



DEPARTEMENT DE PHYSIQUE APPLIQUEE ET OPTIQUE

MEMOIRE

Présenté par :

Mr ALLOUCHE Sid Ahmed

Pour l'obtention du diplôme de Master en Instrumentation et Métrologie dans le cadre de
l'arrêté 1275.

Thème

Automatisation du titrage colorimétrique pour le contrôle chimique : Développement d'un système de mesure basé sur l'instrumentation

Soutenu le 25 juin 2025 devant la commission d'examen

Dr GOURBI	Institut des Sciences et Techniques Appliquées Université d'Oran 1	Président
Dr RAHMANI	Institut des Sciences et Techniques Appliquées Université Oran 1	Examineur
Dr BENDERRAG	Institut des Sciences et Techniques Appliquées Université Oran 1	Encadreur
Dr CHAIB	Institut des Sciences et Techniques Appliquées Université Oran 1	Co-encadreur

Année Universitaire 2024-2025

Remerciements

Louanges à **Allah**, le Miséricordieux, le Sage, qui m'a accordé la force, la patience et l'endurance nécessaires pour mener à bien ce travail. C'est par Sa volonté que ce projet a pu voir le jour, et c'est en Lui que je place ma reconnaissance infinie.

Ce projet de fin d'études représente pour moi bien plus qu'un simple travail académique : c'est l'aboutissement de plusieurs années d'apprentissage, de recherches, de persévérance et d'efforts. À ce titre, de nombreuses personnes ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation, et je tiens ici à leur exprimer toute ma gratitude.

Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères à mes deux encadrants pédagogiques, **Monsieur BENDERRAG** et **Monsieur CHAIB**, pour leur accompagnement constant, leur rigueur scientifique, leurs orientations méthodologiques et leur patience tout au long de ce projet. Leurs conseils avisés, leurs remarques constructives et leur disponibilité ont été essentiels à l'élaboration de ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie également **Monsieur DJEBRA Hocine**, dont les conseils, les observations pertinentes et le suivi ont fortement enrichi ma démarche. Son soutien m'a été précieux, tant sur le plan technique que personnel.

Mes vifs remerciements vont à **Monsieur HEDBI** et **Monsieur HAMITOCHE**, mes encadrants de stage, pour l'accueil chaleureux au sein de la structure, la confiance accordée, et l'encadrement pratique de qualité dont j'ai pu bénéficier tout au long de mon immersion professionnelle. Sa pédagogie et son sens du partage ont représenté un véritable atout pour la réussite de cette expérience.

Je tiens également à remercier l'ensemble de l'équipe pédagogique et administrative de l'Institut ISTA, pour la qualité de la formation reçue, l'encadrement académique rigoureux, ainsi que les valeurs humaines et professionnelles transmises durant mon cursus. Grâce à leur engagement, j'ai pu acquérir les bases solides qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je n'oublie pas de remercier tous les techniciens, ingénieurs et personnels de la structure d'accueil de mon stage pour leur accueil, leur disponibilité, leur collaboration et leur soutien au quotidien

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à mes camarades de promotion, pour l'esprit d'entraide, les échanges enrichissants et la solidarité dont ils ont toujours fait preuve.

Enfin, mes pensées les plus chaleureuses vont à ma famille, et tout particulièrement à mes parents, pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements constants, leurs sacrifices et leur amour indéfectible. Sans leur présence à mes côtés, rien de cela n'aurait été possible.

À toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce projet, je dis merci du fond du cœur.

Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents, pour leur soutien inconditionnel, leur patience et les valeurs qu'ils m'ont transmises. Leur accompagnement tout au long de mon parcours a été une source constante de motivation et de persévérance.

À ma famille, pour leur présence bienveillante et leurs encouragements permanents, qui m'ont porté dans les moments d'effort comme dans ceux de doute.

À Lina, dont le soutien moral, la compréhension et les encouragements m'ont accompagné tout au long de cette étape importante.

Je souhaite également dédier ce travail à mes collègues et camarades Djamel, Abdelhadi, Anis et Abbas, avec qui j'ai partagé de riches échanges, un esprit de collaboration remarquable et un engagement commun dans nos projets académiques. Leur professionnalisme et leur esprit d'équipe ont grandement contribué à rendre cette expérience plus enrichissante.

Résumé

Dans le cadre de l'amélioration des techniques d'analyse en laboratoire, ce mémoire présente le développement d'un système automatisé de titrage colorimétrique. Ce dispositif vise à pallier les limites du titrage manuel, souvent marqué par un manque de précision, de répétabilité et de traçabilité.

Le système repose sur l'intégration de plusieurs composants : un microcontrôleur Arduino pour le pilotage global, un capteur de couleur pour détecter le point d'équivalence de la réaction, un capteur de débit pour mesurer le volume de réactif, et une électrovanne assurant le contrôle automatique du flux. Une interface utilisateur permet l'affichage et l'enregistrement des résultats.

Ce projet s'inscrit dans une approche multidisciplinaire combinant instrumentation, électronique embarquée et métrologie. Le prototype réalisé démontre la faisabilité d'un tel système à faible coût, tout en ouvrant des perspectives d'optimisation pour une utilisation en milieu industriel ou pédagogique.

Mots clé :

Analyse chimique, Titrage colorimétrique, Contrôle qualité, Automatisation, Système embarqué, instrumentation, métrologie.

Table des matières

Remerciements	2
Dédicace	4
Résumé	5
Table des matières	6
Liste des abréviations	13
Listes des figures	14
Liste des tableaux	16
Liste des équations	17
Introduction générale.....	18
Chapitre 01 : Contrôle qualité et titrage colorimétrique.....	20
1. Introduction :	21
2. Concepts généraux sur la qualité :	21
2.1 Définition de la qualité :	21
2.2 Évolution du concept de qualité :	21
2.3 Les dimensions de la qualité :	21
2.4 Outils de la Qualité :	22
2.4.1 Le Cycle PDCA (Plan – Do – Check – Act) :	22
2.4.2. Diagramme d'Ishikawa (ou des 5M) :	23
2.4.3. AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) :	24
2.4.4. Outils Graphiques et Statistiques de la Qualité :	24
2.5 Normes et systèmes de management de la qualité :	25
2.5.1 ISO 9001 :	25
2.5.2 ISO 14001 : Management environnemental :	25
2.5.3 ISO 45001 :	26
3. Contrôle qualité en industrie :	26

Table des matières

3.1 Définition et rôle du contrôle qualité en industrie :	26
3.2 Importance du contrôle qualité :	26
3.3 Types de Contrôle Qualité :	27
3.3.1 Contrôle à Réception :	27
3.3.2 Contrôle en Cours de Fabrication :	28
3.3.3 Contrôle Final :	28
3.3.4 Contrôle Destructif vs Non Destructif :	29
4. Méthodes d'analyse chimique courantes :	29
4.1 Classification des méthodes d'analyse chimique :	29
4.2 Critères de choix d'une méthode d'analyse :	30
4.3 Présentation des méthodes courantes :	30
5. Le Titrage comme Méthode d'Analyse :	31
5.1 Définition et principe du titrage :	31
5.2 Étapes d'un titrage :	32
5.3 Types de titrage :	32
6. Le titrage colorimétrique :	33
6.1 Définition :	33
6.2 Principe du titrage colorimétrique :	34
6.3 Point d'équivalence :	35
6.4 Domaines d'Application du Titrage Colorimétrique :	36
6.5 Réaction chimique lors d'un titrage :	37
6.6 Facteurs influençant la précision du titrage :	37
6.6.1 Choix de l'indicateur coloré :	37
6.6.2 Précision des instruments de mesure :	37
6.6.3 Conditions de la réaction :	38
6.6.4 Technique opératoire :	38
6.6.5 Pureté des réactifs :	38

Table des matières

6.6.6 Volume initial de solution titrée :	38
6.6.7 Expérience de l'opérateur :	38
7. Exemple d'analyse en cimenterie : Dosage de la chaux libre (CaO libre) Méthode au glycérol – Titrage à l'acétate d'ammonium :	38
7.1 Objectif de l'analyse :	38
7.2 Document de référence :	39
7.3 Moyens :	39
7.4 Mode opératoire :	39
7.5 Calculs :	40
8. Vers une automatisation du titrage colorimétrique :	40
8.1 Limites du titrage colorimétrique manuel :	40
8.2 Erreur de mesure :	41
8.2.1 Définition :	41
8.2.2 Types d'erreur de mesures :	41
8.2.3 Exemples d'erreurs lors d'un titrage manuel :	42
8.3 Rôle de l'instrumentation et de la métrologie :	43
9. Conclusion :	44
Chapitre 2 : Instrumentation et Métrologie appliquées au projet.....	45
1. Introduction :	46
2. Définition et rôle de l'instrumentation :	46
3. Une grandeur physique :	47
3.1 Définition d'après le VIM :	47
3.2 Système international (SI) :	47
3.3 Unité de mesure :	48
4. Chaîne de mesure en instrumentation :	49
4.1 Définition :	49
4.2 Types de chaînes de mesure :	49

Table des matières

5. Capteur :	50
5.1 Définition :	50
5.2 Types de capteur :	51
5.2.1 Capteur actif :	51
5.2.2 Capteur passif :	51
5.3 Caractéristiques générales d'un capteur :	52
5.4 Constitution d'un capteur :	53
6. Conditionneurs :	53
6.1 Définition :	53
6.2 Rôle du conditionneur :	54
6.3 Principales fonctions du conditionneur :	54
7. Transmetteurs :	54
7.1 Définition :	54
7.2 Constitution d'un transmetteur :	55
7.3 Paramétrage d'un transmetteur :	56
7.4 Transmetteur intelligent :	56
8. Traitement des données :	57
8.1 Transmission des signaux de mesure – Le signal standard 4–20 mA :	57
8.2 Affichage, enregistrement et commande d'action :	58
8.2.1 Affichage : La valeur mesurée peut être affichée en temps réel sur :	58
8.2.2 Enregistrement : Les données peuvent être :	59
8.2.3 Commande : Le système peut également prendre des décisions automatiques :	59
9. Définition et rôle de la métrologie :	59
10. Types de la métrologie :	59
11. Concepts métrologiques essentiels :	60
11.1 Exactitude de mesure :	60
11.2 Justesse de mesure :	60

Table des matières

11.3 Fidélité de mesure :	61
11.4 Répétabilité de mesure :	61
11.5 Reproductibilité de mesure	62
11.6 Traçabilité métrologique :	63
11.7 Ajustage d'un système de mesure :	63
11.8 Étendue de mesure :	63
11.9 Résolution :	63
11.10 Stabilité :	63
12. Etalonnage des instruments de mesure :	63
12.1 Définition et objectifs :	63
12.2 Types d'étalonnage :	64
12.3 Différence entre étalonnage et vérification :	65
13. Incertitude de mesure :	65
13.1 Définition :	65
13.2 Évaluation les incertitudes types :	66
13.2.1 Évaluation de Type A (de l'incertitude) :	66
13.2.2 Évaluation de Type B (de l'incertitude)	66
13.2.3 Incertitude-type composée :	66
13.2.4 Incertitude élargie :	66
13.2.5 Facteur d'élargissement :	66
14. Normes et références applicables :	67
15. Conclusion :	67
Chapitre 03 : Conception, développement et validation du système de mesure	69
1. Introduction :	70
2. Présentation du projet :	70
2.1 Contexte et problématique :	70
2.2 Objectif du projet :	70

Table des matières

2.3 Méthodologie :.....	71
3. Composants du système	72
3.1 Capteur de débit d'eau Yf-s201 :.....	72
3.2 Capteur de couleur TCS230 :	73
3.3 Électrovanne :	75
3.4 La carte Arduino :.....	76
3.5 Bouton poussoir :.....	76
3.6 Interrupteur ON / OFF :.....	77
3.7 Afficheur LCD I2C :.....	78
4. fonctionnement et schéma électronique du système :	78
4.1 Étapes principales :	78
4.2 Schéma électronique et connexion :	80
5. Modélisation 3D des pièces :	82
6. Impression des pièces 3D :.....	84
7. Contrôle dimensionnel et intégration métrologique :.....	85
8. Vérification individuelle de chaque composant :.....	86
8.1 Capteur de débit :.....	86
8.2 Capteur de couleur :.....	86
8.3 électrovanne et relais :	87
9. Montage total du système :.....	88
10. Code Arduino :	89
11. Affichage des résultats	95
12. Comparaison avec un projet similaire : "Dosage Colorimétrique Arduino"	96
12.1 Présentation du projet : <i>Dosage Colorimétrique Arduino</i> :.....	96
12.2 Tableau comparatif entre les deux projets de titrage automatisé :.....	98
12.3 Analyse comparative :	99
12.3.1 Approche technique et choix des composants :	99

Table des matières

12.3.2 Conception physique et modélisation :	100
12.3.3 Nature du test expérimental :	100
12.3.4 Portée pédagogique et applicabilité :	100
12.4 Conclusion de la comparaison :	100
12. Conclusion.....	101
Chapitre 04 : Etude Economique.....	102
1. Introduction	103
2. Le business model canvas (BMC).....	103
3. Analyse PESTEL.....	106
4. Analyse SWOT	106
5. Étude économique du système automatisé de titrage colorimétrique :	108
5.1 Introduction	108
5.2 Charges sociales employeur (26%) :	110
5.3 Masse salariale totale annuelle (salaires + charges) :	110
5.4 Hypothèses pour calcul de la VAN :	113
6. Conclusion.....	116
Conclusion générale	117
Perspectives d'amélioration	118
Bibliographie.....	120

Liste des abréviations

ISO : Organisation internationale de normalisation

PDCA : Plan – Do – Check – Act

SMQ : Système de management de la qualité

SME : Système de management environnemental

CND : Contrôle non destructif

VIM : Vocabulaire internationale de métrologie

SI : Système international

BIPM : bureau international des poids et mesures

Listes des figures

Figure 1: Cycle PDCA (2).....	23
Figure 2 : Diagramme d'Ishikawa (ou des 5M) (3).....	23
Figure 3 : Montage d'un titrage (7).....	33
Figure 4 : Principe du titrage colorimétrique (8).....	35
Figure 5 : Variation du pH en fonction du volume (9).....	36
Figure 6 : Détermination de la chaux libre.....	40
Figure 7 : différence entre erreur systématique et erreur aléatoire (12)	42
Figure 8 : les sept unités de base (15)	48
Figure 9 : Chaîne de mesure (16)	49
Figure 10 : principe de capteur (16)	51
Figure 11 : Capteur ultrason (18)	51
Figure 12 : Thermocouple type J (19).....	52
Figure 13 : constitution d'un capteur (20).....	53
Figure 14 : Conditionnement du signal (16)	53
Figure 15 : Transmetteur de pression Wika (22).....	55
Figure 16 : Rôle du transmetteur.....	55
Figure 17 : Constitution d'un transmetteur (13).....	56
Figure 18 : Calcul de la charge maximale pour signale 4-20 mA (23)	58
Figure 19 : différence entre exactitude justesse et fidélité (25).....	61
Figure 20 : différence entre répétabilité et reproductibilité (26)	62
Figure 21: étalonnage des instruments de mesure (27)	64
Figure 22 : Schéma global du système de mesure.....	71
Figure 23 : Capteur de débit d'eau Yf-s-201 (17).....	72
Figure 24 : Fonctionnement du capteur de débit d'eau Yf-s-201 (17)	72
Figure 25 : capteur de couleur TCS230 (13).....	73
Figure 26 : Schéma fonctionnel d'un capteur de couleur TCS230 (13).....	74
Figure 27 : électrovanne 12V (16)	75
Figure 28 : Module relais (16).....	76
Figure 29 : Carte Arduino nano (26)	76
Figure 30 : Bouton poussoir (16)	77
Figure 31 : Interrupteur ON/OFF (16)	77
Figure 32 : Afficheur LCD I2C (16)	78

Liste des figures

Figure 33 : Organigramme du fonctionnement de système.....	80
Figure 34 : Schéma électronique du système	82
Figure 35 : Conception d'une pièce goutte à goutte réalisée avec le logiciel Fusion 360.....	83
Figure 36 : conception d'un boîtier réalisée avec le logiciel Fusion 360	83
Figure 37 : conception d'un bouchon réalisée avec le logiciel Fusion 360.....	84
Figure 38 : Impression d'une pièce goût à goût par imprimante 3D Geeetech A30M.....	84
Figure 39 : : Impression d'un boîtier par imprimante 3D Geeetech A30M	85
Figure 40 : Mesure dimensionnelle d'un raccord à l'aide d'un pied à coulisse numérique	85
Figure 41 : Test du fonctionnement débitmètre YF S-201	86
Figure 42 : Test du fonctionnement capteur de couleur	87
Figure 43 : Test d'électrovanne et relais	88
Figure 44 : Montage total du système	89
Figure 45: Code Arduino montrant l'initialisation des composants.....	91
Figure 46 : Démarrage du titrage	92
Figure 47 : Mesure du débit et du volume.....	93
Figure 48 : Lecture de la couleur.....	94
Figure 49 : Fin du titrage.....	95
Figure 50 : Affichage des résultats.....	96
Figure 51 : photos de réalisation du projet Dosage Colorimétrique Arduino (28).....	97

Liste des tableaux

Tableau 1 : les différentes méthodes d'analyse chimique courante (6)	31
Tableau 2 : Types de titrage (7)	32
Tableau 3 : les solutions du titrage (7)	34
Tableau 4 : définition entre erreur systématique et erreur aléatoire (11)	42
Tableau 5 : la différence entre l'unité de base et l'unité dérivée (14).....	48
Tableau 6 : Connexions entre les composants de systèmes	81
Tableau 7 : Tableau comparatif entre les deux projets de titrage automatisé	99
Tableau 8 : Modèle d'Affaires (BMC) : Partenaires, Activités, Valeur et Flux	103
Tableau 9 : Système de titrage automatisé basé sur Arduino.....	106
Tableau 10 : Analyse SWOT : Forces, Faiblesses, Opportunités et Menaces du Système Automatisé de Titrage	106
Tableau 11 : Coûts d'investissement et de fonctionnement (année 1)	108
Tableau 12 : Masse salariale annuelle et charges sociales	109
Tableau 13 : Autres charges fixes annuelles (amortissement, entretien, etc.).....	110
Tableau 14 : Chiffre d'affaires et résultat net selon différents volumes de tests	110
Tableau 15 : Structure d'investissement (année 1)	111
Tableau 16 : Structure de financement (année 1).....	112
Tableau 17 : Compte de résultat prévisionnel (extrait)	112
Tableau 18 : Indicateurs de faisabilité financière.....	113
Tableau 19 : Tableau Compte Résultat (TCR) étendu sur 5 ans	113

Liste des équations

Équation 1 : critère de priorité	24
Équation 2 : calcul la concentration de l'analyte	31
Équation 3 : point d'équivalence	35
Équation 4 : point d'équivalence	35
Équation 5 : Réaction chimique lors d'un titrage	37
Équation 6 : calcul de la chaux libre.....	40
Équation 7 : Incertitude-type composée	66
Équation 8 : L'incertitude élargie.....	66

Introduction générale

Dans le domaine industriel, l'analyse chimique constitue une étape essentielle pour garantir la qualité des produits fabriqués. Elle permet de vérifier la conformité aux normes, d'assurer la stabilité des processus et de garantir la satisfaction du client final. Parmi les techniques analytiques les plus couramment utilisées, le titrage colorimétrique se distingue par sa simplicité et son efficacité pour déterminer la concentration d'un analyte à partir d'un changement de couleur observable. Toutefois, la qualité et la fiabilité des mesures issues de cette méthode dépendent fortement de l'interprétation visuelle du changement de couleur, de la lecture manuelle du volume de réactif consommé, ainsi que du bon déclenchement de l'arrêt du titrage. Ces facteurs peuvent engendrer des erreurs significatives, compromettant ainsi la reproductibilité et la traçabilité des résultats.

Cette problématique devient d'autant plus critique lorsque le titrage intervient dans un processus de contrôle qualité, où la rigueur métrologique est impérative. En effet, des incertitudes de mesure peuvent être introduites par des facteurs humains, tels que le mauvais choix du point de virage (couleur optimale), un retard dans la fermeture de l'électrovanne ou une mauvaise lecture du volume délivré. Ces imprécisions nuisent à la fiabilité des résultats d'analyse et limitent l'efficacité des contrôles qualité, notamment dans des secteurs comme l'industrie du ciment où la précision chimique impacte directement la performance des produits.

Face à ces limitations, ce projet vise à développer un système de mesure automatisé basé sur l'instrumentation, capable d'assurer une exécution plus fiable, reproductible et métrologiquement conforme du titrage colorimétrique. L'objectif principal est de concevoir une solution qui combine intelligemment les domaines du contrôle qualité, de l'instrumentation et de la métrologie afin de réduire les sources d'erreurs humaines, d'améliorer la précision des mesures et d'assurer un meilleur suivi des opérations analytiques.

La méthodologie adoptée repose sur plusieurs étapes clés : une phase de recherche documentaire, suivie de la conception et du développement du système, puis de tests expérimentaux et enfin de la validation des performances du dispositif. L'approche proposée permet d'intégrer des capteurs capteur de débit, capteur de couleur, une commande automatique (microcontrôleur avec électrovanne) et un affichage des résultats pour former un instrument complet, fiable et autonome.

Ce projet présente un intérêt à la fois scientifique, technique et industriel. Sur le plan scientifique, il permet d'explorer l'interfaçage entre techniques analytiques classiques et solutions d'automatisation modernes. Techniquement, il met en œuvre des composants d'instrumentation pour améliorer la précision et la reproductibilité des mesures. Sur le plan industriel, il peut être utilisé comme outil d'aide au contrôle qualité dans des laboratoires ou unités de production, notamment dans des secteurs tels que le ciment, la chimie, ou encore l'agroalimentaire, où le titrage est une méthode couramment employée. Le système développé pourrait aussi servir de base pour des améliorations futures, notamment en matière de connectivité, de traçabilité des résultats ou d'intégration dans des chaînes de production automatisées.

Structure du mémoire :

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

- Le chapitre 1 est consacré aux notions générales du contrôle qualité et du titrage colorimétrique, ainsi qu'à leur importance dans le contexte industriel.
- Le chapitre 2 traite de l'apport de l'instrumentation et de la métrologie dans le développement du système.
- Le chapitre 3 présente en détail les étapes de conception, de développement, de test et de validation du système proposé.
- Enfin, le chapitre 4 représente l'étude économique de notre startup du système titrage automatisé.

Chapitre 01 : Contrôle qualité et titrage colorimétrique

1. Introduction :

Ce chapitre aborde les notions essentielles du contrôle qualité en industrie, en mettant l'accent sur le contrôle chimique et les méthodes analytiques comme le titrage colorimétrique. Après une présentation des concepts généraux de la qualité, des outils, et des normes, le chapitre explore les différentes techniques d'analyse utilisées en laboratoire. Un focus particulier est fait sur le titrage colorimétrique, notamment dans le cadre du dosage de la chaux libre dans les cimenteries, tout en introduisant la nécessité d'automatiser ces opérations pour plus de fiabilité.

2. Concepts généraux sur la qualité :

2.1 Définition de la qualité :

La qualité peut être définie comme l'ensemble des caractéristiques d'un produit ou d'un service qui répondent aux exigences exprimées ou implicites. Elle vise à satisfaire les besoins des clients tout en garantissant la conformité aux normes techniques et réglementaires. Selon l'ISO 9000, la qualité est *"l'aptitude d'un ensemble de caractéristiques intrinsèques à satisfaire des exigences"*. (1)

2.2 Évolution du concept de qualité :

Historiquement, la qualité était perçue uniquement comme le contrôle du produit fini. Cette approche, appelée qualité par inspection, consistait à détecter les défauts après production.

Avec le temps, une vision plus large s'est imposée :

- **Qualité intégrée** : La qualité devient une responsabilité de tous les acteurs de l'entreprise.
- **Qualité totale (Total Quality Management - TQM)** : Elle repose sur une démarche continue d'amélioration impliquant toute l'organisation.
- **Qualité orientée client** : Le client est au centre de la stratégie qualité, avec un accent sur la satisfaction. (1)

2.3 Les dimensions de la qualité :

La qualité ne se limite pas à la conformité d'un produit. Elle comprend plusieurs dimensions :

- Conformité aux spécifications
- Fiabilité et durabilité du produit
- Performance

- Esthétique et perception du client
- Service après-vente
- Respect des délais de livraison (1)

2.4 Outils de la Qualité :

Pour assurer la maîtrise des processus et améliorer en continu la qualité des produits ou services, plusieurs outils de la qualité sont utilisés en industrie. Ces outils permettent d'identifier les problèmes, d'analyser les causes, de suivre les performances et de prendre des décisions fondées sur des données objectives. (1)

2.4.1 Le Cycle PDCA (Plan – Do – Check – Act) :

Aussi appelé « roue de Deming », le cycle PDCA est un outil fondamental dans les démarches d'amélioration continue.

