4 μ s
Fréquence Wifi	2412 ~ 2484 MHz
Protocoles Bluetooth	Bluetooth v4.2 BR/EDR et Bluetooth LE
Récepteur Bluetooth	NZIF avec sensibilité de -97 dBm
Audio Bluetooth	CVSD et SBC
Interfaces du module	SD, UART, SPI, SDIO, I2C, PWM, IR, GPIO, capteur capacitif, ADC, DAC, CAN
Oscillateur intégré	Cristal 40 MHz
Mémoire flash SPI	4 MB
Tension de fonctionnement	3.0 V – 3.6 V
Courant de fonctionnement	Moyenne : 80 mA
Courant minimum requis	500 mA
Température ambiante recommandée	-40 °C à +85 °C
Dimensions	18 mm × 25.5 mm × 3.10 mm

Annexe B

Élément	Spécification
Technologie	Capteur à ultrasons étanche
Tension d'alimentation	3-5.5 V DC
Plage de mesure	21 cm à 600 cm
Angle de mesure	75 degré
Résolution	±1cm
Type de signal	Numérique TTL (TRIG / ECHO)
Température ambiante recommandée	-20 °C à +70 °C
Fréquence de fonctionnement	40 kHz
Courant de fonctionnement	8 mA
Niveau de protection	Étanche IP66

Annexe C

Élément	Spécification
Plage de température	-55 °C à +125 °C
Précision	±0.5 °C de -10 °C à +85 °C
Résolution	Programmable de 9 à 12 bits
Tension d'alimentation	3.0 V à 5.5 V
Interface	Bus 1-Wire numérique
Adresse unique	Oui, 64 bits
Boîtier	Sonde inox étanche

Annexe D

Élément	Spécification
Type d'écran	LCD 16 caractères × 2 lignes
Tension de fonctionnement	5 V
Interface	I2C via module PCF8574
Nombre de connexions	2 fils (SDA, SCL)
Adresse I2C typique	0x27 ou 0x3F
Compatibilité	Arduino, ESP32, STM32
Contrôleur	HD44780

Annexe E

Ci-dessous une partie du code de système de mesure du niveau de gasoil.

Bibliothèques et définitions

```
#include <WiFi.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include "time.h"
#include <EEPROM.h>
#define TRIG_PIN 4
#define ECHO_PIN 15
#define ONE_WIRE_BUS 5
const char* ssid = "Ahmed";
const char* password = "13110022";
const char* ntpServer = "pool.ntp.org";
const long gmtOffset_sec = 3600;
const int daylightOffset_sec = 0;
#define SENSOR_HEIGHT 2.71 // Hauteur du capteur depuis le fond (m)
#define TANK_DIAMETER 2.5 // Diamètre interne (m)
#define TANK_LENGTH 6.6 // Longueur du réservoir (m)
#define MAX_RECORDS 100
#define EEPROM_SIZE (MAX_RECORDS * sizeof(Measurement))
```

Mesure de Distance et Température

```
float measureDistance() {
digitalWrite(TRIG_PIN, LOW); delayMicroseconds(2);
digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH); delayMicroseconds(10);
digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
long duration = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH, 25000);
return duration * 0.0343 / 2;}

float readTemperature() {
sensors.requestTemperatures();
return sensors.getTempCByIndex(0);}
```

Affichage sur l'écran LCD

```
void updateDisplay(float height, float volume, float temp) {
  if (temp >= 52){
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);lcd.print("FLASH POINT RISK"); }
  else if (temp <= -10){ lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);lcd.print("POOR POINT RISK"); }
  else{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("H:"); lcd.print(height, 2);
    lcd.print("m T:"); lcd.print(temp, 1); lcd.print("C");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("V:");
    if (isnan(volume)) {
      lcd.print("Err");}
    else {
      lcd.print(volume * 1000, 0);
      lcd.print("L");}
```

Enregistrement et Réinitialisation

```
void storeMeasurement(float h, float v, float t) {
  String timeStr = getTimeString();
  Measurement m = { h, v, t, "" };
  timeStr.toCharArray(m.time, sizeof(m.time));
  history[historyIndex] = m;
  EEPROM.put(historyIndex * sizeof(Measurement), m);
  EEPROM.commit();
  historyIndex++;
  if (historyIndex >= MAX_RECORDS) historyIndex = 0;}
void loadEEPROM() {
  for (int i = 0; i < MAX_RECORDS; i++) {
    EEPROM.get(i * sizeof(Measurement), history[i]);}}
void clearEEPROM() {
  Measurement empty = {0, 0, 0, ""};
```

```

for (int i = 0; i < MAX_RECORDS; i++) {
EEPROM.put(i * sizeof(Measurement), empty);
history[i] = empty; }
EEPROM.commit();
historyIndex = 0;}

```

Connexion WI-FI

```

void connectToWiFi() {
lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Connexion WiFi");
WiFi.begin(ssid, password);
unsigned long start = millis();
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && millis() - start < 10000) {
delay(500); lcd.print("."); }
if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("WiFi connected");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("IP:"); lcd.print(WiFi.localIP());
delay(5000);
server.begin(); }

else {
lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Erreur connexion");
delay(3000); }}

```