- **Plan (Planifier)** : Identifier un problème ou un besoin d'amélioration, analyser la situation, définir des objectifs et établir un plan d'action.
- **Do (Faire)** : Mettre en œuvre les actions planifiées à une petite échelle ou à titre d'essai.
- **Check (Vérifier)** : Contrôler les résultats obtenus, comparer avec les objectifs et identifier les écarts.
- **Act (Agir)** : Standardiser si les résultats sont positifs ou ajuster et relancer un nouveau cycle si nécessaire.

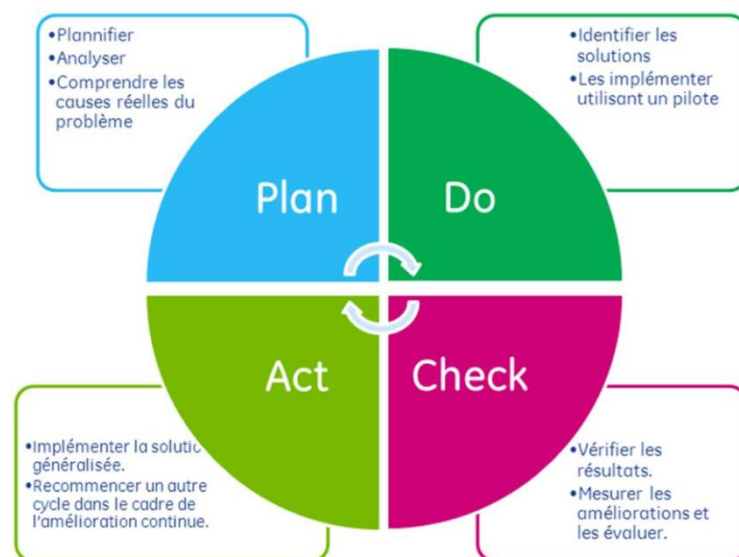


Figure 1: Cycle PDCA (2)

Ce cycle favorise une démarche structurée et dynamique d'amélioration continue, essentielle dans tout système de management de la qualité. (1)

2.4.2. Diagramme d'Ishikawa (ou des 5M) :

Il s'agit d'un diagramme en arêtes de poisson (ou en cause-effet) permettant d'identifier les causes potentielles d'un problème.

Les **5M** représentent cinq grandes familles de causes :

- **Milieu** : Environnement de travail, conditions ambiantes, sécurité...
- **Méthode** : Procédures, modes opératoires, normes utilisées...
- **Main-d'œuvre** : Qualification, formation, implication des opérateurs...
- **Matière** : Qualité des matières premières, des consommables...
- **Matériel** : État, calibration, performance des équipements et instruments.

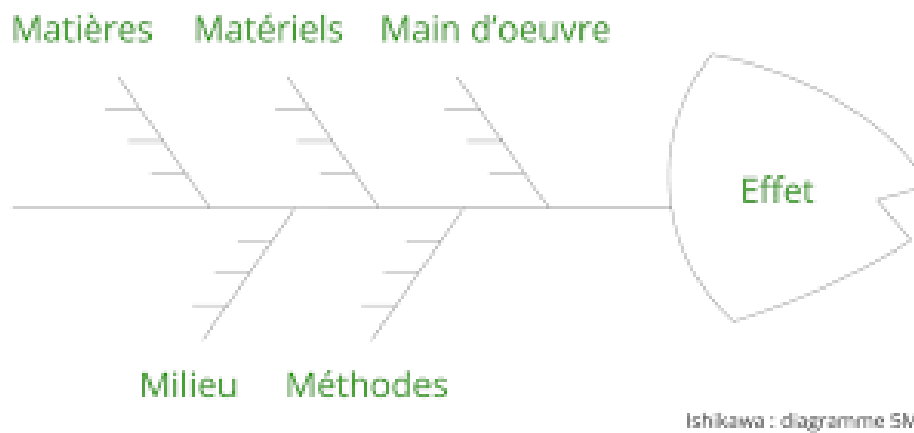


Figure 2 : Diagramme d'Ishikawa (ou des 5M) (3)

Cet outil est utilisé lors des réunions de résolution de problèmes, des audits ou dans des démarches d'amélioration. (1)

2.4.3. AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) :

L'AMDEC est une méthode d'analyse préventive utilisée pour identifier les défaillances potentielles d'un produit ou d'un processus, évaluer leur gravité, leur fréquence et leur détectabilité, afin de prioriser les actions correctives.

Elle se base sur trois critères :

- **Gravité (G)** : Importance de l'effet sur le client ou le processus.
- **Occurrence (O)** : Probabilité que la défaillance se produise.
- **Détectabilité (D)** : Capacité du système à détecter la défaillance avant qu'elle n'atteigne le client.

Le **critère de priorité (Indice de Criticité)** est souvent calculé selon :

$$IC=G \times O \times D$$

Équation 1 : critère de priorité

Plus cet indice est élevé, plus il est urgent de mettre en place une action corrective. (1)

2.4.4. Outils Graphiques et Statistiques de la Qualité :

Plusieurs outils visuels et statistiques sont utilisés pour surveiller, analyser et présenter les données de qualité :

- **Histogrammes** : Représentation graphique de la distribution d'un ensemble de données (ex : tolérances de mesure).
- **Cartes de contrôle** : Utilisées pour suivre la stabilité d'un processus dans le temps et détecter les dérives (ex : X-barre, R, p...).
- **Diagrammes de Pareto** : Outil basé sur le principe 80/20, qui permet d'identifier les causes principales responsables de la majorité des problèmes.
- **Diagrammes de dispersion** : Pour analyser les corrélations entre deux variables (ex : température vs rendement).
- **Feuilles de relevé (check-lists)** : Outil simple pour recueillir et structurer les données d'inspection ou de production.

- **Stratification** : Technique consistant à regrouper des données en catégories pour faciliter leur analyse. (1)

2.5 Normes et systèmes de management de la qualité :

Les systèmes de management de la qualité sont des cadres de référence mis en place par les entreprises pour structurer, maîtriser et améliorer leurs processus internes, tout en garantissant la conformité aux exigences des clients, aux réglementations en vigueur, et aux attentes des parties intéressées. Ces systèmes reposent souvent sur des normes internationales reconnues, parmi lesquelles : (4)

2.5.1 ISO 9001 : Système de management de la qualité : La norme ISO 9001 est la plus répandue au monde dans le domaine du management de la qualité. Elle définit les exigences qu'un organisme doit respecter pour mettre en place un système de management de la qualité (SMQ) efficace. Ses objectifs principaux sont :

- **Amélioration de la satisfaction client** grâce à une meilleure compréhension et maîtrise des besoins.
- **Organisation et optimisation des processus internes** (production, gestion documentaire, ressources humaines...).
- **Maîtrise des non-conformités** et mise en œuvre d'actions correctives et préventives.
- **Amélioration continue** par le biais d'indicateurs de performance, d'audits internes et de revues de direction.

La structure de la norme suit la logique du cycle PDCA (Plan, Do, Check, Act), qui permet un pilotage dynamique de la qualité. (4)

2.5.2 ISO 14001 : Management environnemental : La norme ISO 14001 spécifie les exigences relatives à un système de management environnemental (SME). Elle permet à une organisation de :

- Identifier et contrôler ses impacts environnementaux (émissions, déchets, consommation énergétique...).
- Se conformer aux obligations légales et réglementaires en matière d'environnement.
- Intégrer des pratiques plus durables et réduire son empreinte écologique.
- Démontrer à ses parties prenantes son engagement environnemental.

Elle est souvent utilisée conjointement avec la norme ISO 9001 dans une logique de management intégré. (4)

2.5.3 ISO 45001 : Santé et sécurité au travail (SST) : La norme ISO 45001 remplace l'ancienne norme OHSAS 18001. Elle établit un cadre pour améliorer la sécurité des employés, réduire les risques liés au travail et créer de meilleures conditions de travail. Elle permet à une entreprise de :

- Identifier les dangers et évaluer les risques professionnels.
- Mettre en œuvre des mesures de prévention et de protection.
- Favoriser une culture de la sécurité et la participation active du personnel.
- Réduire les accidents de travail et améliorer le bien-être général des collaborateurs. (4)

3. Contrôle qualité en industrie :

3.1 Définition et rôle du contrôle qualité en industrie :

Le contrôle qualité en industrie désigne l'ensemble des activités techniques et organisationnelles mises en œuvre pour vérifier que les produits fabriqués sont conformes aux exigences spécifiées, qu'elles soient techniques, réglementaires ou contractuelles.

Il consiste à surveiller, mesurer, tester et examiner les produits à différentes étapes de la production afin de :

- Détecter les non-conformités ou défauts,
- Prendre des mesures correctives ou préventives,
- Garantir une qualité constante,
- Et assurer la satisfaction du client final.

Le contrôle qualité ne se limite pas à la détection des défauts, il contribue aussi à l'amélioration continue des processus, à la réduction des coûts de non-qualité, et au respect des normes internationales telles que l'ISO 9001. (5)

3.2 Importance du contrôle qualité :

Le contrôle qualité est un élément central dans tout processus de production, quel que soit le secteur d'activité. Il vise à garantir que les produits ou services répondent aux exigences

définies en termes de performance, de sécurité, de fiabilité et de conformité aux normes en vigueur.

Son importance se manifeste à plusieurs niveaux :

- **Assurance de la qualité et de la performance** : Le contrôle qualité permet de s'assurer que chaque produit respecte les spécifications techniques, garantissant ainsi sa performance et sa durabilité.
- **Satisfaction du client** : Un produit conforme aux attentes améliore la satisfaction des clients et renforce la confiance envers l'entreprise.
- **Réduction des coûts** : En identifiant les défauts tôt dans le processus, il est possible de limiter les rebuts, les reprises et les pertes, ce qui optimise les ressources et réduit les coûts de non-conformité.
- **Amélioration continue** : Les données issues du contrôle qualité permettent de détecter les sources de variabilité et de mettre en place des actions correctives et préventives, contribuant ainsi à l'amélioration continue du système de production.
- **Conformité réglementaire** : Le respect des normes et des réglementations (ISO, normes sectorielles, etc.) est indispensable pour accéder aux marchés et éviter les sanctions juridiques. (5)

3.3 Types de Contrôle Qualité :

Le contrôle qualité regroupe l'ensemble des opérations de vérification visant à s'assurer qu'un produit ou un processus respecte les exigences définies (normes, spécifications techniques, besoins clients...).

Selon l'étape du processus industriel où il est appliqué, on distingue plusieurs types de contrôle : (5)

3.3.1 Contrôle à Réception :

Ce contrôle est effectué lors de la réception des matières premières, des composants ou des produits semi-finis provenant de fournisseurs ou sous-traitants.

Objectifs :

- Vérifier la conformité aux spécifications d'achat (quantité, dimensions, composition, certificat...).

- Éviter d'introduire des défauts dans la chaîne de production.
- Garantir la qualité des intrants.

Méthodes utilisées :

- Inspection visuelle.
- Mesures dimensionnelles.
- Analyses chimiques ou physiques.
- Contrôle documentaire (certificats de conformité, fiches techniques...).

3.3.2 Contrôle en Cours de Fabrication :

Également appelé contrôle en process, il se fait directement sur la ligne de production, à différents points clés.

Objectifs :

- Détecter rapidement les écarts ou anomalies pendant la fabrication.
- Ajuster les paramètres du processus en temps réel.
- Réduire les rebuts, retouches et pertes de matières premières.

3.3.3 Contrôle Final :

Ce contrôle est effectué à la fin de la chaîne de production, juste avant la livraison ou la mise en stock du produit fini.

Objectifs :

- Valider la conformité du produit par rapport aux spécifications du client ou du cahier des charges.
- Empêcher la sortie de produits non conformes.
- Fournir une base de traçabilité.

Peut inclure :

- Tests fonctionnels (ex : résistance, performance...).
- Analyses chimiques finales.
- Vérification esthétique ou dimensionnelle.

- Contrôle documentaire (étiquetage, emballage, certificat de qualité...).

3.3.4 Contrôle Destructif vs Non Destructif :

Ce critère concerne la méthode de contrôle elle-même, qu'elle soit intrusive ou non :

- **Contrôle destructif** : l'échantillon est endommagé ou détruit pendant le test.
Exemples : essais de traction, titrage chimique, test de rupture.
- **Contrôle non destructif (CND)** : le produit reste intact après le test.
Exemples : inspection visuelle, radiographie, ultrasons, thermographie...

4. Méthodes d'analyse chimique courantes :

4.1 Classification des méthodes d'analyse chimique :

Les méthodes d'analyse chimique sont classées selon plusieurs critères, notamment la nature des interactions physico-chimiques exploitées, la technique utilisée, ou encore la précision recherchée. On distingue principalement : (6)

- **Les méthodes classiques ou gravimétriques** : basées sur la mesure de masse (précipitation, évaporation...). Elles sont précises mais longues à mettre en œuvre.
- **Les méthodes volumétriques (ou titrimétriques)** : reposent sur la mesure de volumes d'une solution titrante pour déterminer la concentration d'un analyte. Ex. : titrage acido-basique, complexométrique, rédox...
- **Les méthodes instrumentales** : elles utilisent des instruments pour détecter ou mesurer des signaux physiques liés à la concentration d'une espèce chimique :
 - ✓ **Spectroscopie** (UV-visible, IR, AAS)
 - ✓ **Chromatographie** (GC, HPLC)
 - ✓ **Électrochimie** (potentiométrie, conductimétrie)
 - ✓ **Analyse thermique** (TGA, DSC)
- **Les méthodes qualitatives** : permettent d'identifier une substance (présence ou absence).
- **Les méthodes quantitatives** : permettent de mesurer une concentration ou une quantité précise d'un élément ou composé.

4.2 Critères de choix d'une méthode d'analyse :

Le choix d'une méthode d'analyse dépend de plusieurs facteurs techniques, économiques et contextuels, parmi lesquels : (6)

- **La nature de l'échantillon** : état physique (solide, liquide, gaz), complexité de la matrice, homogénéité, etc.
- **Le type d'information recherchée** : identification d'un composé (analyse qualitative) ou dosage précis (analyse quantitative).
- **La sensibilité et la précision requises** : dépendent des normes de qualité, des tolérances industrielles, ou des réglementations en vigueur.
- **Le temps d'analyse disponible** : certaines méthodes sont plus rapides (spectrophotométrie) que d'autres (gravimétrie).
- **La disponibilité du matériel et des compétences** : certaines techniques exigent un équipement coûteux ou un personnel formé.
- **Le coût global de l'analyse** : en fonction des réactifs, du temps, de la main-d'œuvre, etc.
- **Les exigences réglementaires et normatives** : certaines industries imposent des méthodes précises validées ou normalisées.

4.3 Présentation des méthodes courantes :

Le tableau suivant représente les différentes méthodes d'analyse chimique courantes (6) :

Méthode	Principe	Exemple d'application
Titration volumétrique	Réaction chimique entre réactif connu et analyte	Dosage du CaO libre, acidité, alcalinité...
Spectrophotométrie UV-Vis	Mesure de l'absorbance lumineuse à une longueur d'onde donnée	Dosage de composés colorés (Fe, NO ₃ ⁻ , Cr ³⁺ ...)
Spectrométrie d'absorption atomique (AAS)	Mesure de la concentration d'ions métalliques	Dosage du Pb, Zn, Cu, Mn, Ca...

ICP-OES / ICP-MS	Détection multi-élémentaire à haute sensibilité	Profil élémentaire complet d'un ciment ou clinker
Chromatographie (GC, HPLC)	Séparation des composés chimiques	Détection de solvants, arômes, contaminants
Analyse gravimétrique	Précipitation et pesée d'un composé purifié	Sulfates, silicates, chlorures...
Analyse thermogravimétrique (TGA)	Variation de masse en fonction de la température	Perte au feu, carbonate, chaux libre
PH-métrie / Conductimétrie	Mesures électrochimiques simples	Contrôle d'acidité, salinité, ions dissous

Tableau 1 : les différentes méthodes d'analyse chimique courante (6)

5. Le Titrage comme Méthode d'Analyse :

5.1 Définition et principe du titrage :

Le titrage est une méthode analytique volumétrique qui permet de déterminer avec précision la concentration d'une substance dans une solution en la faisant réagir avec un réactif de concentration connue. C'est une méthode largement utilisée dans les laboratoires de contrôle qualité industriels, car elle est simple, fiable et économique. (7)

Le principe repose sur une réaction chimique stœchiométrique entre :

- **L'analyte** : la substance à doser.
- **Le titrant** : une solution de concentration connue.

La réaction est généralement rapide, complète et spécifique. Le volume de titrant nécessaire pour atteindre l'équivalence permet de calculer la concentration de l'analyte :

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2$$

Équation 2 : calcul la concentration de l'analyte

Avec :

- $C1 \cdot V1$: concentration et volume du titrant,
- $C2 \cdot V2$: concentration et volume de l'analyte.

5.2 Étapes d'un titrage :

1. Préparation de la solution à analyser.
2. Ajout d'un indicateur (si titrage colorimétrique).
3. Remplissage de la burette avec le titrant.
4. Ajout goutte à goutte du titrant jusqu'au point d'équivalence (changement de couleur, pH, précipité...).
5. Lecture du volume de titrant utilisé.
6. Calcul de la concentration de l'analyte. (7)

5.3 Types de titrage :

Le tableau suivant représente les différents types de titrage :

Type de titrage	Réaction impliquée	Exemples d'utilisation
Acido-basique	Neutralisation acide/base	Dosage HCl/NaOH, pH produits alimentaires
Redox	Oxydation-réduction	Dosage Fe^{2+} , permanganate de potassium
Complexométrique	Formation de complexes stables	Dosage des ions Ca^{2+} , Mg^{2+} avec l'EDTA
Précipitation	Formation d'un précipité	Dosage des ions Cl^- avec $AgNO_3$
Colorimétrique	Changement de couleur	Suivi visuel ou automatique de l'équivalence

Tableau 2 : Types de titrage (7)

6. Le titrage colorimétrique :

6.1 Définition :

Le titrage colorimétrique est un sous-type de titrage dans lequel le point d'équivalence est détecté grâce à un changement de couleur, observable à l'œil nu ou par un système optique (caméra, photodiode, capteur de couleur). (7)

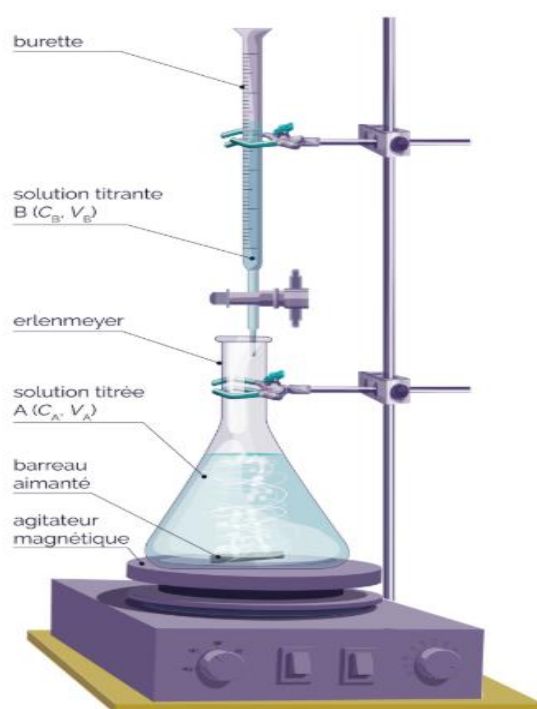


Figure 3 : Montage d'un titrage (7)

Solution	Sb	Sb
Rôle	Solution titrée	Solution titrante
Concentration en quantité de matière de la solution (en mol·L⁻¹)	CA : c'est la concentration en quantité de matière du réactif titré A. La concentration CA est inconnue et on cherche à l'estimer.	CB : c'est la concentration en quantité de matière du réactif titrant B. La concentration CB doit être connue avec précision.

Volume de la solution (en L)	VA : c'est le volume de la solution titrée au début de la manipulation, qui a été placé dans l'ermeneyer.	VB : c'est le volume de réactif titrant, qui est placé dans la burette graduée.
Définition	Une solution titrée est une solution dont on souhaite déterminer la concentration en quantité de matière.	Une solution titrante est une solution qui permet de déterminer la concentration en quantité de matière de la solution titrée.

Tableau 3 : les solutions du titrage (7)

6.2 Principe du titrage colorimétrique :

Le titrage est une méthode analytique consistant à ajouter progressivement un réactif titrant (noté généralement SB), à l'aide d'une burette, dans une solution contenant le réactif titré (SA), placé dans un bécher ou un erlenmeyer. L'objectif est de faire réagir quantitativement les deux espèces jusqu'à la consommation complète du réactif titré.

Au fur et à mesure de l'ajout de la solution titrante, on surveille les modifications visuelles du milieu réactionnel, notamment en fonction du volume versé (VB). Le milieu réactionnel désigne l'ensemble du système chimique dans lequel se déroule la réaction.

On parle de titrage colorimétrique lorsque la détection du point d'équivalence repose sur un changement de couleur, impliquant un ou plusieurs composés colorés :

- Si la solution titrée est colorée, elle perd progressivement sa couleur à mesure que le titrant est ajouté, jusqu'à disparition complète du réactif.
- Si la solution titrante est colorée, la coloration apparaît dans le milieu une fois que tout le réactif titré a été consommé.

Le titrage colorimétrique est un exemple typique de titrage direct, car il repose sur une seule réaction chimique bien définie. À l'opposé, un titrage indirect nécessite plusieurs réactions successives pour aboutir à la détermination de la concentration de l'espèce recherchée. (7)

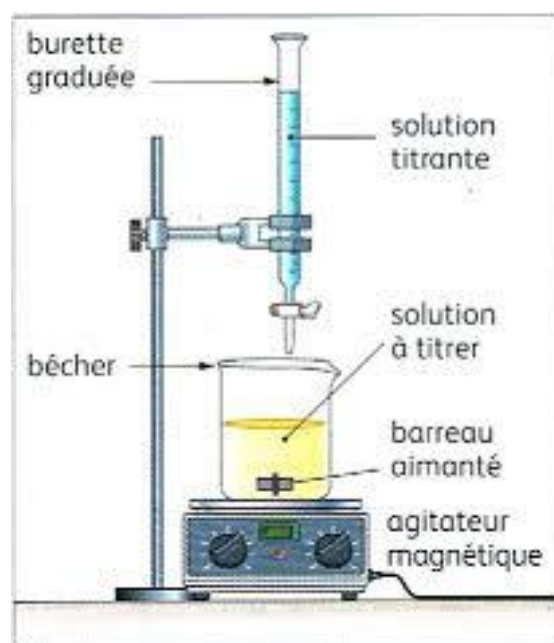


Figure 4 : Principe du titrage colorimétrique (8)

6.3 Point d'équivalence :

Le point d'équivalence est atteint lorsque les deux réactifs sont présents dans les proportions stœchiométriques exactes. À ce moment, la réaction est théoriquement complète, et il ne reste plus d'analyte libre dans le milieu. (7)

La concentration inconnue du réactif titré ($C_{\text{titré}}$) peut alors être calculée en connaissant :

- le volume de solution titrante ajouté à l'équivalence (V_{eq}),
- la concentration connue du titrant,
- et la relation stœchiométrique de la réaction.

$$n_{\text{titrant}} = n_{\text{titré}}$$

Équation 3 : point d'équivalence

En solution, on utilise la relation suivante :

$$C_{\text{titrant}} \times V_{\text{titrant}} = C_{\text{titré}} \times V_{\text{titré}}$$

Équation 4 : point d'équivalence

La courbe suivante représente la variation du pH en fonction du volume :

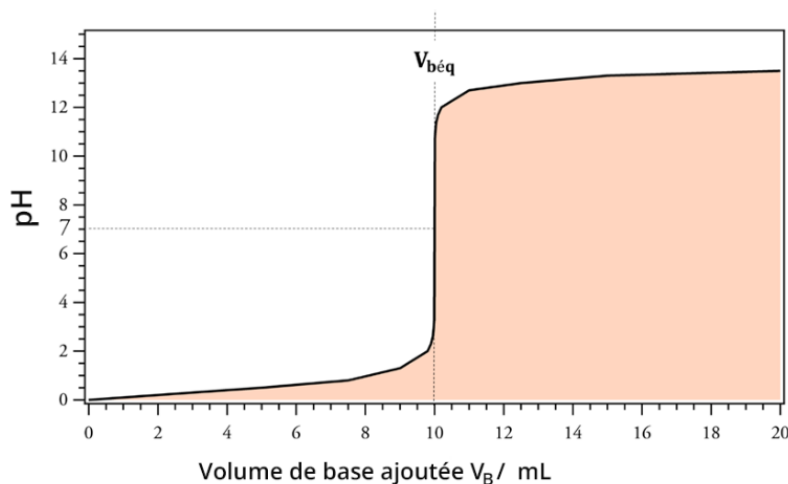


Figure 5 : Variation du pH en fonction du volume (9)

6.4 Domaines d'Application du Titrage Colorimétrique :

Le titrage colorimétrique est largement utilisé dans de nombreux domaines industriels pour le contrôle de la composition chimique, notamment (5) :

6.4.1 Industrie chimique :

- Analyse des solutions acides et basiques.
- Contrôle de la pureté de réactifs.
- Dosage des ions métalliques ou halogénés.

6.4.2 Industrie du ciment et des matériaux :

- Détermination de la teneur en chaux libre (**CaO**) ou en alcalinité.
- Contrôle du sulfate ou de la **silice** par des réactions spécifiques accompagnées de changements de couleur.

6.4.3 Agroalimentaire :

- Mesure de l'acidité des jus, des vins, ou des produits laitiers.
- Contrôle du sel ou des agents conservateurs.

6.4.4 Pharmaceutique :

- Dosage d'ingrédients actifs dans les médicaments.
- Contrôle de la stabilité chimique des produits.

6.4.5 Environnement et traitement des eaux :

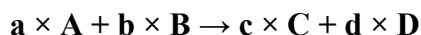
- Détermination du pH et de l'alcalinité.
- Dosage des ions polluants (nitrates, phosphates...).

Ces domaines bénéficient de la simplicité et de l'efficacité du titrage colorimétrique, surtout lorsqu'il est intégré dans un système de contrôle qualité fiable et rigoureux.

6.5 Réaction chimique lors d'un titrage :

Lors du contact entre les deux solutions (SA et SB), une réaction chimique s'effectue : le réactif A (contenu dans SA) réagit avec le réactif B (contenu dans SB) pour donner deux produits : C et D.

La réaction s'écrit de manière générale :



Équation 5 : Réaction chimique lors d'un titrage

où a , b , c et d sont les coefficients stœchiométriques associés à chaque réactif ou produit. Pour être utilisable dans un titrage, une réaction chimique doit impérativement être :

- **Rapide** : elle doit se dérouler quasi instantanément pour ne pas retarder la manipulation.
- **Totale** : l'un des réactifs doit être consommé intégralement (réactif limitant).
- **Unique** : aucune autre réaction ne doit interférer pendant le titrage.

6.6 Facteurs influençant la précision du titrage :

La précision d'un titrage dépend de plusieurs paramètres expérimentaux et chimiques. Voici les principaux facteurs à maîtriser pour obtenir des résultats fiables (7) :

6.6.1 Choix de l'indicateur coloré :

- **Adaptation au pH d'équivalence** : L'indicateur doit changer de couleur (zone de virage) près du point d'équivalence (ex. : phénolphtaléine pour un titrage acide-base fort).
- **Visibilité du virage** : Une transition nette et contrastée améliore la détection.

6.6.2 Précision des instruments de mesure :

- **Burette graduée** : Doit être calibrée et lue avec soin (erreur de parallaxe à éviter).

- **Pipetage précis** : Utilisation d'une pipette jaugée pour prélever la solution titrée.

6.6.3 Conditions de la réaction :

- **Rapidité et totalité** : La réaction doit être quasi instantanée et totale (pour éviter des erreurs dues à des équilibres incomplets).
- **Température** : Certaines réactions sont sensibles à la température (ex. : titrages redox).

6.6.4 Technique opératoire :

- **Agitation homogène** : Mélange régulier pour assurer une réaction uniforme.
- **Vitesse d'ajout du titrant** : Ajout lent près du point d'équivalence pour détecter précisément le virage.

6.6.5 Pureté des réactifs :

- **Solutions titrantes fraîchement standardisées** (ex. : NaOH peut absorber CO₂ et se dégrader).
- **Absence d'impuretés** dans les solutions titrées (filtration si nécessaire).

6.6.6 Volume initial de solution titrée :

- Un volume trop faible peut amplifier les erreurs de lecture.
- Un volume trop dilué peut rendre le virage moins net.

6.6.7 Expérience de l'opérateur :

- **Détection du virage** : Une observation subjective peut introduire des erreurs (formation et pratique requises).
- **Minimisation des erreurs systématiques** (ex. : rinçage correct de la burette).

7. Exemple d'analyse en cimenterie : Dosage de la chaux libre (CaO libre) Méthode au glycérol – Titrage à l'acétate d'ammonium :

7.1 Objectif de l'analyse :

Déterminer la teneur en chaux libre (CaO non combinée) dans le clinker ou le ciment, car une chaux libre excessive peut provoquer des expansions indésirables dans le béton durci (risques de fissuration). (10)

7.2 Document de référence :

Cette procédure est réalisée conformément à la norme EN 196-2, relative aux méthodes d'analyse chimique des ciments.

La norme EN 196-2 est une norme européenne qui fait partie de la série EN 196, utilisée dans le domaine des liants hydrauliques, en particulier le ciment.

Cette norme spécifie les méthodes normalisées pour réaliser les analyses chimiques des ciments. Elle couvre la préparation des échantillons et les techniques d'analyse permettant de déterminer la composition chimique du ciment, telles que :

- La chaux totale (CaO)
- La chaux libre (CaO libre)
- La silice (SiO₂)
- L'alumine (Al₂O₃)
- L'oxyde de fer (Fe₂O₃)
- Le sulfate (SO₃)
- Les alcalins (Na₂O, K₂O)
- La perte au feu (LOI) (10)

7.3 Moyens :

Produits : matière à analyser (clinker ou ciment), glycérine préparée (glycérol) C3H8O3, acétate d'ammonium CH₃COONH₄ préparée (10)

Matériels : Balance de précision, nacelle de pesée, erlenmeyer col étroit de 250ml, bouchon muni d'un tube à refus total en verre d'au moins 50 cm de long, bain de sable, burette graduée, éprouvette graduée de 50 ml, spatule

7.4 Mode opératoire :

- Prélever après avoir bien homogénéisé 1 gramme pesé à 0,01 près
- Transférer cette quantité dans un erlenmeyer propre et sec
- Ajouter ensuite 40 ml de la solution de glycérine
- Fermer avec un bouchon muni d'un tube à refus total en verre d'au moins 50 cm de long
- Porter sur bain de sable et remuer à chaud de temps à autre
- Verser goutte à goutte la solution d'acétate d'ammonium CH₃COONH₄ de titre connu jusqu'à disparition momentanée de la colorisation rose

- Répéter l'opération jusqu'à la colorisation rose disparaisse totalement après environ 15 à 30 mn de suivi
- Noter le volume d'acétate versé $V_{\text{acétate}}$ (10)



Figure 6 : Détermination de la chaux libre

7.5 Calculs :

Le calcul de la chaux libre comme suit :

$$\text{CaO} = V_{\text{acétate}} \times F_{\text{acétate}}$$

Équation 6 : calcul de la chaux libre

Le pourcentage acceptable de chaux libre (CaO libre) dans le ciment Inférieure ou égale à 2 % (masse par rapport au ciment total)

8. Vers une automatisation du titrage colorimétrique :

8.1 Limites du titrage colorimétrique manuel :

Le titrage colorimétrique manuel présente des limites importantes, notamment la subjectivité de la détection du point d'équivalence due à la perception visuelle variable des opérateurs, une reproductibilité insuffisante entre essais, un temps d'analyse élevé incompatible avec les besoins industriels, et des difficultés de précision avec des échantillons complexes comme ceux du ciment (turbidité, interférences).

Ces contraintes justifient le développement de systèmes automatisés de titrage combinant des capteurs optiques pour une détection objective, des burettes automatiques pour un dosage précis et des algorithmes de traitement du signal. Une telle instrumentation permettrait d'améliorer significativement la reproductibilité, la rapidité et la fiabilité des analyses, répondant ainsi aux exigences strictes du contrôle qualité industriel tout en facilitant l'intégration dans des processus automatisés et l'analyse des données en temps réel.

8.2 Erreur de mesure :

8.2.1 Définition :

L'erreur de mesure est la différence entre la valeur mesurée d'une grandeur et sa valeur de référence (valeur vraie ou conventionnelle).

On peut parler d'erreur lorsque la valeur de référence est bien définie (par exemple : un étalon de référence très précis ou une valeur acceptée par convention).

Parfois, on suppose simplement que la grandeur mesurée a une valeur vraie unique (ou très proche d'une valeur fixe), même si elle n'est pas parfaitement connue.

À ne pas confondre avec une erreur humaine ou une erreur de fabrication. (11)

8.2.2 Types d'erreur de mesures :

Il existe deux types d'erreur (11) :

Erreur systématique	Erreur aléatoire
C'est une erreur qui reste constante ou qui varie de manière prévisible lors de mesures répétées. Par exemple : • Un instrument mal calibré qui donne toujours une valeur trop élevée ou trop basse. • Une méthode de mesure qui introduit toujours la même déviation.	C'est une erreur qui change de façon imprévisible d'une mesure à l'autre, même si l'on mesure exactement la même chose. Elle est due à : • De petites variations dans les conditions de mesure (température, vibrations, etc.). • Des limites de précision de l'instrument. Si on répète plusieurs fois la même mesure, ces erreurs suivent une distribution

Si elle est connue, on peut corriger l'erreur systématique.	statistique. Leur moyenne tend vers zéro, mais elles influencent la dispersion des résultats.
---	---

Tableau 4 : définition entre erreur systématique et erreur aléatoire (11)

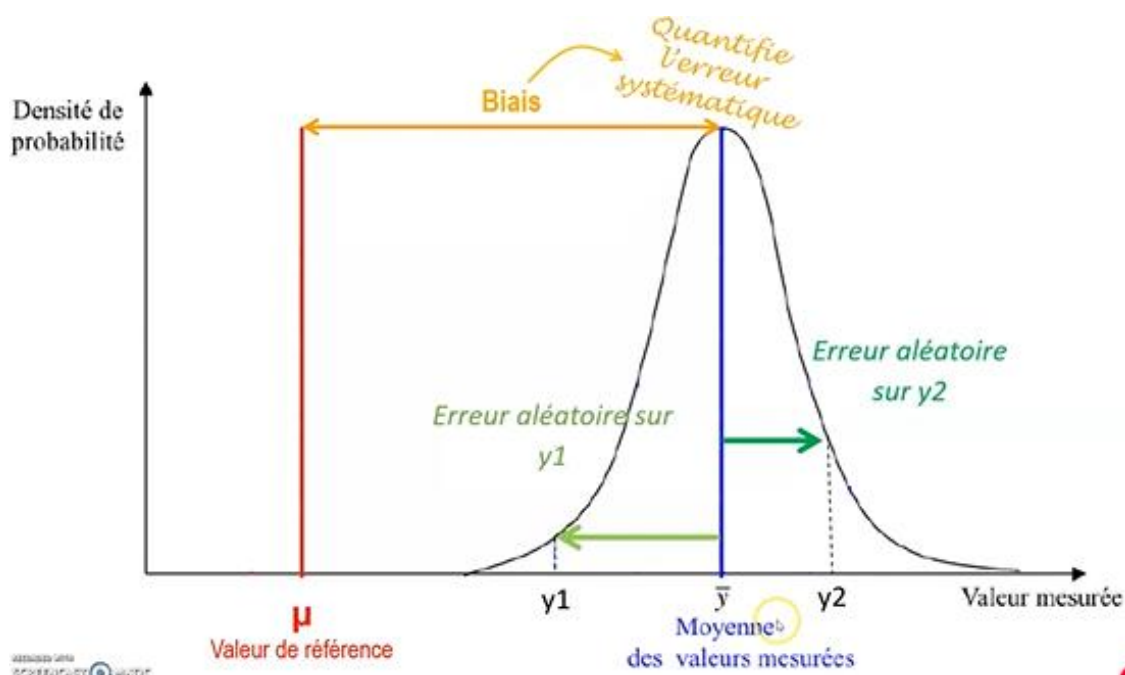


Figure 7 : différence entre erreur systématique et erreur aléatoire (12)

8.2.3 Exemples d'erreurs lors d'un titrage manuel :

8.2.3.1 Erreur d'observation de la couleur :

Lors d'un titrage manuel, l'opérateur attend un changement de couleur indiquant le point d'équivalence (par exemple : du rose clair au incolore pour un titrage acide-base avec la phénolphthaléine).

Cette détection repose sur la perception visuelle humaine, ce qui présente plusieurs limites :

- ✓ **Mauvais éclairage** : une lumière trop faible ou artificielle peut fausser la perception des couleurs.
- ✓ **Couleur ambiguë** : certaines couleurs intermédiaires sont difficiles à distinguer, en particulier avec des indicateurs dont la transition est progressive.
- ✓ **Fatigue visuelle ou inattention** : l'opérateur peut dépasser le point d'équivalence en ne fermant pas la burette à temps.

8.2.3.2 Erreur de fermeture du robinet :

Le débit de réactif est contrôlé manuellement à l'aide du robinet de la burette. Des erreurs peuvent survenir :

- **Ouverture trop brusque** : provoque un écoulement excessif du réactif.
- **Fermeture tardive** : un retard de réaction de l'opérateur entraîne l'ajout de trop de réactif.
- **Robinet défectueux ou mal graissé** : difficulté à tourner avec précision, augmentant les risques d'erreur de dosage.

8.2.3.3 Erreur de lecture du volume :

La lecture du volume sur la burette doit se faire avec précision. Plusieurs facteurs peuvent introduire une erreur :

- **Mauvaise lecture du ménisque** : la lecture doit être faite à hauteur des yeux, en observant le bas du ménisque (surface concave du liquide).
- **Inclinaison de la burette** : une burette penchée fausse la lecture.
- **Burette sale ou bulles d'air** : affectent le niveau visible du liquide.

8.3 Rôle de l'instrumentation et de la métrologie :

L'instrumentation joue un rôle central dans la mise en œuvre d'un système de titrage automatisé. Elle permet :

- La mesure précise du volume de réactif injecté (ex. : via un débitmètre).
- La détection automatique du changement de couleur (ex. : par caméra ou capteur optique).
- Le pilotage d'un dispositif d'injection contrôlé électroniquement (ex. : électrovanne, pompe péristaltique).
- La communication des résultats à un tableau de bord ou à un logiciel de supervision.

La métrologie intervient, quant à elle, pour :

- Assurer la traçabilité et l'étalonnage des capteurs utilisés.
- Garantir la conformité aux normes de mesure.
- Évaluer l'incertitude de mesure pour valider les résultats obtenus.

9. Conclusion :

Le chapitre met en évidence l'importance du contrôle qualité et des analyses chimiques pour garantir la conformité des produits industriels. Le titrage colorimétrique, bien que largement utilisé, montre des limites lorsqu'il est réalisé manuellement. L'exemple en cimenterie justifie le recours à l'automatisation, qui permet d'optimiser la précision, la répétabilité et l'intégration dans des systèmes de production modernes. Ce constat ouvre logiquement la voie au chapitre suivant, dédié à la conception d'un système de titrage automatisé basé sur l'instrumentation et la métrologie

Chapitre 2 : Instrumentation et Métrologie appliquées au projet

1. Introduction :

Ce chapitre expose les bases de l'instrumentation et de la métrologie appliquées au contrôle qualité dans le cadre du projet de titrage automatisé, il traite d'abord des notions fondamentales de l'instrumentation : grandeurs physiques, unités du Système international, chaîne de mesure, capteurs, conditionneurs et transmetteurs. La deuxième partie est consacrée à la métrologie, en abordant des concepts essentiels tels que l'exactitude, la fidélité, la traçabilité, l'étalonnage et l'incertitude de mesure.

Ces notions sont essentielles pour assurer la fiabilité, la répétabilité et la conformité du système de mesure intégré dans le dispositif automatisé développé.

2. Définition et rôle de l'instrumentation :

L'instrumentation englobe tous les appareils, capteurs, systèmes de mesure et outils de commande utilisés pour observer, surveiller, mesurer ou contrôler un processus physique ou chimique. Elle assure la liaison entre le phénomène observé et l'utilisateur, en transformant une grandeur physique en une information utilisable (électrique, numérique, visuelle). En automatisation, l'instrumentation est essentielle pour l'acquisition de données et la gestion des systèmes. (13)

L'instrumentation industriel garantit la stabilité, la sécurité et la performance des opérations en fournissant des mesures précises et en temps réel de paramètres critiques tels que la pression, la température, le débit, le pH, la concentration. Elle est également essentielle pour la régulation, le diagnostic, la maintenance préventive et la traçabilité des données. Son rôle en laboratoire chimique est d'assurer la précision des analyses, l'automatisation des essais et de contribuer au respect des normes de qualité et de sécurité. (13)

Dans le domaine de la chimie, l'instrumentation englobe des appareils analytiques tels que des pH-mètres, des spectrophotomètres, des chromatographes, des capteurs spécifiques tels que des capteurs de température, de pression, de gaz, etc., ainsi que des dispositifs de dosage et de mesure. Elle permet d'évaluer les caractéristiques chimiques des substances, de suivre l'évolution des réactions et de contrôler la qualité des matières premières et des produits finis. L'intégration de cette instrumentation dans des systèmes automatisés, comme dans le cas du titrage colorimétrique automatisé, contribue à améliorer la précision, à réduire les erreurs humaines et à améliorer la reproductibilité des résultats. (13)

3. Une grandeur physique :

3.1 Définition d'après le VIM :

Grandeur est une propriété d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, que l'on peut exprimer quantitativement sous forme d'un nombre et d'une référence. (14)

Définition simplifier : Une grandeur physique est un ensemble d'unités de mesure, de variables, d'ordres de grandeur et de méthodes de mesure (qui sont l'objet de la métrologie) lié à un aspect ou phénomène particulier de la physique.

Il existe deux catégories des grandeurs physiques :

- **Grandeur mesurable :** Une grandeur est dite mesurable si on peut lui affecter une valeur numérique à partir d'observations. En outre, la somme et/ou le produit de grandeurs mesurables à une signification. Parmi les grandeurs mesurables, on peut citer la longueur, la température absolue, la résistance.
- **Grandeur repérable :** Une grandeur est dite repérable si la somme et le produit de cette grandeur n'ont pas de sens. Parmi les grandeurs repérables, on peut citer la température centésimale (°C), la date, le potentiel électrique. (14)

3.2 Système international (SI) :

Le système international d'unités (SI) est le système pratique de mesures adopté officiellement en 1960 et qui constitue le système d'unités légal dans la plupart des pays du monde. (14)

Il définit les unités de base utilisées en science de la mesure. Le système SI définit 7 unités de base (le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin, la mole et candela) ainsi que 22 unités dérivent.

Ce système est supervisé par le BIPM (bureau international des poids et mesures).



Figure 8 : les sept unités de base (15)

3.3 Unité de mesure :

D'après le VIM : Grandeur scalaire réelle, définie et adoptée par convention, à laquelle on peut comparer toute autre grandeur de même nature pour exprimer le rapport des deux grandeurs sous la forme d'un nombre. (14)

Le tableau présente la différence entre l'unité de base et l'unité dérivée :

Unité de base	Unité dérivée
Longueur (m)	Energie (J)
Quantité de matière (mole)	Pression (Pa)
Masse (kg)	Capacité électrique(F)
Temps (s)	Conductance électrique(s)
Intensité lumineuse (cd)	Résistance électrique (ohm)
Intensité électrique (A)	Tension(v)
Température (K)	Charge électrique(c)

Tableau 5 : la différence entre l'unité de base et l'unité dérivée (14)

4. Chaîne de mesure en instrumentation :

4.1 Définition :

La chaîne de mesure est un ensemble organisé de composants permettant de détecter une grandeur physique ou chimique, de la transformer en un signal exploitable, de la traiter, puis de l'exploiter sous forme d'une information compréhensible ou utilisable pour le contrôle. Elle constitue un lien direct entre le phénomène mesuré et le système de traitement ou de décision. Elle se compose typiquement de cinq éléments clés (16):

- Capteur (transduction)
- Conditionnement du signal
- Conversion analogique-numérique (si nécessaire)
- Traitement des données (microcontrôleur, automate, PC)
- Affichage, stockage ou commande d'action

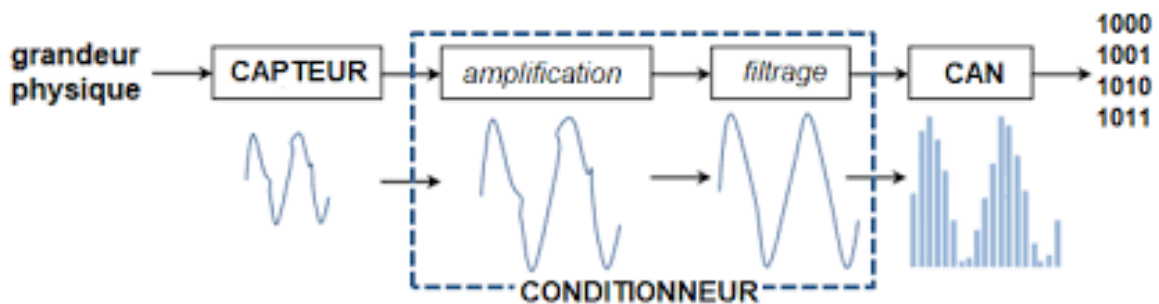


Figure 9 : Chaîne de mesure (16)

4.2 Types de chaînes de mesure :

Selon la nature de la grandeur mesurée, l'environnement d'utilisation ou les objectifs du système, on distingue plusieurs types de chaînes de mesure (16) :

1. Chaîne de mesure analogique

- La mesure est réalisée, traitée et transmise sous forme analogique (ex. tension, courant).
- Utilisée dans des systèmes simples, mais sensible aux perturbations (bruit, interférences).

2. Chaîne de mesure numérique

- Le signal est converti en données numériques rapidement après la détection.
- Elle offre une meilleure précision, permet le stockage et le traitement par ordinateur ou microcontrôleur.

3. Chaîne de mesure directe

- Le capteur fournit une information directement lisible (par exemple, un thermomètre numérique).
- Adaptée aux mesures simples, sans traitement complexe.

4. Chaîne de mesure à retour (ou régulation)

- Elle intègre une boucle de rétroaction permettant d'agir automatiquement sur le processus (ex. ouverture/fermeture d'une vanne selon le résultat mesuré).
- Utilisée en automatisation et contrôle de procédé.

5. Chaîne de mesure hybride

- Combine des éléments analogiques et numériques.
- Courante dans les systèmes embarqués (ex. Arduino) où les capteurs délivrent un signal analogique traité ensuite numériquement.

5. Capteur :

5.1 Définition :

Un capteur est un dispositif de prélèvement d'informations qui élabore, à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (généralement électrique) image de la grandeur prélevée, et utilisable à des fins d'indication de mesure. (17)

- **Entrée** : grandeur physique C'est la grandeur d'entrée du capteur (position, pression, température, niveau, déplacement, ...) qui fournit par son état ou ses variations, une information utile à l'unité d'acquisition et de traitement.
- **Sortie** : grandeur électrique C'est la grandeur de sortie du capteur, précisément de la chaîne de mesure.

Ce signal de sortie électrique, dit exploitable, peut être de nature :

1. Analogique (continu dans le temps)
2. Logique (binaire 0 ou 1, ou TOR : tout ou rien)
3. Numérique (valeur > à deux états)



Figure 10 : principe de capteur (16)

5.2 Types de capteur :

On peut en distinguer deux types (17) :

5.2.1 Capteur actif : Les capteurs actifs utilisent des circuits électroniques ou des amplificateurs pour conditionner et amplifier le signal mesuré avant de le transmettre au système de contrôle ou à l'électronique. L'électronique intégrée dans les capteurs actifs peut filtrer, linéariser, corriger ou convertir le signal dans d'autres formats afin de le rendre apte à un traitement ultérieur

Exemples : capteurs à ultrasons, capteurs infrarouges, capteurs laser, capteurs de pression, capteurs d'accélération



Figure 11 : Capteur ultrason (18)

5.2.2 Capteur passif : Les capteurs passifs fonctionnent généralement sur la base d'un changement physique, comme une variation de la résistance électrique ou de la capacité. Lorsqu'un capteur est exposé à un changement, le signal mesuré change sans que le capteur lui-même ait besoin d'une alimentation électrique.

Exemples : les capteurs de température tels que les thermocouples et les sondes à résistance (RTD), capteurs de lumière, capteurs de champ magnétique, capteurs de flux

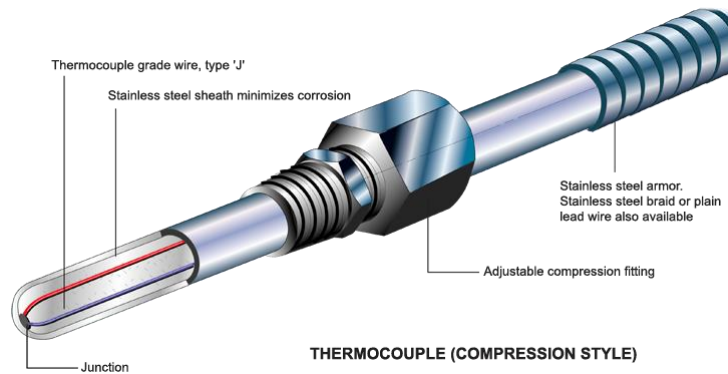


Figure 12 : Thermocouple type J (19)

5.3 Caractéristiques générales d'un capteur :

Le choix d'un capteur dépend de plusieurs caractéristiques techniques qui influencent directement la qualité et la fiabilité des mesures. Les principales caractéristiques générales d'un capteur sont (16) :

- **La sensibilité** : capacité du capteur à réagir à une variation de la grandeur mesurée. Une bonne sensibilité permet de détecter même de faibles variations.
- **La précision** : degré de fidélité avec lequel le capteur mesure la grandeur réelle. Elle reflète l'écart entre la valeur mesurée et la valeur réelle.
- **La justesse (ou exactitude)** : combinaison de la précision et de l'erreur systématique. Un capteur juste fournit une valeur proche de la vraie valeur.
- **La linéarité** : capacité du capteur à fournir une sortie proportionnelle à la grandeur mesurée sur une certaine plage.
- **La répétabilité** : aptitude du capteur à donner les mêmes résultats pour une même mesure, dans les mêmes conditions, sur plusieurs essais.
- **Le temps de réponse** : délai nécessaire au capteur pour fournir une mesure stable après une variation de la grandeur à mesurer.
- **La plage de mesure** : intervalle dans lequel le capteur peut effectuer des mesures fiables sans saturer ni être endommagé.
- **La dérive** : variation lente de la mesure dans le temps, même si la grandeur mesurée reste constante.
- **La robustesse** : résistance du capteur aux conditions environnementales (température, humidité, vibrations, agents chimiques, etc.).

5.4 Constitution d'un capteur :

Le capteur est constitué de plusieurs éléments, le corps d'épreuve est celui en contact direct avec le mesurande. Il génère une grandeur physique intermédiaire (déplacement, déformation, force) traduite en une grandeur électrique (tension, capacité, induction) par le transducteur. (13)

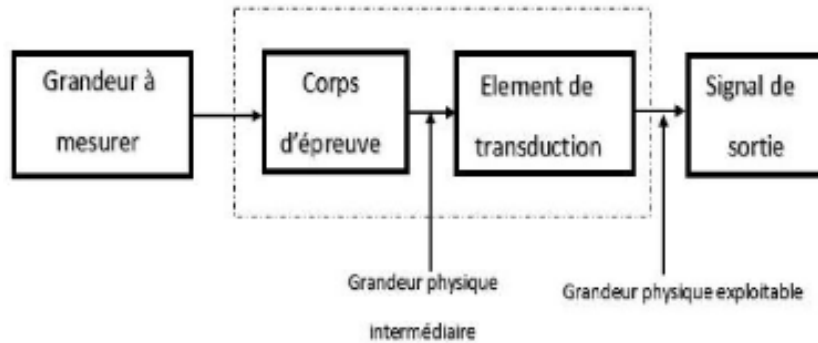


Figure 13 : constitution d'un capteur (20)

En pratique, les termes capteur et transducteur désignent le même constituant, traduit en anglais par les mots sensor et transducer.

6. Conditionneurs :

6.1 Définition : C'est un mécanisme qui garantit la transformation de l'ampleur électrique produite par le capteur en une amplitude électrique utilisable par l'organe de traitement. Le conditionneur est un assemblage électronique qui, de manière générale, couvre l'ensemble de la chaîne instrumentale. (16)

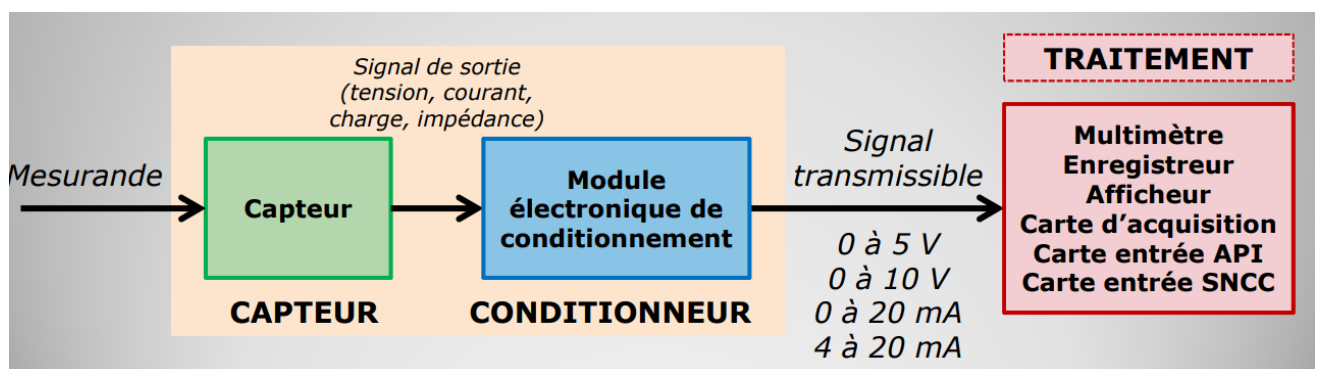


Figure 14 : Conditionnement du signal (16)

6.2 Rôle du conditionneur :

Le conditionneur de signal joue un rôle essentiel dans une chaîne de mesure. Placé entre le capteur et le système d'acquisition ou de traitement, il adapte le signal brut émis par le capteur afin qu'il soit exploitable, fiable et conforme aux exigences du système de mesure. (16)

6.3 Principales fonctions du conditionneur :

- **Amplification** : Le signal issu du capteur est souvent de faible amplitude (ex. quelques millivolts). Le conditionneur amplifie ce signal pour le rendre lisible et utilisable par l'électronique de traitement (ex. microcontrôleur, carte d'acquisition).
- **Filtrage** : Il permet d'éliminer les bruits parasites ou les interférences indésirables pouvant perturber la mesure, notamment les hautes fréquences ou les variations rapides non significatives.
- **Adaptation d'impédance** : Il assure une bonne compatibilité électrique entre le capteur et les circuits de traitement, ce qui évite des pertes de signal ou des erreurs de mesure.
- **Conversion** :
 - **Analogique à numérique (ADC)** : pour convertir le signal analogique du capteur en données numériques.
 - **Tension/courant (ex. 0-10V à 4-20 mA)** : selon le protocole ou le standard utilisé.
- **Isolation** :

Le conditionneur peut isoler électriquement le capteur du reste du système, afin de protéger l'électronique contre les surtensions, les boucles de masse ou les perturbations électriques. (17)

7. Transmetteurs :

7.1 Définition :

D'après la norme NFC 46-303, un transmetteur est un appareil qui, recevant une vraie variable mesurée, produit un signal de sortie normalisé pouvant être transmis et ayant une relation continue et définie avec la valeur de la variable mesurée. (21)



Figure 15 : Transmetteur de pression Wika (22)

Le transmetteur est constitué d'un capteur associé à son conditionneur, il permet ainsi la transmission de signaux exploitables pour la plupart des appareils de contrôle commande industriels. (21)

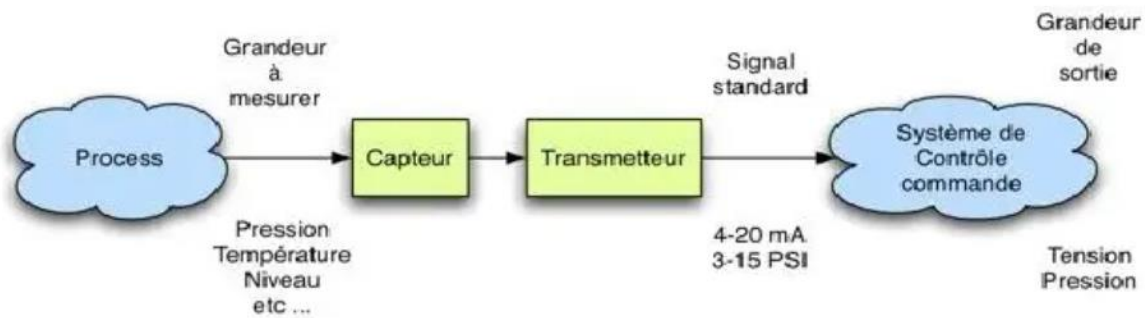


Figure 16 : Rôle du transmetteur

7.2 Constitution d'un transmetteur :

Pour produire un signal normalisé à partir du signal issu du capteur, le transmetteur est généralement composé d'un amplificateur, d'un filtre et d'un traitement du signal. Ainsi, il s'intègre dans le processus de mesure du capteur. (13)

- **L'amplificateur** : en renforçant l'intensité du signal électrique E_1 émis par le capteur et en diminuant le ratio « bruit de fond / signal », améliore donc la qualité du signal E_2 délivré.
- **Le filtre** : supprime ou diminue les signaux indésirables dans certaines plages de fréquences afin d'assurer un signal de mesure E_3 adéquat.
- **Le traitement du signal** : réalise la fonction finale désirée, généralement linéaire, entre le mesurande P et la mesure I , et détermine la nature (tension ou courant), et l'intensité du signal de mesure.

Exemple : capteur-transmetteur de pression, le signal émis est un courant I défini par l'équation : $I = a \cdot P + b$, où a et b sont fonctionnels du paramétrage appliqué.

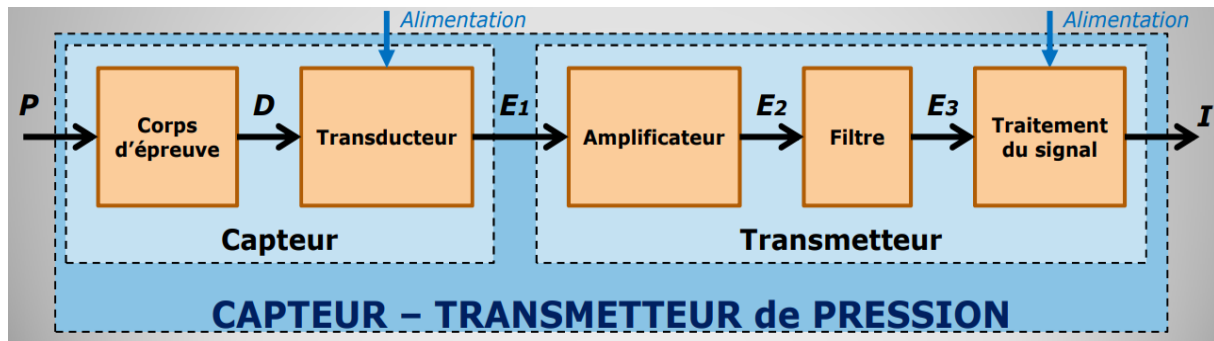


Figure 17 : Constitution d'un transmetteur (13)

7.3 Paramétrage d'un transmetteur :

Le paramétrage d'un transmetteur consiste à configurer ses caractéristiques de fonctionnement pour qu'il corresponde précisément à l'application dans laquelle il est utilisé. Cela permet de garantir que la grandeur physique mesurée soit correctement convertie en signal standardisé (ex. 4-20 mA) exploitable par les systèmes de contrôle (API, PC, afficheur, etc.).

Paramètres couramment réglables :

- **Plage de mesure (ou échelle) :** Définition du Zéro (valeur de début de mesure) et du Span (étendue de mesure). Par exemple, un transmetteur de pression peut être paramétré pour convertir 0 à 10 bars en 4 à 20 mA. Cette étape est essentielle pour que les mesures soient linéaires et précises.
- **Type de sortie :** Choix entre une sortie courant (4–20 mA) (17)

7.4 Transmetteur intelligent :

Un transmetteur intelligent est un dispositif de mesure avancé qui associe un capteur, un conditionneur de signal, un convertisseur et une unité de traitement numérique. Contrairement à un transmetteur classique, il offre des fonctions intelligentes comme (17):

- Communication numérique (HART, Modbus, etc.)
- Auto-diagnostic des erreurs ou dérives
- Compensation automatique des perturbations (température, pression, etc.)
- Mémoire intégrée pour l'historique et la maintenance

- Paramétrage à distance (plage de mesure, unités, alarmes...)

Le transmetteur intelligent offre une meilleure précision, une surveillance continue de l'état de l'équipement, et permet un gain de temps grâce au paramétrage et au diagnostic à distance. Il est très utilisé dans les industries modernes (chimie, énergie, cimenterie...) pour assurer un suivi précis et intelligent des procédés.

8. Traitement des données :

8.1 Transmission des signaux de mesure – Le signal standard 4–20 mA :

Dans les systèmes de mesure industriels, les informations issues des capteurs doivent être transmises de manière fiable vers les unités de traitement. Pour cela, le signal analogique 4–20 mA est l'un des standards les plus utilisés. (16)

Ce signal représente une grandeur physique (pression, température, débit) convertie en un courant électrique proportionnel, compris entre 4 mA (valeur minimale mesurable) et 20 mA (valeur maximale). Contrairement à un signal de tension, ce signal de courant est moins sensible aux interférences, ce qui le rend particulièrement robuste dans les environnements industriels. (13)

Avantages du signal 4–20 mA :

- Faible sensibilité au bruit et aux perturbations électromagnétiques.
- Surveillance facile : un signal inférieur à 4 mA indique souvent un défaut (capteur coupé, alimentation absente...).
- Possibilité d'alimenter le capteur par la même ligne (boucle de courant).

La figure suivante représente un exemple de calcul de la charge maximale pour signale 4-20 mA :

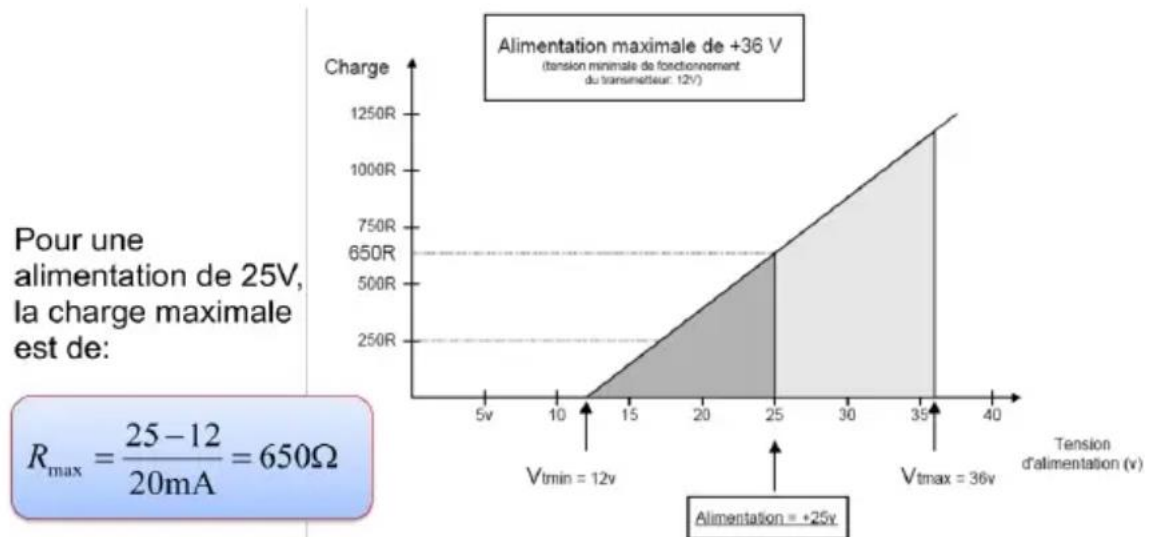


Figure 18 : Calcul de la charge maximale pour signal 4-20 mA (23)

Le signal transmis doit ensuite être interprété et exploité par un système électronique capable d'exécuter des calculs, des comparaisons ou des actions logiques. Ce rôle est généralement assuré par un :

- Microcontrôleur (ex. Arduino, ESP32)
- Automate Programmable Industriel (API / PLC)
- PC avec une carte d'acquisition

Ce système effectue une conversion analogique-numérique (CAN / ADC) pour transformer le signal 4–20 mA en une valeur numérique exploitable.

Ensuite, des traitements peuvent être appliqués :

- Calculs (moyenne, seuils, dérivées)
- Comparaison à des valeurs de consigne
- Détection d'événements (fin de titrage, dépassement de seuil...) (21)

8.2 Affichage, enregistrement et commande d'action :

Une fois les données mesurées et traitées, plusieurs options s'offrent au système (17):

8.2.1 Affichage : La valeur mesurée peut être affichée en temps réel sur :

- Un écran LCD
- Un afficheur 7 segments
- Une interface graphique sur PC ou smartphone

Cela permet à l'opérateur de suivre visuellement l'évolution du titrage ou du paramètre mesuré.

8.2.2 Enregistrement : Les données peuvent être :

- Stockées localement dans une mémoire (EEPROM, carte SD)
- Transmises à distance vers une base de données (via RS-485, Ethernet, Wi-Fi)
- Archivées pour assurer la traçabilité et le contrôle qualité

8.2.3 Commande : Le système peut également prendre des décisions automatiques :

- Activer ou désactiver une électrovanne
- Déclencher une alarme visuelle ou sonore
- Lancer une séquence automatique (rinçage, nettoyage, nouvelle mesure...)

9. Définition et rôle de la métrologie :

D'après le VIM : Science des mesurages et ses applications, La métrologie comprend tous les aspects théoriques et pratiques des mesurages, quels que soient l'incertitude de mesure et le domaine d'application. (14)

Simplifier : La métrologie est la science de la mesure associée à une évaluation de son incertitude. Elle est l'ensemble de techniques permettant d'effectuer une mesure et d'exprimer la qualité de cette mesure.

La mission de la métrologie est d'assurer l'ensemble des actions pour consulter, suivre et entretenir le parc des moyens de contrôle, de mesure et d'essai pour garantir le bon fonctionnement des équipements de fabrication et de contrôle dans le respect des normes internes et externes.

10. Types de la métrologie :

La métrologie est composée de trois types :

- **Métrologie légale :** La métrologie légale est un outil pour la protection des consommateurs et la loyauté des échanges.

- **Métrologie industrielle** : La métrologie industrielle assure la traçabilité et la fiabilité de leurs mesures et essentiel pour maîtriser leurs procédés de la fabrication et de veiller à la qualité de leurs produits.
- **Métrologie fondamentale** : La métrologie fondamentale est consacrée à la recherche sur les unités de SI, et au développement de système de mesure toujours fiable et toujours plus exact en fonction des exigences d'évolution de la société et des technologies. (24)

11. Concepts métrologiques essentiels :

Dans le domaine de la métrologie, il est fondamental de maîtriser un ensemble de concepts clés permettant de garantir la fiabilité, la traçabilité et la comparabilité des mesures. (14)

Le Vocabulaire International de Métrologie (VIM) constitue une référence incontournable, car il permet d'établir un langage commun et harmonisé entre les laboratoires, les industriels, les organismes de contrôle et les fabricants d'instruments. Grâce à ce vocabulaire normalisé, les échanges sont facilités et les interprétations des termes métrologiques deviennent cohérentes à l'échelle internationale.

Voici les principaux termes issus du VIM qu'il convient de connaître dans le cadre de ce projet :

11.1 Exactitude de mesure : étroitesse de l'accord entre une valeur mesurée et une valeur vraie d'un mesurande

- L'exactitude de mesure n'est pas une grandeur et ne s'exprime pas numériquement. Un mesurage est quelquefois dit plus exact s'il fournit une plus petite erreur de mesure.
- Il convient de ne pas utiliser le terme « exactitude de mesure » pour la justesse de mesure et le terme « fidélité de mesure » pour l'exactitude de mesure. Celle-ci est toutefois liée aux concepts de justesse et de fidélité.
- L'exactitude de mesure est quelquefois interprétée comme l'étroitesse de l'accord entre les valeurs mesurées qui sont attribuées au mesurande. (14)

11.2 Justesse de mesure : étroitesse de l'accord entre la moyenne d'un nombre infini de valeurs mesurées répétées et une valeur de référence

- La justesse de mesure n'est pas une grandeur et ne peut donc pas s'exprimer numériquement, mais l'ISO 5725 donne des caractéristiques pour l'étroitesse de l'accord.
- La justesse de mesure varie en sens inverse de l'erreur systématique mais n'est pas liée à l'erreur aléatoire.
- Il convient de ne pas utiliser « exactitude de mesure » pour la justesse de mesure. (14)

11.3 Fidélité de mesure : étroitesse de l'accord entre les indications ou les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet ou d'objets similaires dans des conditions spécifiées

- La fidélité est en général exprimée numériquement par des caractéristiques telles que l'écart-type, la variance ou le coefficient de variation dans les conditions spécifiées.
- Les conditions spécifiées peuvent être, par exemple, des conditions de répétabilité, des conditions de fidélité intermédiaire ou des conditions de reproductibilité (voir l'ISO 5725-1 :1994).
- La fidélité sert à définir la répétabilité de mesure, la fidélité intermédiaire de mesure et la reproductibilité de mesure.
- Le terme « fidélité de mesure » est quelquefois utilisé improprement pour désigner l'exactitude de mesure (14)

La figure suivante représente la différence entre exactitude justesse et fidélité.

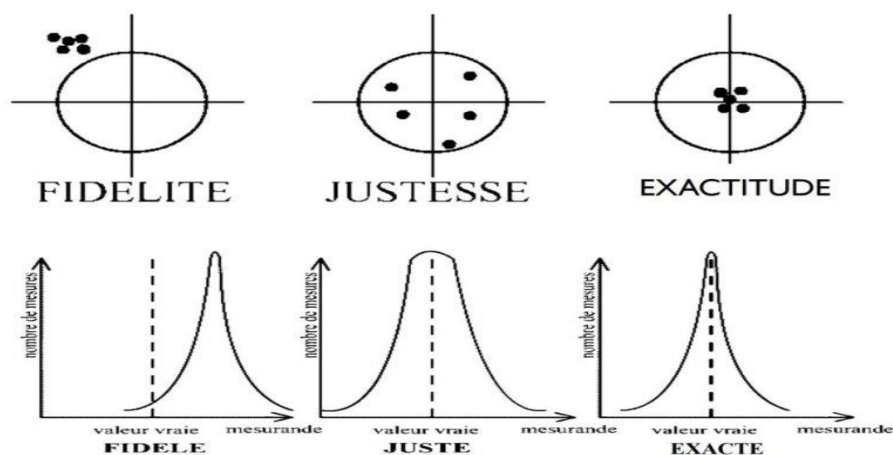


Figure 19 : différence entre exactitude justesse et fidélité (25)

11.4 Répétabilité de mesure : fidélité de mesure selon un ensemble de conditions de répétabilité

Condition de répétabilité : condition de mesurage dans un ensemble de conditions qui comprennent la même procédure de mesure, les mêmes opérateurs, le même système de mesure, les mêmes conditions de fonctionnement et le même lieu, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires pendant une courte période de temps

- Une condition de mesurage n'est une condition de répétabilité que par rapport à un ensemble donné de conditions de répétabilité.
- En chimie, on utilise quelquefois le terme « condition de fidélité intra-série » pour désigner ce concept. (14)

11.5 Reproductibilité de mesure : fidélité de mesure selon un ensemble de conditions de reproductibilité

- Des termes statistiques pertinents sont donnés dans l'ISO 5725-1 :1994 et l'ISO 5725-2 :1994.

Condition de reproductibilité : condition de mesurage dans un ensemble de conditions qui comprennent des lieux, des opérateurs et des systèmes de mesure différents, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires

- Les différents systèmes de mesure peuvent utiliser des procédures de mesure différentes.
- Il convient qu'une spécification relative aux conditions contienne, dans la mesure du possible, les conditions que l'on fait varier et celles qui restent inchangées. (14)

La figure suivante représente la différence entre exactitude justesse et fidélité.

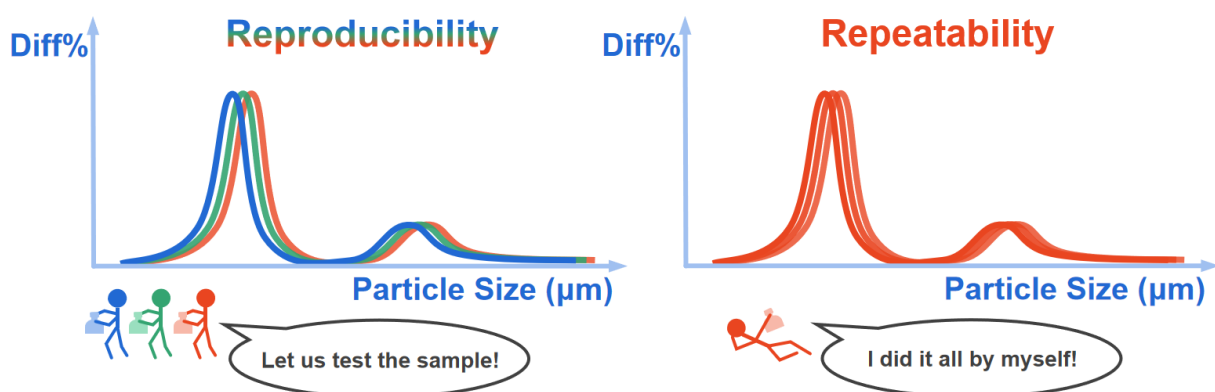


Figure 20 : différence entre répétabilité et reproductibilité (26)

11.6 Traçabilité métrologique : propriété d'un résultat de mesure selon laquelle ce résultat peut être relié à une référence par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue et documentée d'étalonnages dont chacun contribue à l'incertitude de mesure. (14)

11.7 Ajustage d'un système de mesure : ensemble d'opérations réalisées sur un système de mesure pour qu'il fournisse des indications prescrites correspondant à des valeurs données des grandeurs à mesurer

- Divers types d'ajustage d'un système de mesure sont le réglage de zéro, le réglage de décalage, le réglage d'étendue (appelé aussi réglage de gain).
- Il convient de ne pas confondre l'ajustage d'un système de mesure avec son étalonnage, qui est un préalable à l'ajustage.
- Après un ajustage d'un système de mesure, le système demande généralement à être réétalonné. (14)

11.8 Étendue de mesure : étendue nominale, valeur absolue de la différence entre les valeurs extrêmes d'un intervalle nominal des indications

- EXEMPLE Pour un intervalle nominal des indications de -10 V à $+10\text{ V}$, l'étendue de mesure est 20 V . (14)

11.9 Résolution : plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible de l'indication correspondante

- La résolution peut dépendre, par exemple, du bruit (interne ou externe) ou du frottement. Elle peut aussi dépendre de la valeur de la grandeur mesurée. (14)

11.10 Stabilité : constance, propriété d'un instrument de mesure selon laquelle celui-ci conserve ses propriétés métrologiques constantes au cours du temps

- La stabilité d'un instrument de mesure peut être exprimée quantitativement de plusieurs façons. (14)

12. Etalonnage des instruments de mesure :

12.1 Définition et objectifs : On peut définir c'est une comparaison entre un instrument (inconnu) et un étalon vérifié selon un mode opératoire validé (procédure) puis la transcription des résultats au sein d'un certificat d'étalonnage. (4)

L'étalonnage est un processus qui consiste à ajuster les instruments de mesures pour qu'ils produisent des résultats précis et fiables. Lorsqu'un instrument de mesure est étalonné, il est comparé à un étalon de référence connu et accepté, qui est un instrument de mesure hautement précis calibré selon des normes internationales et dont les caractéristiques sont connues avec une grande précision. (4)

L'étalonnage est une pratique courante dans de nombreux domaines, notamment en sciences, en ingénierie et en métrologie afin de déterminer les erreurs de mesure de l'instrument à étalonner et d'ajuster ses réglages pour minimiser ces erreurs, afin de garantir la qualité et la fiabilité des mesures effectuées. (4)

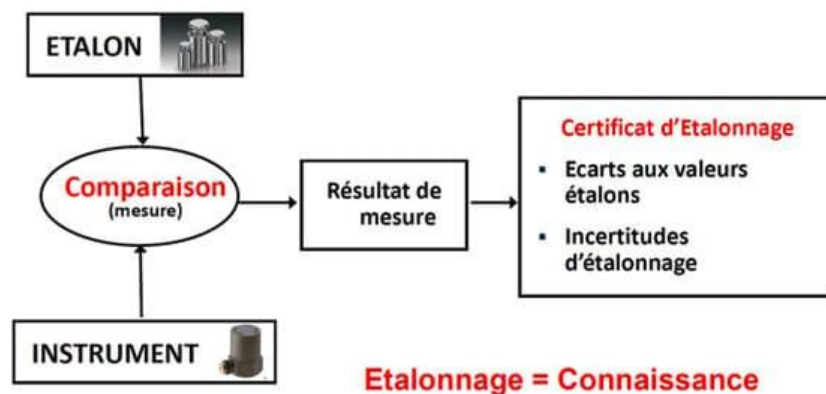


Figure 21: étalonnage des instruments de mesure (27)

12.2 Types d'étalonnage :

Il existe plusieurs types d'étalonnage, chacun ayant ses propres caractéristiques et objectifs spécifiques :

- **Étalonnage interne** : ce type d'étalonnage se produit lorsque l'instrument de mesure possède des fonctionnalités d'auto étalonnage. L'instrument est alors capable de se calibrer lui-même, en comparant les mesures réelles à des valeurs de référence stockées dans sa mémoire.
- **Étalonnage externe** : ce type d'étalonnage est réalisé par un laboratoire tiers ou un technicien spécialisé qui compare les mesures de l'instrument à celles d'une norme de référence. Cela peut impliquer l'utilisation de standards de mesure de haute précision.
- **Étalonnage régulier** : il s'agit de l'étalonnage périodique effectué à intervalles réguliers pour garantir que l'instrument de mesure conserve sa précision et son

exactitude au fil du temps. Cette méthode est souvent utilisée pour les instruments de mesure utilisés en production industrielle, en laboratoire ou en métrologie.

- **Étalonnage ponctuel** : il s'agit de l'étalonnage réalisé avant chaque utilisation de l'instrument de mesure pour garantir qu'il fonctionne correctement et donne des résultats précis pour chaque mesure effectuée.
- **Étalonnage de certificat** : c'est un étalonnage effectué par un laboratoire accrédité, qui fournit une attestation officielle de l'exactitude de l'instrument de mesure. Ce certificat peut être utilisé pour répondre aux exigences réglementaires ou pour prouver la conformité à une norme de qualité. (14)

12.3 Différence entre étalonnage et vérification :

L'étalonnage est une opération métrologique qui consiste à déterminer l'erreur d'un instrument de mesure en le comparant à une référence étalon sans le modifier, dans le but d'assurer la traçabilité et de connaître la justesse des mesures, il donne lieu à un certificat d'étalonnage indiquant les écarts observés. En revanche, la vérification vise à contrôler si l'instrument respecte des exigences ou tolérances spécifiées (normes ou réglementations) afin de statuer sur sa conformité à un usage donné, elle peut se conclure par un avis de conformité (conforme ou non conforme) et peut nécessiter un ajustement si les résultats sont hors tolérance. (14)

13. Incertitude de mesure :

13.1 Définition : paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande (11)

- Le paramètre peut être, par exemple, un écart-type (ou un multiple de celui-ci) ou la demi-largeur d'un intervalle de niveau de confiance déterminé.
- L'incertitude de mesure comprend, en général, plusieurs composantes. Certaines peuvent être évaluées à partir de la distribution statistique des résultats de séries de mesurages et peuvent être caractérisées par des écarts-types expérimentaux. Les autres composantes, qui peuvent aussi être caractérisées par des écarts-types, sont évaluées en admettant des lois de probabilité, d'après l'expérience acquise ou d'après d'autres informations.
- Il est entendu que le résultat du mesurage est la meilleure estimation de la valeur du mesurande, et que toutes les composantes de l'incertitude, y compris celles qui

proviennent d'effets systématiques, telles que les composantes associées aux corrections et aux étalons de référence, contribuent à la dispersion. (11)

13.2 Évaluation les incertitudes types : Il y a deux types d'évaluation (11) :

13.2.1 Évaluation de Type A (de l'incertitude) : méthode d'évaluation de l'incertitude par l'analyse statistique de séries d'observations

13.2.2 Évaluation de Type B (de l'incertitude) : méthode d'évaluation de l'incertitude par des moyens autres que l'analyse statistique de séries d'observations

13.2.3 Incertitude-type composée : incertitude-type du résultat d'un mesurage, lorsque ce résultat est obtenu à partir des valeurs d'autres grandeurs, égale à la racine carrée d'une somme de termes, ces termes étant les variances ou covariances de ces autres grandeurs, pondérées selon la variation du résultat de mesure en fonction de celle de ces grandeurs

$$U_c = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2}$$

Équation 7 : Incertitude-type composée

13.2.4 Incertitude élargie : grandeur définissant un intervalle, autour du résultat d'un mesurage, dont on puisse s'attendre à ce qu'il comprenne une fraction élevée de la distribution des valeurs qui pourraient être attribuées raisonnablement au mesurande

La fraction peut être considérée comme la probabilité ou le niveau de confiance de l'intervalle.

L'association d'un niveau de confiance spécifique à l'intervalle défini par l'incertitude élargie nécessite des hypothèses explicites ou implicites sur la loi de probabilité caractérisée par le résultat de mesure et son incertitude-type composée. Le niveau de confiance qui peut être attribué à cet intervalle ne peut être connu qu'avec la même validité que celle qui se rattache à ces hypothèses.

L'incertitude élargie est appelée incertitude globale au paragraphe 5 de la Recommandation INC-1 (1980).

$$U_e = \pm k \times U_c$$

Équation 8 : L'incertitude élargie

13.2.5 Facteur d'élargissement : facteur numérique utilisé comme multiplicateur de l'incertitude-type composée pour obtenir l'incertitude élargie

Un facteur d'élargissement, k , a sa valeur typiquement comprise entre 2 et 3.

14. Normes et références applicables :

Dans le cadre du développement de notre système automatisé de titrage colorimétrique, plusieurs normes et références techniques ont été prises en compte afin d'assurer la fiabilité des mesures, la sécurité du système, et la conformité aux exigences métrologiques et industrielles.

- **ISO 9001 : Systèmes de management de la qualité – Exigences** : Appliquée pour assurer une gestion rigoureuse des processus de développement, de test et de documentation.
- **ISO/IEC 17025 : Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnage et d'essais** : Référence pour garantir la traçabilité et la validité des résultats dans un contexte de mesure chimique.
- **ISO 10012 : Systèmes de management de la mesure – Exigences relatives aux processus de mesure et aux équipements de mesure** : Pour le choix, la vérification et l'étalonnage des instruments utilisés.
- **VIM – Vocabulaire International de Métrologie (édition 3, JCGM 200 :2012)** : Utilisé pour l'emploi rigoureux des définitions liées à la mesure, l'incertitude, et la traçabilité.
- **IEC 61010-1 : Exigences de sécurité pour les équipements électriques de mesure, de commande et de laboratoire** : Appliquée aux éléments comme l'Arduino, l'alimentation, et l'électrovanne.
- **Directive RoHS (2011/65/EU) : Limitation des substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques** : Applicable aux composants électroniques utilisés (Arduino, capteurs, modules).
- **Guide ISO/TR 22971 : Lignes directrices pour l'estimation de l'incertitude des mesures dans les systèmes automatisés** : Utile pour l'analyse d'incertitude liée à la lecture automatique via la caméra et le capteur de débit.
- **Documentation technique des capteurs** : Utilisée pour l'intégration matérielle, la configuration logicielle et la validation expérimentale

15. Conclusion :

Ce chapitre a permis de poser les fondements théoriques nécessaires à la compréhension et à la mise en œuvre d'un système de mesure fiable et conforme. En explorant les notions clés de

Chapitre 2 : Instrumentation et Métrologie appliquées au projet

l'instrumentation et de la métrologie, nous avons souligné l'importance d'une chaîne de mesure bien conçue, d'une traçabilité rigoureuse, et d'un étalonnage précis pour garantir la qualité des résultats.

Ces bases seront mises en application dans le chapitre suivant, qui présentera la conception, le développement et les tests du système de titrage automatisé, en intégrant les principes étudiés pour assurer un fonctionnement optimal du dispositif.

Chapitre 03 : Conception, développement et validation du système de mesure

1. Introduction :

Ce chapitre présente la concrétisation du projet à travers la conception, le développement et la validation du système de titrage automatisé. Il décrit l'architecture du dispositif, les composants choisis, leur fonctionnement, ainsi que le développement du code de commande sous Arduino. Il comprend également les étapes de montage, les tests en laboratoire, l'intégration mécanique via l'impression 3D.

Ce chapitre marque ainsi la transition entre les notions théoriques abordées précédemment et leur application pratique dans un système de mesure fonctionnel.

2. Présentation du projet :

2.1 Contexte et problématique :

Dans l'industrie, le titrage colorimétrique est une méthode couramment utilisée pour déterminer la concentration d'un composé chimique dans un échantillon. Cette opération repose sur l'observation visuelle du changement de couleur, ce qui introduit un facteur subjectif, une variabilité humaine, et un risque d'erreur dans les résultats.

D'où la nécessité d'une automatisation fiable et précise de ce processus, afin d'augmenter la reproductibilité, la rapidité, et la traçabilité des mesures, tout en réduisant l'intervention humaine.

2.2 Objectif du projet :

Le principal objectif est de concevoir et développer un système automatique de titrage colorimétrique, capable de :

- Détecter automatiquement le point de changement de couleur (équivalence) à l'aide d'une caméra ou d'un capteur optique.
- Mesurer le volume de réactif ajouté à l'aide d'un capteur de débit.
- Contrôler une électrovanne pour stopper l'ajout de réactif dès que le point d'équivalence est atteint.
- Afficher et enregistrer les résultats sur une interface PC (tableau de bord).

2.3 Méthodologie :

Le développement du système se fera en plusieurs étapes :

1. Étude du procédé de titrage colorimétrique dans le cadre du contrôle de qualité des matériaux.
2. Choix des capteurs adaptés :
 - Capteur de couleur (détection du changement de teinte).
 - Capteur de débit (mesure du volume ajouté).
3. Développement du système embarqué à base d'Arduino.
4. Programmation de la logique de décision (détection couleur + contrôle électrovanne).
5. Création d'une interface PC pour l'affichage et l'enregistrement des résultats.
6. Tests et validation du système en conditions réelles au laboratoire.

La figure suivant représentation schéma global du système :

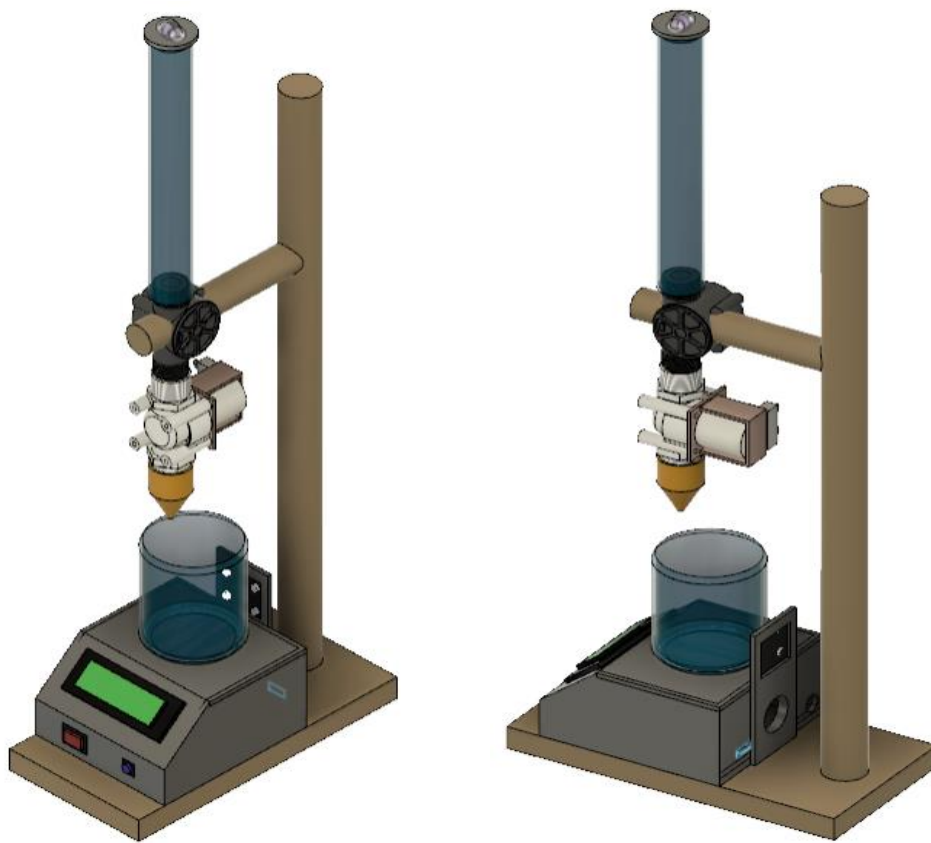


Figure 22 : Schéma global du système de mesure

3. Composants du système :

3.1 Capteur de débit d'eau Yf-s201 :

Le capteur de débit d'eau est un dispositif compact conçu pour mesurer le débit d'eau avec précision. Il se compose d'un corps en plastique avec une roue à ailettes et un capteur à effet Hall intégré. Ce capteur dispose de trois fils : le fil rouge pour l'alimentation +5V, le fil noir pour la masse (GND) et le fil jaune pour la sortie du signal. (17)



Figure 23 : Capteur de débit d'eau Yf-s-201 (17)

Fonctionnement du capteur de débit d'eau Yf-s201 :

Le capteur de débit d'eau utilise le principe de l'effet Hall. Lorsque l'eau passe à travers le capteur, la roue à ailettes tourne, entraînant le mouvement d'un aimant attaché à celle-ci. Ce mouvement magnétique induit un changement de polarité à proximité du capteur à effet Hall, ce qui génère un signal de sortie sous forme d'impulsions. En comptant le nombre d'impulsions générées, nous pouvons calculer le débit d'eau qui traverse le capteur. (17)

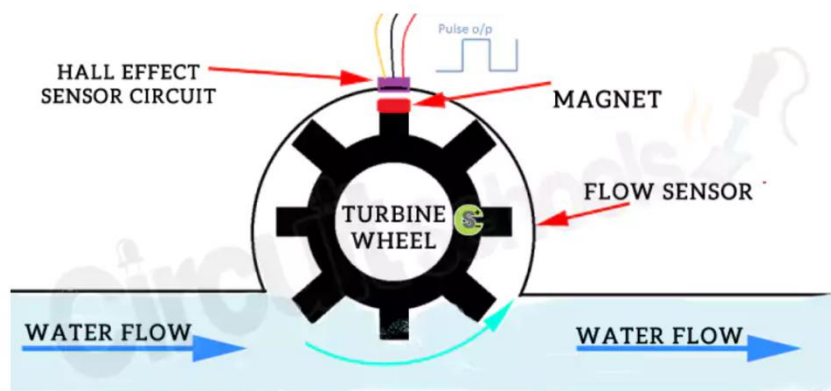


Figure 24 : Fonctionnement du capteur de débit d'eau Yf-s-201 (17)

Caractéristiques techniques du capteur :

- **Nom complete:** YFS201 Water Flow Sensor
- **Tension de fonctionnement :** 5V – 18V DC
- **Courant de fonctionnement :** 15 mA (typique à 5V)
- **Débit mesuré :** 1 à 30 L/min
- **Signal de sortie :** Signal numérique (impulsions par rotation)
- **Type de sortie :** NPN, signal à collecteur ouvert
- **Fréquence de sortie :** Environ $7.5 \times \text{débit (L/min)}$ Hz
- **Précision :** $\pm 10 \%$ (variable selon les conditions d'utilisation)
- **Matériau du corps :** Plastique (généralement nylon renforcé)
- **Type de connecteurs :** 3 fils : Rouge (VCC), Noir (GND), Jaune (Signal)
- **Température de fonctionnement :** 0°C à 80°C
- **Pression maximale :** Environ 1.75 MPa (mais recommandé < 1.2 MPa)
- **Diamètre intérieur :** 11 mm (entrée/sortie) (17)

3.2 Capteur de couleur TCS230 :

Le capteur de couleur TCS230 (ou TCS3200, version améliorée) est un capteur de reconnaissance de couleur développé par TAOS (Texas Advanced Optoelectronic Solutions). Il est souvent utilisé dans les projets électroniques pour détecter et identifier les couleurs d'un objet. Voici un aperçu de ses caractéristiques, son fonctionnement et son utilisation. (13)



TCS230 Color Sensor Module

Figure 25 : capteur de couleur TCS230 (13)

Fonctionnement du Capteur de couleur TCS34725 :

Dans la palette de couleurs RVB, toute couleur peut être représentée comme une combinaison des trois couleurs primaires :

- Le rouge (R)
- Le vert (G)
- Le bleu (B).

Afin de déterminer une couleur spécifique, il est donc nécessaire de mesurer le spectre des composantes rouge, bleu et vert. Pour cette tâche, le capteur utilisé est le TCS230, qui se compose d'une matrice de 8×8 photodiodes comprenant 16 photodiodes pour chaque couleur primaire (rouge, vert et bleu) ainsi que 16 photodiodes supplémentaires sans filtre.

Le TCS230 fonctionne avec une tension d'alimentation comprise entre 2,7 et 5,5 volts pour son module. (13)

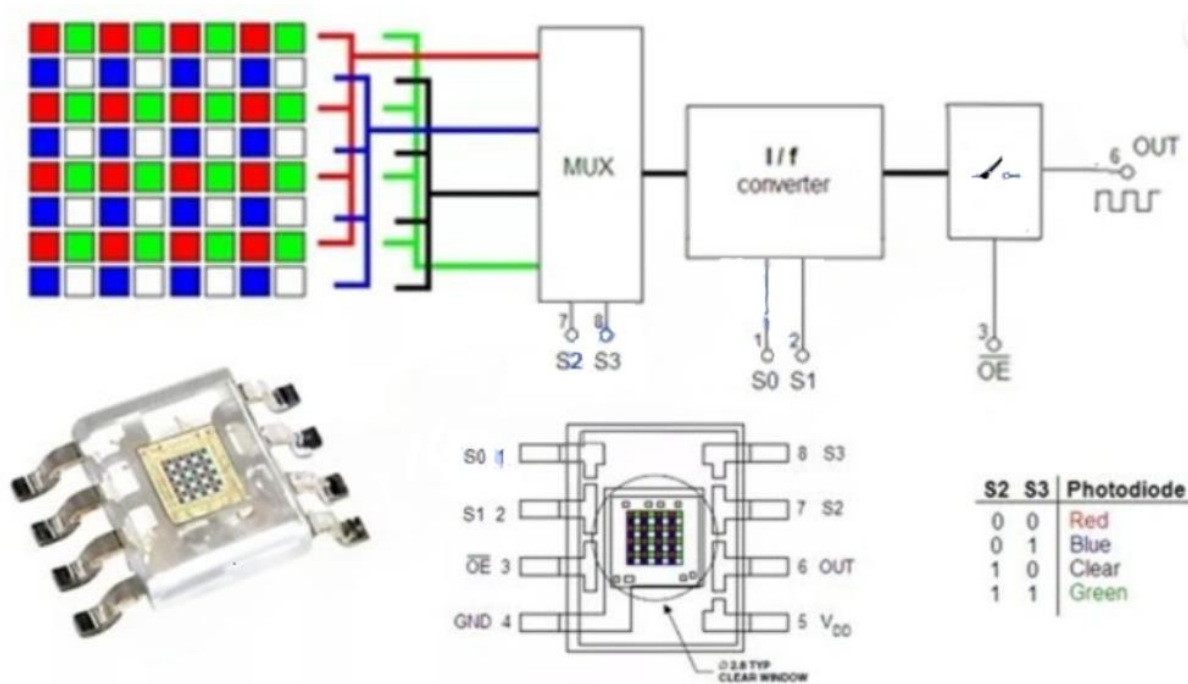


Figure 26 : Schéma fonctionnel d'un capteur de couleur TCS230 (13)

Caractéristiques techniques du capteur :

- Capteur RGB avec matrice de photodiodes filtrées :
 - 16 photodiodes filtrées rouge
 - 16 filtrées vert
 - 16 filtrées bleu

- 16 sans filtre (blanc)
- **Sortie** : signal PWM (fréquence proportionnelle à l'intensité de la couleur détectée)
- **Tension d'alimentation** : 2.7V à 5.5V
- **Communication** : fréquence de sortie en PWM (pas I2C ou SPI)
- **Sélection de filtre** : via les broches S2 et S3
- **Contrôle de la fréquence de sortie** : via les broches S0 et S1

3.3 Électrovanne :

Une électrovanne est un composant électromécanique qui permet d'ouvrir ou fermer un flux de liquide ou de gaz de façon automatisée. Elle fonctionne comme un robinet commandé électriquement. (16)

- Quand on applique une tension, la vanne s'ouvre.
- Quand on coupe la tension, elle se ferme (ou l'inverse selon le type).



Figure 27 : électrovanne 12V (16)

Une électrovanne ne peut pas être alimentée directement par l'Arduino, car elle consomme trop de courant. Il faut utiliser un relais pour la commander.

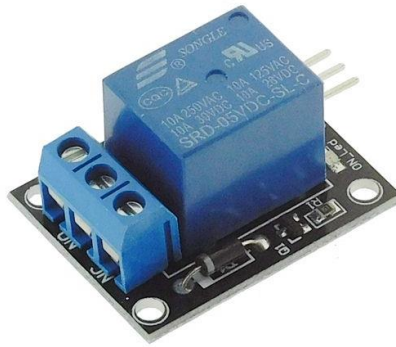


Figure 28 : Module relais (16)

3.4 La carte Arduino :

Une carte Arduino est un microcontrôleur (petit ordinateur programmable) sur une carte facile à connecter à des capteurs, actionneurs, et autres composants électroniques. (26)

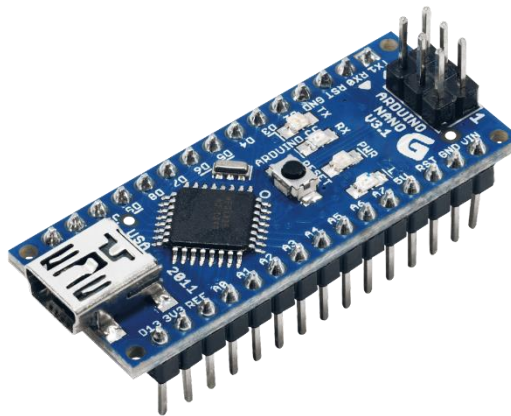


Figure 29 : Carte Arduino nano (26)

3.5 Bouton poussoir :

Un bouton poussoir est un interrupteur momentané utilisé pour établir ou interrompre un circuit électrique uniquement tant qu'on appuie dessus. Il revient automatiquement à sa position initiale lorsqu'on relâche la pression. (16)

Le bouton poussoir sert de commande manuelle de démarrage du processus de titrage.



Figure 30 : Bouton poussoir (16)

3.6 Interrupteur ON / OFF :

Interrupteur ON/OFF est un composant électrique très simple qui permet de fermer ou ouvrir un circuit électrique de façon manuelle et stable.

Le switch ON/OFF permet à l'utilisateur de contrôler manuellement l'électrovanne pour faire circuler de l'eau distillée dans le système avant le démarrage automatique du titrage. (16)

Fonctionnement :

- **Position ON :**
 - L'électrovanne s'ouvre.
 - L'eau distillée circule dans le système pour le rincer.
- **Position OFF :**
 - L'électrovanne se ferme.
 - Le nettoyage est terminé, prêt pour le titrage automatique.



Figure 31 : Interrupteur ON/OFF (16)

3.7 Afficheur LCD I2C :

Un afficheur LCD I2C est un module d'affichage basé sur un écran LCD (Liquid Crystal Display), généralement de type 16x2 (16 caractères sur 2 lignes), qui utilise une interface I2C (Inter-Integrated Circuit) pour communiquer avec un microcontrôleur (comme Arduino, ESP32, etc.). (16)

L'I2C est un protocole de communication série à deux fils :

- **SDA** : ligne de données
- **SCL** : ligne d'horloge

Le module I2C est souvent une petite carte soudée à l'arrière de l'écran LCD classique (HD44780), ce qui réduit considérablement le nombre de broches nécessaires pour le connecter (de 6-8 broches à seulement 2).

L'afficheur LCD I2C a pour rôle de visualiser des informations issues d'un système embarqué ou d'un capteur, notamment :

- Afficher les mesures : température, humidité, pression, volume, etc.
- Montrer l'état du système : erreurs, instructions, progression.
- Donner un retour visuel à l'utilisateur : choix de menus, confirmation d'actions.



Figure 32 : Afficheur LCD I2C (16)

4. fonctionnement et schéma électronique du système :

4.1 Étapes principales :

Le fonctionnement du système est structuré en plusieurs étapes, présentées comme suit :

Principe de fonctionnement :

- **Initialisation du système :**

À la mise sous tension, le système s'initialise et affiche l'état de préparation sur l'écran LCD.

- **Nettoyage (manuel) :**

L'opérateur appuie sur le switch pour ouvrir manuellement l'électrovanne et effectuer un rinçage du circuit à l'eau distillée avant le titrage.

- **Lancement du titrage (automatique) :**

Une fois le nettoyage terminé, l'opérateur appuie sur le bouton poussoir pour démarrer automatiquement le processus de titrage.

- **Ajout du réactif et surveillance :**

- L'électrovanne s'ouvre pour permettre l'écoulement du réactif dans la solution.
- Le capteur de débit mesure en continu le volume de liquide injecté.
- Le capteur de couleur surveille les changements de couleur afin de détecter le point d'équivalence (teinte cible).
- Les données sont affichées en temps réel sur l'écran LCD et transmises à un ordinateur.

- **Détection du point d'équivalence :**

Lorsqu'un changement de couleur correspondant au point de virage est détecté :

- L'électrovanne se ferme automatiquement pour arrêter l'écoulement.
- Le volume exact est enregistré.

- **Affichage et enregistrement des résultats :**

Les résultats finaux (volume de réactif utilisé, couleur détectée) sont :

- Affichés sur l'écran LCD.
- Envoyés à un ordinateur pour traitement, sauvegarde ou archivage.

L'organigramme suivant représente le fonctionnement du système :

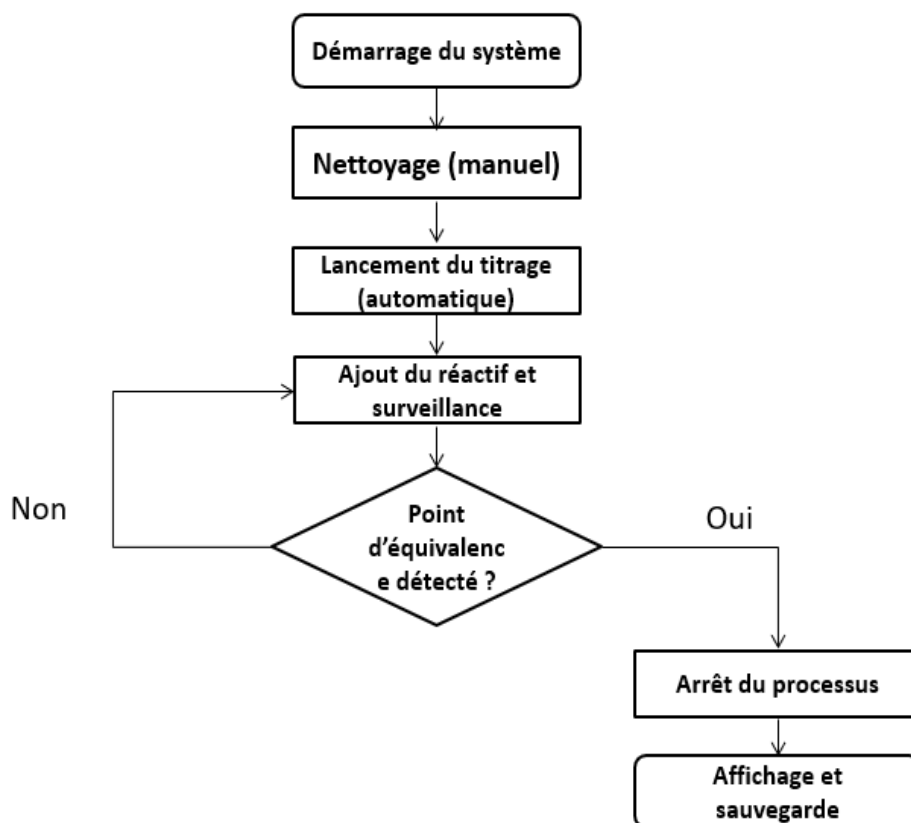


Figure 33 : Organigramme du fonctionnement de système

4.2 Schéma électronique et connexion :

L'ensemble du système repose sur une carte Arduino, qui permet de connecter plusieurs capteurs et actionneurs grâce à son grand nombre d'entrées/sorties. Les connexions sont réparties comme suit :

Composant	Broche/Fil	Connecté à (Arduino)
Écran LCD I2C	VCC	5V
	GND	GND
	SDA	A4
	SCL	A5
Capteur de débit	Rouge (VCC)	5V
	Noir (GND)	GND
	Jaune (Signal)	D9

Capteur de couleur TCS230	VCC	5V
	GND	GND
	OUT	D6
	S0	D2
	S1	D3
	S2	D4
	S3	D5
Électrovanne	+	VCC via relais
	-	GND externe
Module relais	VCC	5V
	GND	GND
	IN	D10
Bouton poussoir	Une patte	A2
	Autre patte	GND via resistance pull-down
Interrupteur ON/OFF	Une borne	5V
	Autre borne	Vin ou autre broche logique

Tableau 6 : Connexions entre les composants de systèmes

La figure suivante représente le schéma électronique et connexion :

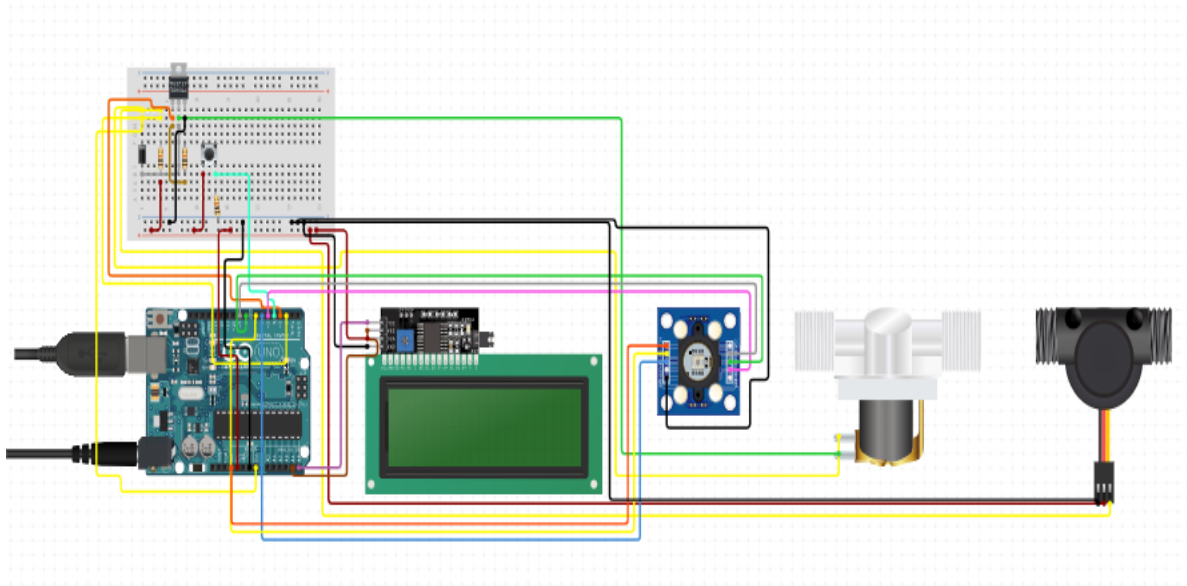


Figure 34 : Schéma électronique du système

5. Modélisation 3D des pièces :

La modélisation des pièces nécessaires à l'assemblage du système de mesure a été réalisée à l'aide du logiciel Fusion 360.

Cette étape a permis de concevoir des raccords adaptés au capteur de débit, à l'électrovanne et aux conduites de liaison. La conception a également intégré des considérations pratiques, telles que la différence de hauteur entre le capteur de débit et l'électrovanne, afin de garantir un écoulement optimal du liquide par gravité.

Chaque pièce a été conçue sur mesure pour assurer une compatibilité mécanique parfaite entre les composants du système.

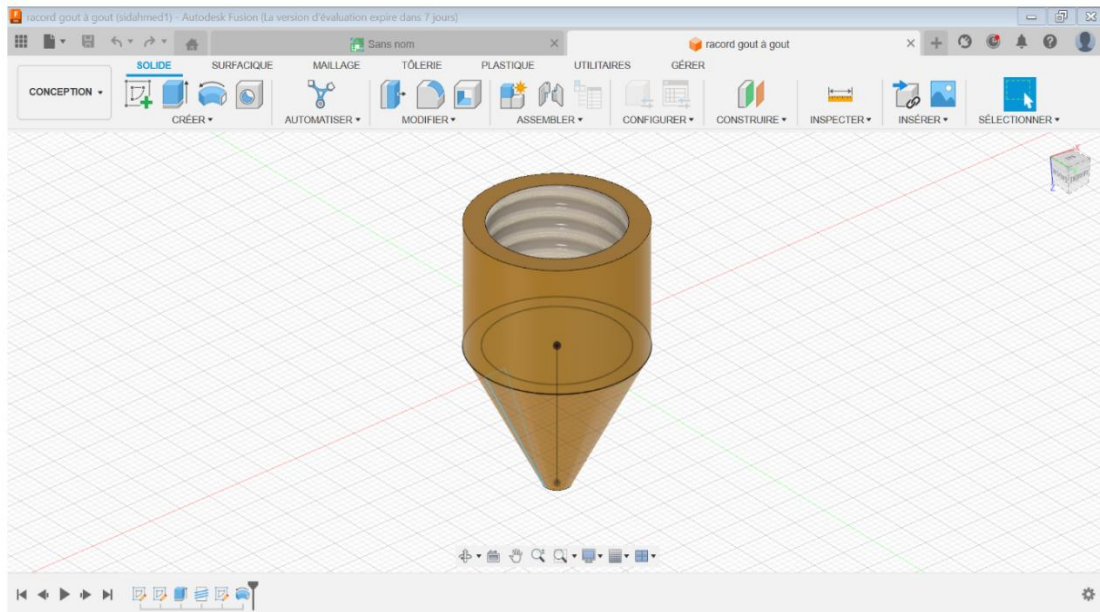


Figure 35 : Conception d'une pièce goutte à goutte réalisée avec le logiciel Fusion 360

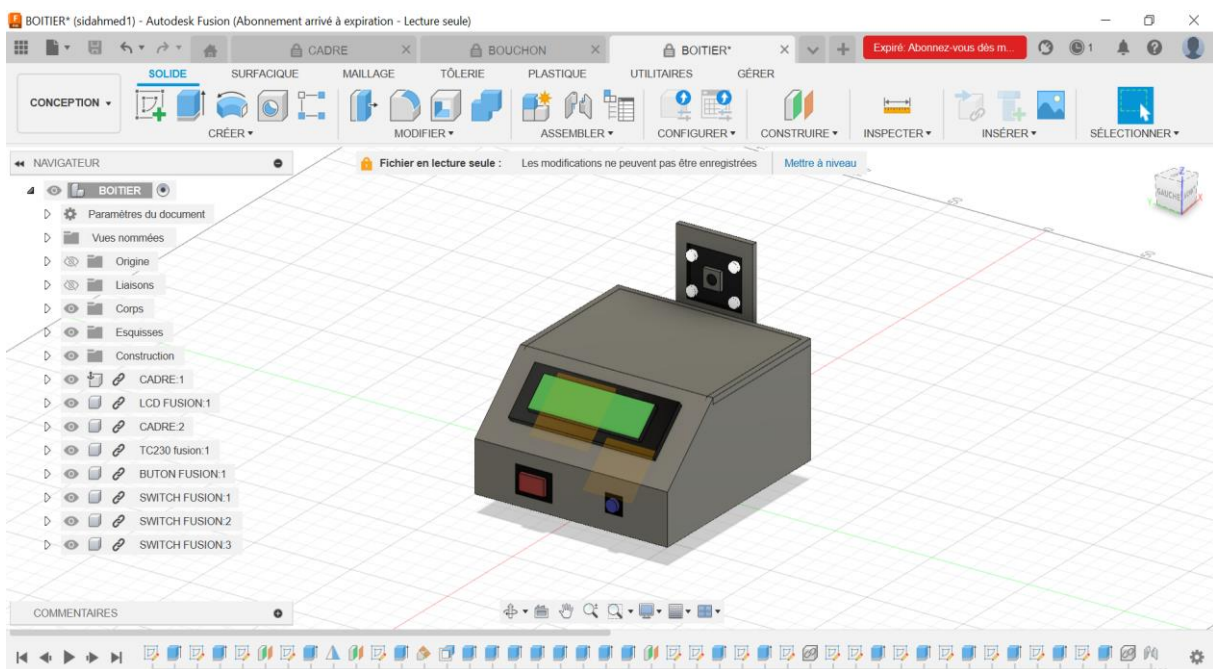


Figure 36 : conception d'un boitier réalisée avec le logiciel Fusion 360

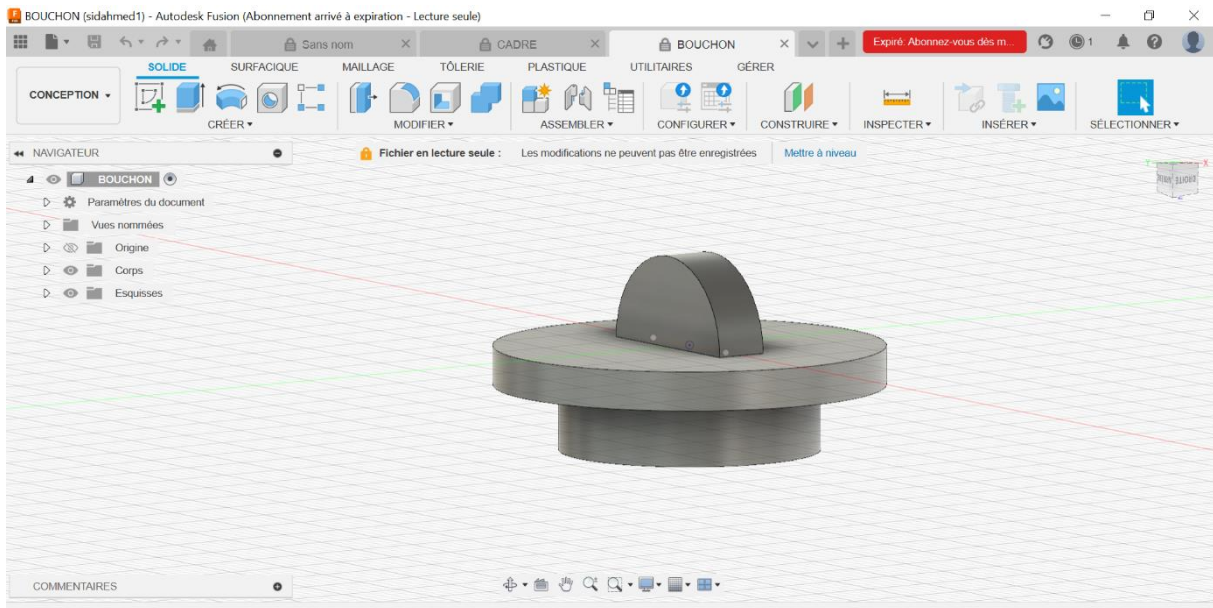


Figure 37 : conception d'un bouchon réalisée avec le logiciel Fusion 360

6. Impression des pièces 3D :

Les pièces modélisées ont été imprimées au sein du FABLAB de l'ISTA, en utilisant une imprimante 3D Geeetech A30M. Le matériau utilisé est un filament PLA blanc, reconnu pour sa rigidité, sa stabilité dimensionnelle et sa facilité d'impression. Après impression, les pièces ont été assemblées et ajustées pour garantir un montage fiable, étanche et stable du système global.

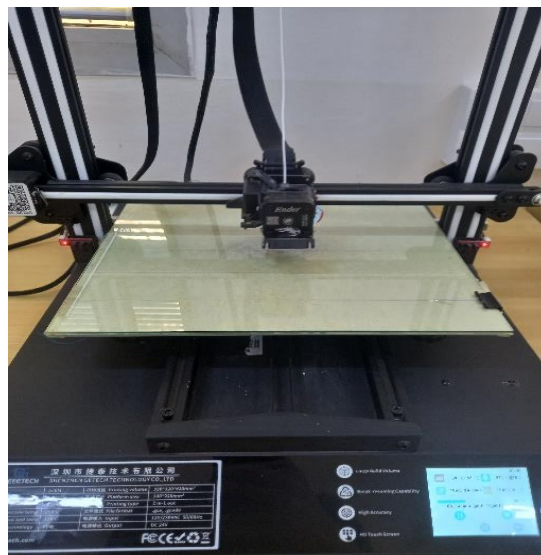


Figure 38 : Impression d'une pièce goût à goût par imprimante 3D Geeetech A30M

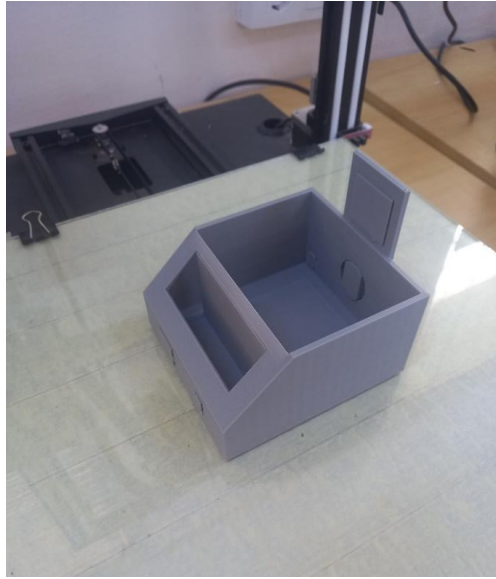


Figure 39 : : Impression d'un boîtier par imprimante 3D Geeetech A30M

7. Contrôle dimensionnel et intégration métrologique :

Afin de garantir la qualité et la conformité des pièces, des tests métrologiques ont été réalisés, incluant des mesures dimensionnelles précises.

Ces mesures ont permis de vérifier l'exactitude des dimensions critiques (diamètres internes, longueurs, hauteurs, filetages) et d'identifier toute déviation éventuelle par rapport aux modèles conçus. En plus de la normalisation géométrique, le volume interne de certains raccords a été mesuré afin de l'intégrer dans les calculs de volume total de liquide circulant dans le système. Ces données ont été prises en compte pour améliorer la précision globale du système de mesure, notamment lors du calcul du débit et du volume titré.



Figure 40 : Mesure dimensionnelle d'un raccord à l'aide d'un pied à coulisse numérique

8. Vérification individuelle de chaque composant :

8.1 Capteur de débit :

Afin de vérifier la précision du capteur de débit, plusieurs tests ont été réalisés en utilisant une bouteille d'eau de 0,5 litre pour mesurer le débit à travers le capteur. Ces tests ont permis d'évaluer la répétabilité des mesures sur différents cycles de remplissage et de vidange.



Figure 41 : Test du fonctionnement débitmètre YF S-201

La précision des résultats a été observée et comparée à des valeurs de référence, mettant en évidence des écarts initiaux. En réponse à ces écarts, le facteur de conversion du capteur a été soigneusement ajusté et fixé à 5.13.

Cette modification a permis d'optimiser la précision du capteur pour les mesures de débit, en garantissant des résultats cohérents et fiables sur plusieurs tests répétés.

8.2 Capteur de couleur :

Le test du capteur de couleur a été effectué en utilisant un liquide bleu dans un bécher de 50 ml pour évaluer sa capacité à détecter la couleur cible. Plusieurs essais ont été réalisés pour observer la sensibilité du capteur aux différentes nuances de bleu, afin de s'assurer qu'il puisse identifier correctement la couleur optimale pour le titrage colorimétrique. La stabilité de la

détection a été vérifiée en prenant en compte les variations de lumière ambiante et les changements de conditions d'éclairage sur le liquide.

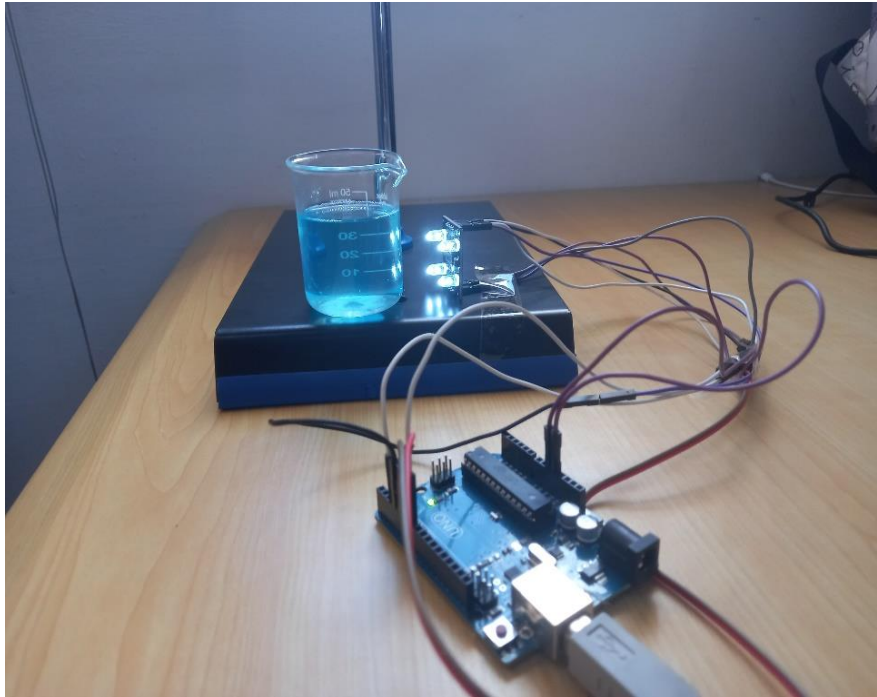


Figure 42 : Test du fonctionnement capteur de couleur

Afin d'optimiser les performances du capteur, les seuils de détection ont été ajustés pour affiner sa réponse. Ces tests ont permis de valider le bon fonctionnement du capteur dans un environnement contrôlé, garantissant ainsi une détection fiable de la couleur souhaitée, essentielle pour l'automatisation du titrage.

8.3 électrovanne et relais :

Les tests de l'électrovanne et du relais ont été réalisés en utilisant des LED vertes et rouges pour indiquer visuellement les états d'ouverture et de fermeture. La LED verte s'allume pour signaler l'ouverture de l'électrovanne, tandis que la LED rouge s'active lors de sa fermeture. Ces tests ont permis de valider le bon fonctionnement du relais et de l'électrovanne, ainsi que leur réponse correcte aux signaux de commande.

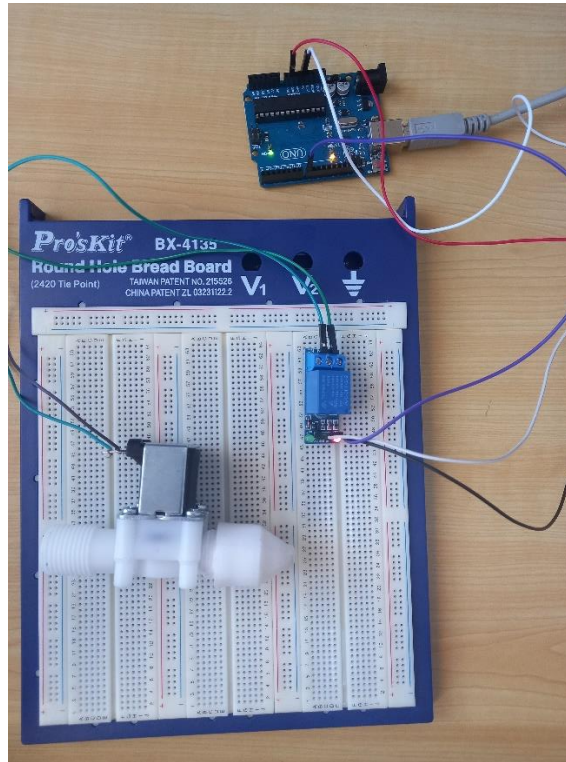


Figure 43 : Test d'électrovanne et relais

Le système a été programmé pour actionner l'ouverture et la fermeture de l'électrovanne en fonction du temps, simulant ainsi un cycle de fonctionnement réel. Cette approche a permis de vérifier la stabilité du système, la rapidité de la commutation, ainsi que la répétabilité des cycles d'ouverture/fermeture dans des conditions contrôlées.

9. Montage total du système :

Le montage final du système de titrage a été réalisé après l'assemblage des composants et l'impression des pièces de raccord. Le circuit hydraulique a été organisé comme suit :

Un tuyau transparent d'arrivée est connecté à un raccord imprimé en 3D, suivi du capteur de débit, puis d'un second raccord qui relie l'électrovanne. Un troisième raccord assure le passage goutte à goutte du liquide dans le béccher placé en fin de chaîne.

Le capteur de couleur est positionné en face du béccher, afin de détecter avec précision le changement de teinte au cours du titrage. L'ensemble est contrôlé par une carte Arduino installée dans un boîtier de protection, assurant la centralisation des commandes et des mesures. Un écran LCD est connecté pour afficher en temps réel les valeurs mesurées

Ce choix de montage permet donc d'allier simplicité, précision, répétabilité et évolutivité pour de futurs ajustements ou ajouts fonctionnels.

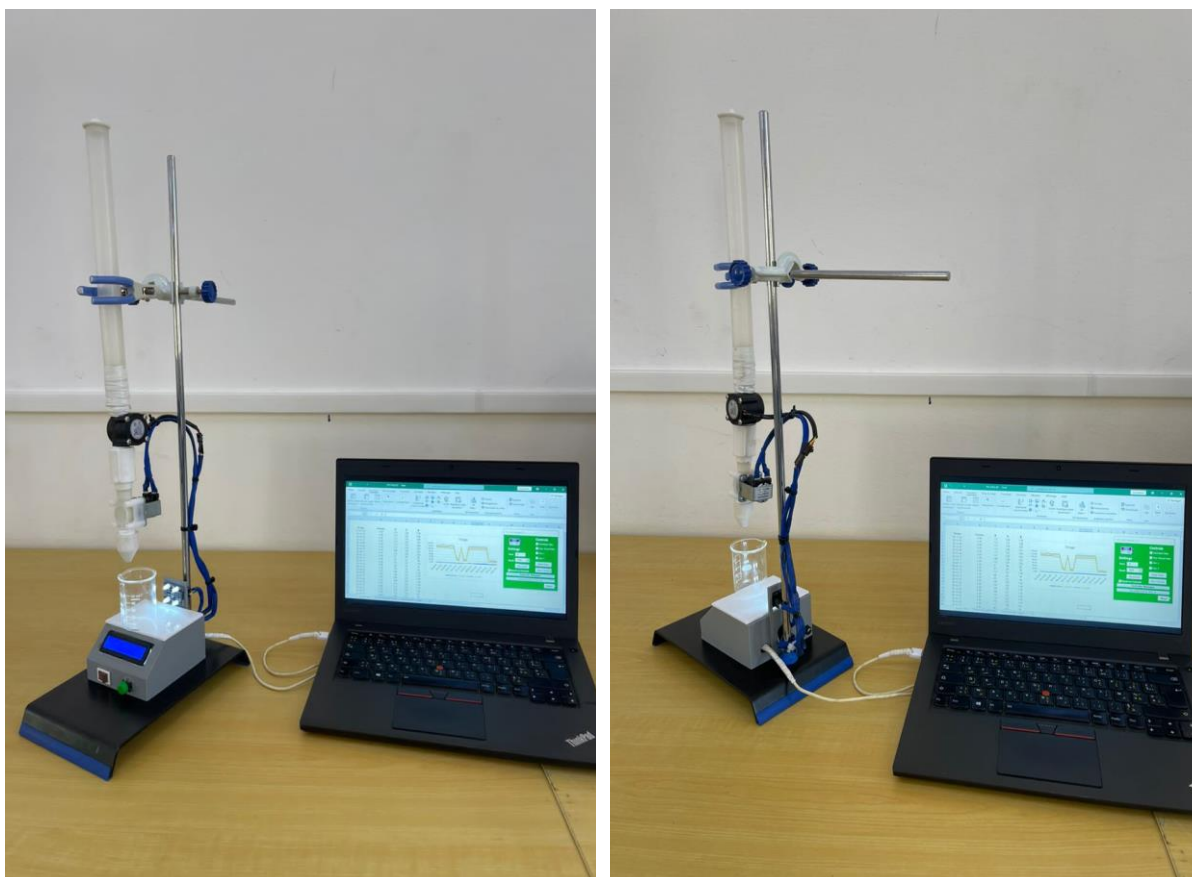


Figure 44 : Montage total du système

10. Code Arduino :

Ce code Arduino assure la coordination entre capteur de débit, capteur de couleur, affichage LCD et commande d'une électrovanne pour un titrage précis et automatisé.

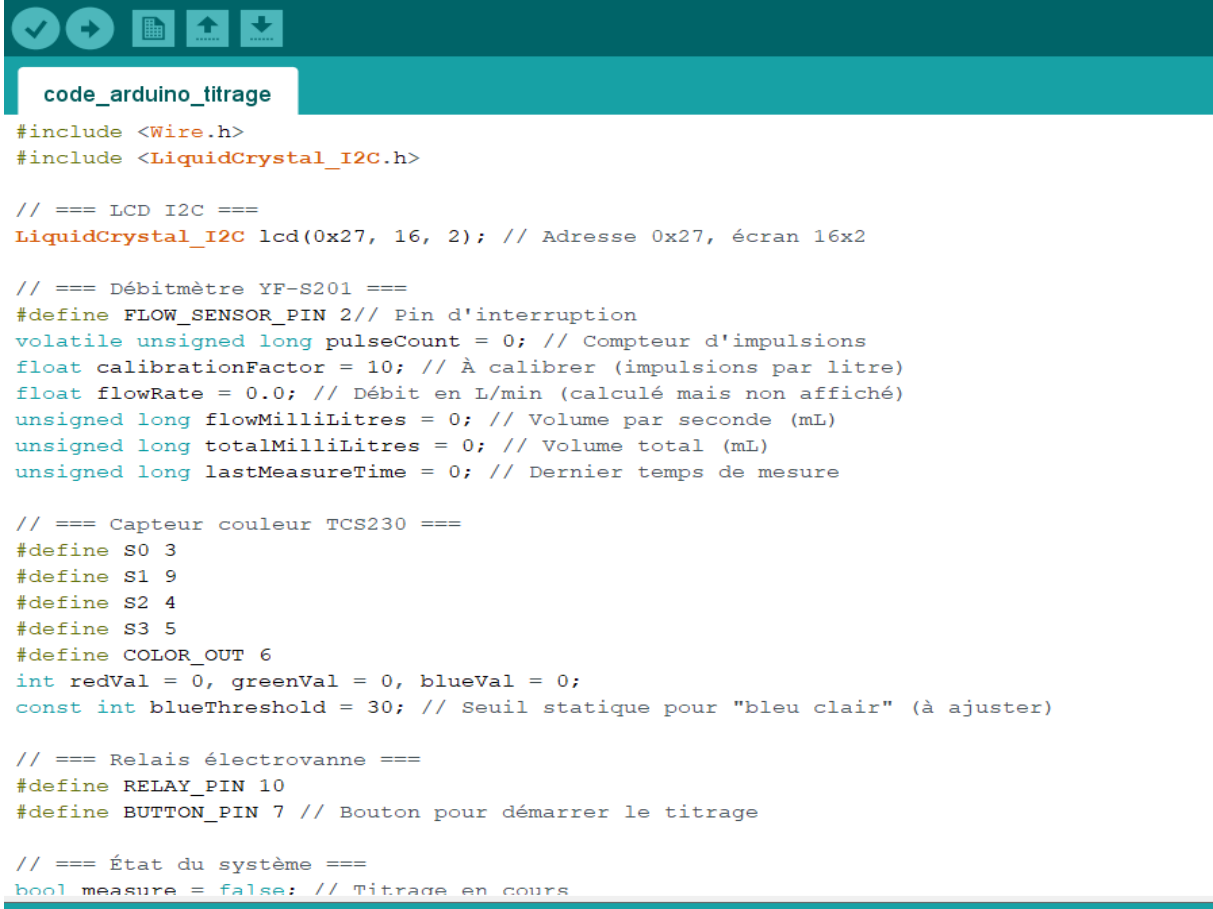
Initialisation des composants :

C'est dans la fonction `setup()` que tout est préparé :

- Préparer l'écran LCD, le capteur de débit, le capteur de couleur, le relais (électrovanne) et le bouton.

code_arduino_titrage | Arduino 1.8.19

Fichier Édition Croquis Outils Aide



```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

// === LCD I2C ===
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // Adresse 0x27, écran 16x2

// === Débitmètre YF-S201 ===
#define FLOW_SENSOR_PIN 2 // Pin d'interruption
volatile unsigned long pulseCount = 0; // Compteur d'impulsions
float calibrationFactor = 10; // À calibrer (impulsions par litre)
float flowRate = 0.0; // Débit en L/min (calculé mais non affiché)
unsigned long flowMilliLitres = 0; // Volume par seconde (mL)
unsigned long totalMilliLitres = 0; // Volume total (mL)
unsigned long lastMeasureTime = 0; // Dernier temps de mesure

// === Capteur couleur TCS230 ===
#define S0 3
#define S1 9
#define S2 4
#define S3 5
#define COLOR_OUT 6
int redVal = 0, greenVal = 0, blueVal = 0;
const int blueThreshold = 30; // Seuil statique pour "bleu clair" (à ajuster)

// === Relais électrovanne ===
#define RELAY_PIN 10
#define BUTTON_PIN 7 // Bouton pour démarrer le titrage

// === État du système ===
bool measure = false; // Titration en cours
```

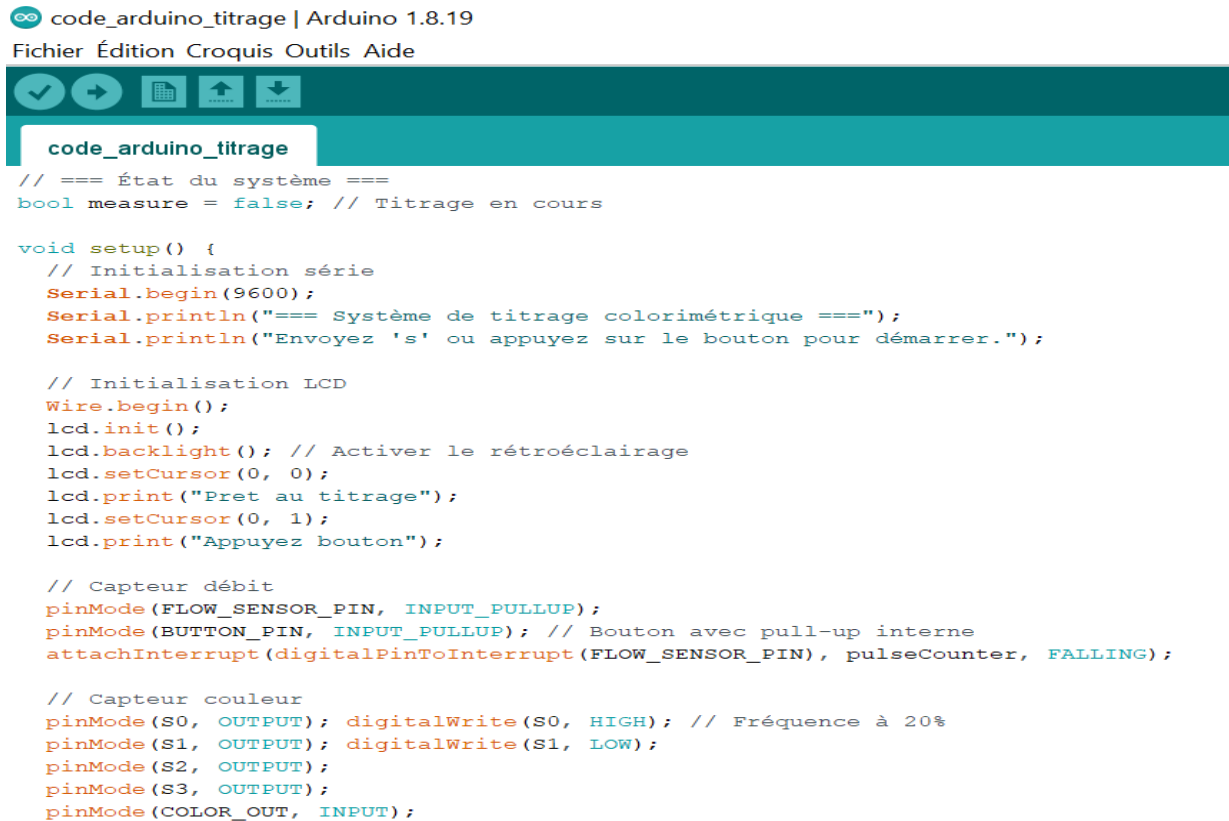


Figure 45: Code Arduino montrant l'initialisation des composants

Démarrage du titrage :

Le titrage commence lorsqu'on appuie sur le bouton ou qu'on envoie la lettre 's' via le port série. L'objectif a activé la mesure en ouvrant l'électrovanne et afficher que le titrage est en cours.

code_arduino_titrage | Arduino 1.8.19

Fichier Édition Croquis Outils Aide



```
code_arduino_titrage
pinMode(COLOR_LED, OUTPUT);

// Relais
pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Électrovanne fermée au démarrage
lastMeasureTime = millis();
}

void loop() {
  // Démarrage via moniteur série ou bouton
  if (!measure && (Serial.available() > 0 || digitalRead(BUTTON_PIN) == LOW)) {
    if (Serial.available() > 0) {
      char input = Serial.read();
      if (input == 's') {
        startTitration();
      }
    } else if (digitalRead(BUTTON_PIN) == LOW) {
      startTitration();
      delay(500); // Anti-rebond
    }
  }
}
```

Figure 46 : Démarrage du titrage

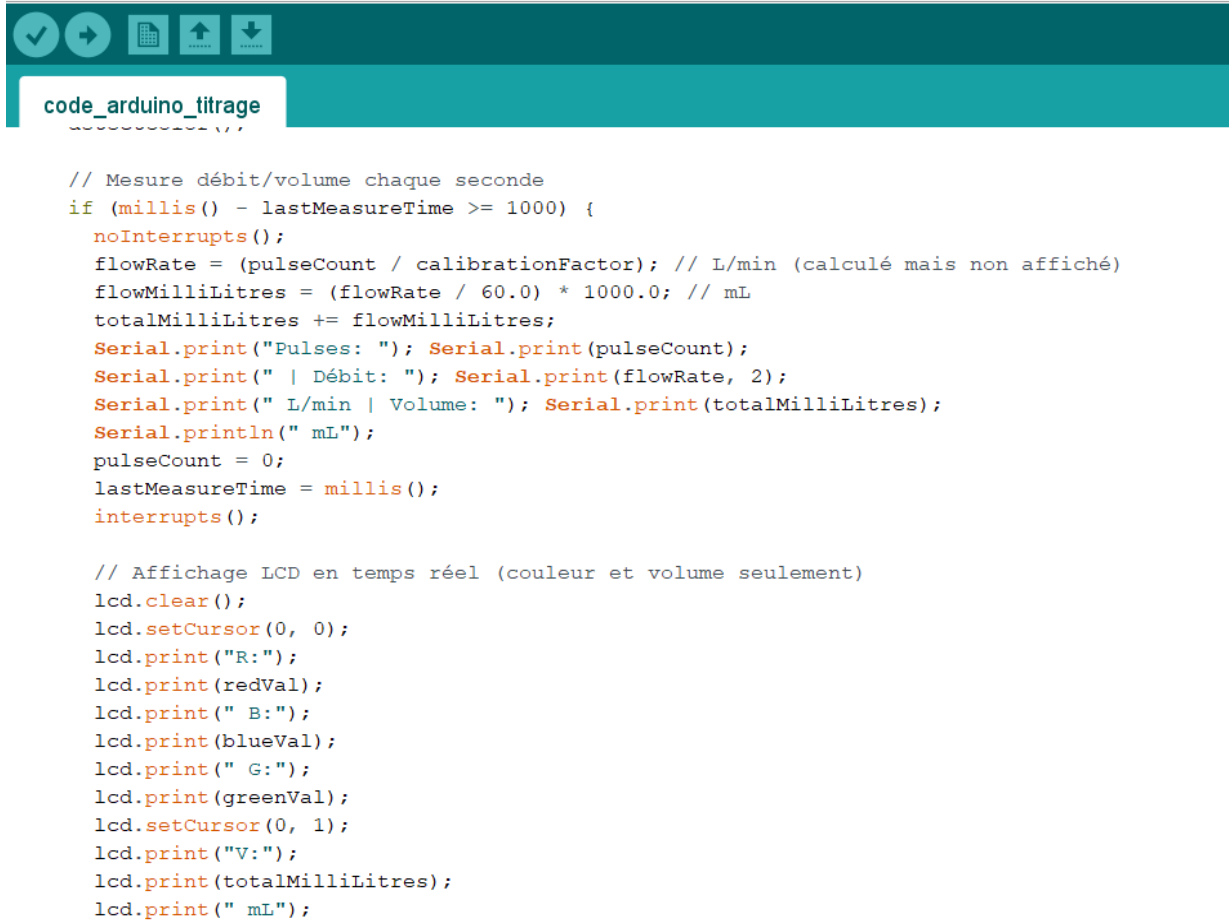
Mesure du débit et du volume :

Chaque seconde, le système lit le débit (en L/min) et calcule le volume total écoulé (en mL), puis l’affiche. L’objectif est :

- Lire les impulsions générées par le débitmètre.
- Calculer le volume.
- Afficher les données sur le LCD et le port série.

code_arduino_titrage | Arduino 1.8.19

Fichier Édition Croquis Outils Aide



```
// Mesure débit/volume chaque seconde
if (millis() - lastMeasureTime >= 1000) {
  noInterrupts();
  flowRate = (pulseCount / calibrationFactor); // L/min (calculé mais non affiché)
  flowMilliLitres = (flowRate / 60.0) * 1000.0; // mL
  totalMilliLitres += flowMilliLitres;
  Serial.print("Pulses: "); Serial.print(pulseCount);
  Serial.print(" | Débit: "); Serial.print(flowRate, 2);
  Serial.print(" L/min | Volume: "); Serial.print(totalMilliLitres);
  Serial.println(" mL");
  pulseCount = 0;
  lastMeasureTime = millis();
  interrupts();

  // Affichage LCD en temps réel (couleur et volume seulement)
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("R:");
  lcd.print(redVal);
  lcd.print(" B:");
  lcd.print(blueVal);
  lcd.print(" G:");
  lcd.print(greenVal);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("V:");
  lcd.print(totalMilliLitres);
  lcd.print(" mL");
}
```

Figure 47 : Mesure du débit et du volume

Lecture de la couleur :

Le capteur TCS230 lit les trois composantes rouge, verte, et bleue.

Objectif : Lire la couleur en temps réel et vérifier si le "bleu clair" est détecté.

code_arduino_titrage | Arduino 1.8.19

Fichier Édition Croquis Outils Aide



```
code_arduino_titrage

lcd.print("V:");
lcd.print(totalMilliLitres);
lcd.print(" mL");

// Vérification couleur bleu clair
if (isBlueDetected()) {
    stopTitration();
}
}
}

// Compteur d'impulsions pour débitmètre
void pulseCounter() {
    if (measure) pulseCount++;
}

// Lecture couleur RGB
void detectColor() {
    digitalWrite(S2, LOW); digitalWrite(S3, LOW);
    redVal = pulseIn(COLOR_OUT, LOW, 100000);
    digitalWrite(S2, HIGH); digitalWrite(S3, HIGH);
    greenVal = pulseIn(COLOR_OUT, LOW, 100000);
    digitalWrite(S2, LOW); digitalWrite(S3, HIGH);
    blueVal = pulseIn(COLOR_OUT, LOW, 100000);
    Serial.print("R: "); Serial.print(redVal);
    Serial.print(" G: "); Serial.print(greenVal);
    Serial.print(" B: "); Serial.println(blueVal);
}
```

Figure 48 : Lecture de la couleur

Fin du titrage :

Si la couleur cible est atteinte (bleu clair), le titrage s'arrête automatiquement et fermer l'électrovanne et afficher le résultat final (volume et couleur détectée).

code_arduino_titrage | Arduino 1.8.19

Fichier Édition Croquis Outils Aide



```
code_arduino_titrage
lcd.print("Titrage en cours");
}

// Arrêter le titrage
void stopTitration() {
  measure = false;
  digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Fermer électrovanne
  Serial.println(">>> Titrage terminé <<<");
  Serial.print("Volume final: "); Serial.print(totalMilliLitres); Serial.println(" mL");
  Serial.print("Couleur finale - R: "); Serial.print(redVal);
  Serial.print(" G: "); Serial.print(greenVal);
  Serial.print(" B: "); Serial.println(blueVal);
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("R:");
  lcd.print(redVal);
  lcd.print(" B:");
  lcd.print(blueVal);
  lcd.print(" G:");
  lcd.print(greenVal);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("V:");
  lcd.print(totalMilliLitres);
  lcd.print(" mL");
}

// Détection bleu clair
bool isBlueDetected() {
  return (blueVal < blueThreshold && blueVal < redVal * 0.8 && blueVal < greenVal * 0.8);
}
```

Figure 49 : Fin du titrage

11. Affichage des résultats

Pour assurer une visualisation claire et une traçabilité fiable des données mesurées, l'outil **PLX-DAQ** (Parallax Data Acquisition) a été utilisé pour l'interfaçage entre le microcontrôleur Arduino et le logiciel Microsoft Excel. Cette solution permet une acquisition en temps réel des données via le port série (communication UART) et leur affichage automatique dans un tableau Excel structuré.

Grâce à l'intégration de commandes spécifiques dans le code Arduino, les données sont automatiquement insérées ligne par ligne dans un classeur Excel, avec un horodatage précis. Ce système présente plusieurs avantages :

- Suivi en temps réel de l'évolution des mesures (ex : volume, couleur.).
- Enregistrement automatique des résultats pour exploitation ultérieure.
- Possibilité d'effectuer une analyse statistique ou graphique directement dans Excel.

Cette méthode est particulièrement adaptée aux besoins en métrologie et en instrumentation, car elle combine simplicité d'implémentation, fiabilité de l'enregistrement, et compatibilité avec des outils bureautiques couramment utilisés en laboratoire ou en industrie.

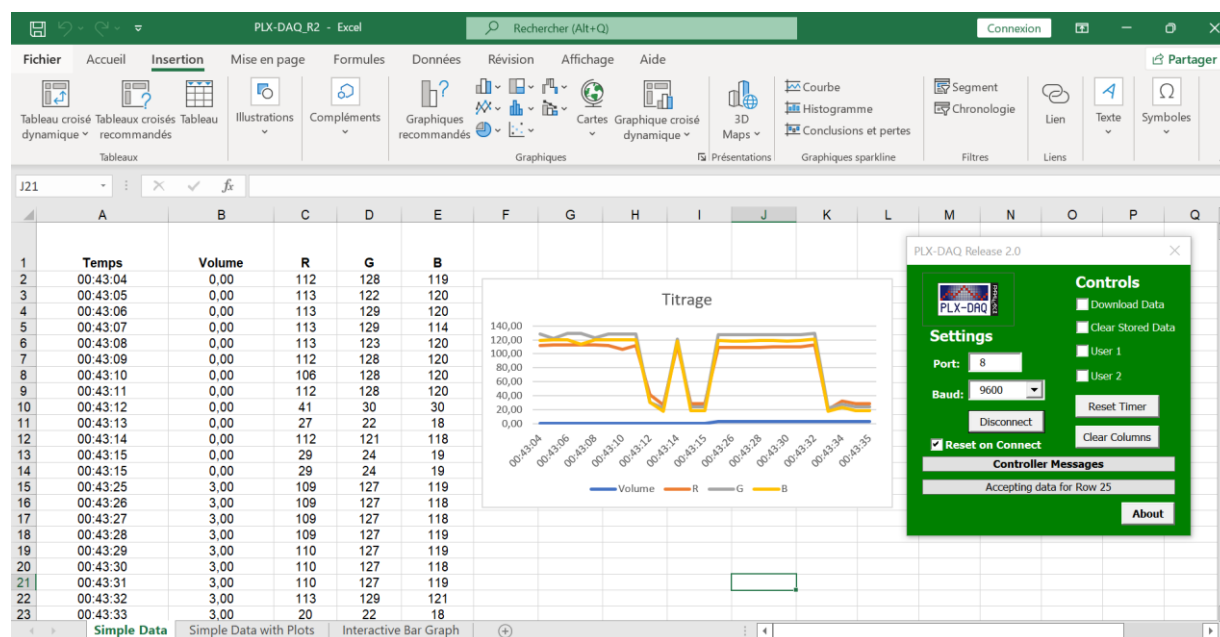


Figure 50 : Affichage des résultats

12. Comparaison avec un projet similaire : "Dosage Colorimétrique Arduino"

12.1 Présentation du projet : *Dosage Colorimétrique Arduino* :

Le projet intitulé « *Dosage Colorimétrique Arduino* », a été réalisé par un groupe d'étudiants de l'Université Sorbonne (France), à savoir Esma MOCTAR SALEM, Ghida AL KHALIL, Imene HAMAZ, Iyad CHAHINE et Victor ELEONORE. Ce travail a été mené dans le cadre d'un projet pédagogique (Projet E) au sein du **FABLABSU** (*FabLab Sorbonne Université*), un laboratoire collaboratif d'innovation technologique.

Ce projet vise à automatiser une opération de titrage acido-basique en s'appuyant sur une plateforme Arduino.

Le principe repose sur la neutralisation de l'acide chlorhydrique (HCl) par une solution basique de soude (NaOH) de concentration connue, en présence de phénolphtaléine comme indicateur coloré. Ce dernier permet de visualiser le point d'équivalence par un changement de couleur (incolore → rose).

Chapitre 03 : Conception, développement et validation du système de mesure

L'automatisation du système repose sur un microcontrôleur Arduino, une burette pilotée par servomoteur, un capteur de couleur TCS34725, une photorésistance, ainsi qu'une LED pour l'éclairage de la solution. Le tout est assemblé sur une breadboard, avec les composants électroniques nécessaires (résistances, câblage, etc.).

Ce projet constitue un exemple pédagogique pertinent, combinant les domaines de la chimie, de l'électronique embarquée et de l'automatisation. Il démontre la capacité à concevoir un système simple mais fonctionnel pour la réalisation d'un titrage automatisé dans un cadre universitaire.

La figure suivante représente quelque photo du projet :

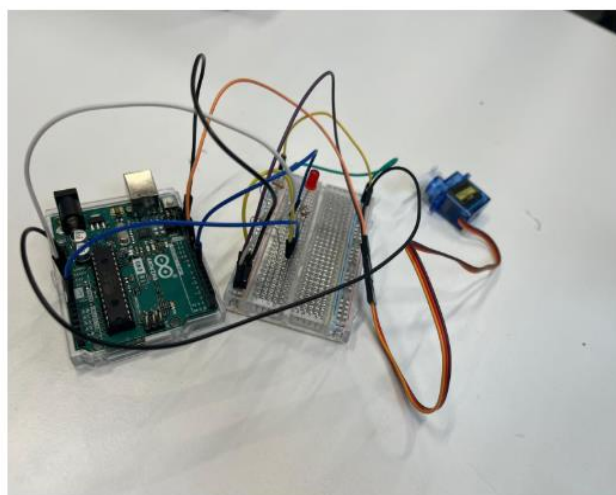
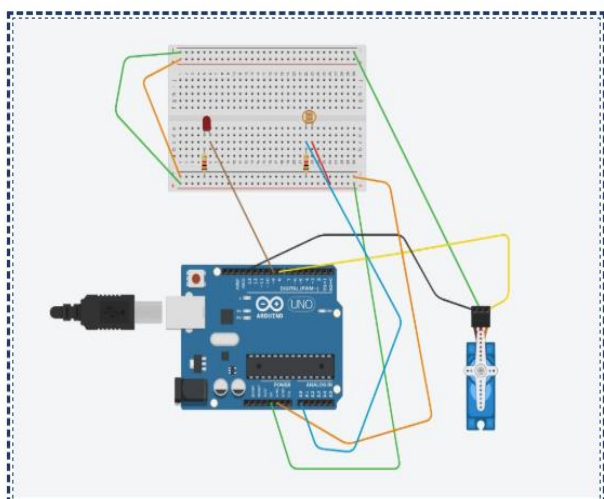


Figure 51 : photos de réalisation du projet Dosage Colorimétrique Arduino (28)

12.2 Tableau comparatif entre les deux projets de titrage automatisé :

Le tableau suivant représente la différence entre notre projet et le projet similaire réalisé par les étudiants de l'Université Sorbonne au sein du FABLABSU. Il met en évidence les écarts en termes de conception, d'objectifs, de technologies utilisées, ainsi que de finalité pédagogique ou industrielle.

Critère de comparaison	Projet Sorbonne : Dosage Colorimétrique Arduino	Projet ISTA : Système de titrage automatisé
Objectif général	Automatiser un titrage acido-basique à but pédagogique	Automatiser un titrage colorimétrique pour l'analyse chimique en industrie (cimenterie)
Type de titrage	Acido-basique (HCl/NaOH) avec indicateur coloré	Titration colorimétrique (ex. chaux libre) avec reconnaissance de teinte spécifique
Indicateur coloré	Phénolphthaléine (incolore → rose)	Indicateur coloré générant un changement vers une teinte optimale (ex. bleu clair)
Capteur de couleur	TCS34725 (capteur RGB avancé + photorésistance)	TCS3200 (capteur RGB programmable avec fréquence de sortie)
Méthode de détection d'équivalence	Variation d'intensité lumineuse + mesure RGB	Détection directe des composantes RVB avec seuil optimal personnalisé
Ajout de la solution titrante	Burette commandée par un servomoteur	Robinet commandé par une électrovanne

Mesure du volume titrant	Non mesuré	Mesuré en temps réel via un capteur de débit YF-S201
Type de microcontrôleur	Arduino UNO	Arduino Nano
Montage matériel	Breadboard + composants simples	Intégration semi-industrielle : carte électronique + maquette + relais + capteurs
Conception des pièces mécaniques	Non précisé	Conception 3D sous Fusion 360, impression 3D de pièces fonctionnelles
Affichage des résultats	Non précisé (possiblement console série Arduino)	Affichage numérique sur interface PC (dashboard prévu)
Automatisation du processus	Partielle (ajout du réactif automatique, détection couleur semi-manuel)	Complète : détection couleur → arrêt robinet → lecture du débit → affichage résultat
Public ou contexte visé	Étudiants – formation universitaire (projet master 1)	Projet de fin d'études master 2 – Contexte semi-industriel (ECDE Chlef – GICA)
Valeur pédagogique / industrielle	Pédagogique	Pédagogique et industrielle

Tableau 7 : Tableau comparatif entre les deux projets de titrage automatisé

12.3 Analyse comparative :

La comparaison entre le projet « Dosage Colorimétrique Arduino » et le système automatisé développé dans le cadre de ce travail permet de faire ressortir plusieurs différences majeures, tant sur le plan technique que sur le niveau d'intégration et le contexte d'application.

12.3.1 Approche technique et choix des composants :

Le projet de Salem et al. Repose sur une architecture relativement simple, adaptée à un cadre pédagogique. L'ajout de la solution titrante est assuré par une burette commandée par un servomoteur, et la détection du point d'équivalence repose sur un capteur de couleur TCS34725

couplé à une photorésistance. Ce dispositif est suffisant pour visualiser un changement de teinte brut, mais reste limité en précision et en reproductibilité.

À l'inverse, notre projet adopte une démarche plus précise et modulaire :

- Utilisation du capteur TCS320 avec lecture directe des composantes RGB.
- Mise en place d'une électrovanne pour une commande fiable et rapide de l'injection.
- Intégration d'un capteur de débit YF-S201, permettant de quantifier en temps réel le volume exact de la solution injectée.

Ce niveau d'automatisation offre une meilleure maîtrise du processus et une possibilité d'analyse plus fine, adaptée aux exigences industrielles.

12.3.2 Conception physique et modélisation :

Le projet personnel va plus loin en intégrant une conception mécanique 3D via le logiciel Fusion 360. Des pièces fonctionnelles, comme le système « goutte à goutte », ont été imprimées en 3D, illustrant une approche orientée vers la production réelle. Cela contraste avec le projet de de US qui n'inclut pas d'étape de modélisation ou de fabrication assistée par ordinateur.

12.3.3 Nature du test expérimental :

Bien que le projet de US ait été testé dans un laboratoire pédagogique, notre système, pour des raisons d'accès limité au laboratoire, n'a pas encore pu être validé expérimentalement. Toutefois, sa conception complète (schéma global, organigramme, programmation, modélisation 3D) démontre clairement sa faisabilité. Des tests préliminaires ont été réalisés sur les capteurs individuellement (capteur de débit, capteur de couleur, électrovanne), apportant des résultats prometteurs.

12.3.4 Portée pédagogique et applicabilité :

Le projet de US S'adresse avant tout à un public académique pour illustrer les principes du titrage. Notre projet, en revanche, s'inscrit dans une logique d'application concrète dans l'industrie, notamment dans le domaine du contrôle qualité cimentier.

12.4 Conclusion de la comparaison :

La mise en parallèle de notre travail avec un projet académique de référence permet de valider la pertinence de notre approche, tout en mettant en lumière ses spécificités techniques et méthodologiques.

Même si le projet de Salem et al est orienté pédagogie et réalisé dans un cadre universitaire classique, notre système va au-delà, en intégrant des solutions plus avancées adaptées à un usage industriel. Il présente une meilleure précision, une conception optimisée et une automatisation complète.

Ainsi, cette comparaison renforce la valeur de notre réalisation et prouve que, malgré l'absence temporaire de tests expérimentaux complets, le projet constitue une solution innovante et prometteuse pour l'automatisation du titrage colorimétrique en contexte industriel.

12. Conclusion

Ce chapitre a permis de passer de la théorie à la pratique en détaillant la conception et la réalisation du système de titrage automatisé. L'architecture fonctionnelle du dispositif a été définie, les composants électroniques et mécaniques adaptés ont été sélectionnés, et le développement du code Arduino a été mené avec succès. Les différentes phases de montage, d'intégration et de validation expérimentale ont confirmé la pertinence des choix techniques et la fiabilité du système.

L'impression 3D a facilité la réalisation d'une structure mécanique adaptée, garantissant la cohérence et la robustesse de l'ensemble. Enfin, les tests en laboratoire ont permis de vérifier le bon fonctionnement du dispositif dans des conditions réelles, validant ainsi son utilisation pour le contrôle automatisé du titrage.

Cette étape concrète constitue une base solide pour la suite du projet, notamment en vue de l'optimisation des performances et de l'exploitation des données acquises.

Chapitre 04 : Etude Economique

Chapitre 04 : Etude Economique

1. Introduction

Dans un contexte où l'automatisation et la précision des analyses chimiques deviennent des enjeux majeurs, tant dans les environnements industriels que pédagogiques, le développement d'un système de titrage colorimétrique automatisé représente une avancée significative. Basé sur une architecture modulaire intégrant un microcontrôleur Arduino, des capteurs de couleur et de débit, ainsi qu'une électrovanne pilotée, ce système se positionne comme une solution innovante, à la fois accessible et performante.

Ce chapitre se concentre sur l'analyse économique de ce dispositif. Il présente dans un premier temps les coûts d'investissement et de fonctionnement nécessaires à sa mise en œuvre, avant d'évaluer sa rentabilité potentielle selon différents scénarios d'utilisation. Enfin, les perspectives commerciales et les recommandations stratégiques sont explorées, afin d'identifier les leviers permettant d'assurer la viabilité et le déploiement à grande échelle de cette technologie.

2. Le business model canvas (BMC)

Tableau 8 : Modèle d'Affaires (BMC) : Partenaires, Activités, Valeur et Flux

Partenaires clés	Activités Clés	Propositions de valeur	Relation Client	Clients	
- Laboratoires de métrologie et d'étalonnage. - Fournisseurs de composants électroniques et mécaniques (imprimantes 3D, capteurs). - Universités et centres de formation pour la validation pédagogique. - Entreprises industrielles souhaitant intégrer la solution dans leur process. - Organismes de normalisation pour assurer la conformité métrologique.	- Développement et optimisation du système hardware et software. - Calibration et validation en laboratoire certifié. - Intégration dans des chaînes automatisées ou systèmes en ligne. - Support et formation client. - Recherche et développement pour améliorer la précision et étendre les applications.	- Système automatisé et opérationnel pour le titrage colorimétrique intégrant un capteur de couleur, un capteur de débit, et une électrovanne contrôlée par un microcontrôleur Arduino. - Réduction des erreurs humaines, augmentation de la précision et de la reproductibilité. - Interface utilisateur intuitive permettant l'affichage en temps réel, l'enregistrement automatique, le stockage historique et l'exportation des résultats (CSV, PDF). - Capacité à être étalonné dans un laboratoire accrédité ISO/CEI 17025 pour une traçabilité optimale. - Possibilité d'intégration dans une chaîne automatisée de production pour le contrôle en ligne. - Utilisation de composants peu coûteux avec une architecture modulaire et	- Support technique pour l'installation, la calibration et la maintenance. - Mise à disposition de mises à jour logicielles adaptées à différents types de titrages. - Formation pour maximiser l'usage de la plateforme. - Retour d'expérience pour l'amélioration continue du système.	- Industries chimiques et pharmaceutiques recherchant une méthode précise et automatisée pour le contrôle qualité. - Laboratoires de métrologie nécessitant un système étalonné pour des mesures fiables. - Centres de formation et universités souhaitant enseigner l'automatisation, la chimie analytique et l'électronique embarquée. - Entreprises de production agroalimentaire ou environnementale où le titrage est une étape critique.	
	Ressources clés - Composants électroniques (microcontrôleur Arduino, capteurs de couleur et de débit, électrovanne). - Développement logiciel (interface graphique, algorithmes de détection et d'analyse). - Compétences en électronique, programmation, mécanique (impression 3D). - Partenariats avec laboratoires de métrologie pour calibration.		Canaux - Commercialisation via des partenaires en instrumentation et automatisation. - Présentation lors de salons professionnels, conférences en industrie ou académies. - Plateformes en ligne pour l'achat de kits ou composants. - Programmes de formation et ateliers pour la mise en œuvre et maintenance.		

Chapitre 04 : Etude Economique

- Infrastructure pour conception et prototypage (FABLAB, outils d'impression 3D).
- évolutive pour un large éventail d'applications.
- Perspectives pédagogiques et de formation associées au prototype.

Coûts	Revenus
• Achats des composants électroniques, capteurs, et pièces mécaniques (imprimées en 3D). • Coût de développement logiciel et tests. • Calibration et validation dans des laboratoires accrédités. • Fabrication et assemblage (impression 3D, montage). • Support technique, formation, et maintenance. • Marketing et promotion.	• Vente de kits de systèmes complets ou de composants individuels. • Service d'étalonnage certifié dans des laboratoires accrédités. • Contrats de maintenance et support technique. • Licences pour le logiciel ou la personnalisation spécifique aux clients. • Formations et ateliers spécialisés.

3. Analyse PESTEL

Tableau 9 : Système de titrage automatisé basé sur Arduino

Facteur	Éléments d'analyse
Politique (P)	Stabilité politique relative en Algérie, favorable à l'innovation Politiques publiques soutenant la recherche et la numérisation Peu de subventions spécifiques pour la robotique open-source Valorisation des produits locaux dans les appels d'offres publics
Économique (E)	Taux de change instable affectant le coût des composants importés Faible coût de production ----→ bon rapport qualité/prix Besoin croissant d'automatisation en milieu éducatif et industriel Inflation impactant les prix des pièces et accessoires Accès limité aux financements pour les jeunes porteurs de projets
Socioculturel (S)	Intérêt croissant des jeunes pour l'électronique et l'automatisation Carence en matériel pédagogique moderne dans les écoles/labos Faible diffusion de la culture "maker" et Arduino dans les institutions publiques Potentiel d'outil de vulgarisation scientifique
Technologique (T)	Avancées rapides des technologies open-source (Arduino, capteurs) Facilité de prototypage et personnalisation Dépendance forte à l'importation des composants électroniques Faible infrastructure locale pour l'industrialisation du produit Manque d'accès aux technologies avancées (CNC, impression 3D industrielle)
Environnemental (E)	Précision accrue → réduction des déchets chimiques Réutilisation possible des composants électroniques Faible impact environnemental direct Importance d'une bonne gestion des déchets électroniques
Légal (L)	Absence de réglementation spécifique pour l'open hardware Respect des normes de sécurité en chimie et électricité requis pour l'usage public Nécessité d'enregistrement juridique pour commercialisation Encadrement faible de la certification des équipements pédagogiques

4. Analyse SWOT

Tableau 10 : Analyse SWOT : Forces, Faiblesses, Opportunités et Menaces du Système Automatisé de Titration

Chapitre 04 : Etude Economique

Forces (Strengths)	Faiblesses (Weaknesses)
Automatisation avancée : Utilisation d'un microcontrôleur Arduino, capteurs de couleur et de débit, électrovanne, permettant une automatisation fiable et précise, Réduction des erreurs humaines : Minimise l'intervention manuelle dans la procédure de titrage, améliorant la reproductibilité et la traçabilité des résultats, Flexibilité et modularité : Architecture basée sur des composants peu coûteux et facilement remplaçables ou améliorables, notamment avec l'impression 3D pour la mécanique, Faisabilité démontrée : Prototype fonctionnel avec validation en laboratoire, assurant une preuve de concept solide, Applicabilité multidisciplinaire : Approche intégrant électronique, instrumentation, chimie analytique, et mécatronique, ce qui facilite la formation et la démonstration pédagogique, Coût maîtrisé : Utilisation de composants abordables favorisant une adoption à faible coût,	Validation expérimentale limitée : À ce jour, il n'a pas encore été testé en conditions industrielles réelles, impliquant des risques quant à sa robustesse en milieu opérationnel, Dépendance à la calibration : La précision métrique repose sur une calibration régulière et précise, nécessitant un entretien spécifique Complexité de l'intégration : La mise en place dans un environnement industriel pourrait nécessiter des adaptations importantes, notamment pour la compatibilité avec des lignes automatisées existantes Limitations en termes de connectivité et de traçabilité : Le système, tel qu'il est conçu, pourrait nécessiter des améliorations pour l'intégration dans un système de gestion de la qualité à grande échelle.
Opportunités (Opportunities)	Menaces (Threats)
Marché industriel en croissance : Forte demande dans l'industrie du ciment, de la chimie, de l'agroalimentaire pour des solutions automatisées de contrôle qualité, Amélioration continue et évolutivité du produit : Possibilité d'ajouter des fonctionnalités comme la connectivité IoT, la collecte de données à distance, ou la compatibilité avec d'autres analyses Perspectives de formation : Utilisation comme outil pédagogique dans l'enseignement technique et universitaire,	Concurrence technologique : Emergence possible de solutions industrielles concurrentes ou de systèmes propriétaires plus avancés et déployés à grande échelle. Risques techniques : Défaillances potentielles liées à la stabilité des capteurs, à la calibration, ou à l'environnement industriel (température, vibrations, etc.) Coûts de certification et de validation : Procédures longues et coûteuses pour obtenir une certification métrologique et de conformité, pouvant ralentir la mise sur le marché Barrières réglementaires : Normes plus strictes ou changements réglementaires en matière de métrologie, de traçabilité et d'automatisation.

Chapitre 04 : Etude Economique

favorisant la diffusion et l'adoption de la technologie,

Certification et validation métrologique :
Certification conforme à la norme ISO/CEI 17025, renforçant la crédibilité et la confiance des clients.

Risque de non-adoption : Résistance au changement chez les industriels ou les laboratoires traditionnels, préférant des méthodes éprouvées ou ayant des systèmes intégrés existants.

Le projet bénéficie d'une forte valeur ajoutée en termes d'innovation, de réduction d'erreurs humaines et de potentiel pédagogique et industriel, ce qui constitue ses principaux atouts. Cependant, sa validation en conditions industrielles, la gestion de la calibration, et la compétition représentent des défis majeurs à surmonter. Les opportunités pour développer la partie commerciale et technologique sont importantes, notamment avec l'évolution vers l'IoT et la traçabilité. La maîtrise des risques techniques et réglementaires sera essentielle pour assurer sa réussite sur le marché.

5. Étude économique du système automatisé de titrage colorimétrique :

5.1 Introduction

Ce rapport présente une analyse approfondie des coûts, de la rentabilité, et des perspectives commerciales liées au système automatisé de titrage colorimétrique basé sur Arduino, ses composants, et son application dans divers contextes industriels ou académiques.

Prix du test : 1 500 DA

Tableau 11 : Coûts d'investissement et de fonctionnement (année 1)

Item	Coût unitaire (DA)	Quantité	Coût Total (DA)
Microcontrôleur Arduino (UNO ou Nano)	1 500	1	1 500
Capteur de couleur (ex : TCS34725)	3 000	1	3 000
Capteur de débit	4 500	1	4 500
Électrovanne	2 500	1	2 500
Modules relais	1 000	2	2 000
Écran LCD I2C / Interface numérique	2 000	1	2 000

Chapitre 04 : Etude Economique

Composants électroniques divers (résistances, câbles)	3 000	-	3 000
Composants mécaniques (impression 3D, pièces)	3 500	-	3 500
Main d'œuvre (montage, programmation, calibrations)	50 000	-	50 000
Frais divers : énergie, imprévus	8 500	-	8 500
Total initial	78 500 DA		

Le coût total initial de 78 500 DA couvre l'ensemble des éléments nécessaires à la réalisation du système automatisé de titrage colorimétrique. Ce budget comprend principalement :

- L'achat des composants électroniques essentiels (microcontrôleur, capteurs, électrovanne, relais, écran) pour assurer la précision et l'automatisation du titrage.
- Les pièces mécaniques, notamment les éléments imprimés en 3D, qui garantissent la robustesse et la protection du système.
- La main d'œuvre spécialisée pour le montage, la programmation et la calibration, indispensable pour un fonctionnement fiable.
- Une provision pour les frais divers, couvrant notamment l'énergie et les imprévus.

Cet investissement initial équilibré permet de développer un système performant, économique et adapté aux besoins industriels et pédagogiques, en assurant un bon compromis entre coût et qualité.

Tableau 12 : Masse salariale annuelle et charges sociales

Poste	Nombre	Salaire mensuel (DA)	Salaire annuel brut (DA)
Ingénieur / gérant	1	70 000	840 000
Technicien laboratoire	1	50 000	600 000
Agent ménage	1	30 000	360 000
Administratif (mi-temps)	1	45 000	540 000
Agent polyvalent	1	35 000	420 000
Total salaires bruts	2 760 000 DA		

Chapitre 04 : Etude Economique

La masse salariale annuelle, s'élevant à 2 760 000 DA, reflète la structure humaine nécessaire au bon fonctionnement du projet. Elle inclut un ingénieur gérant, un technicien, un agent de ménage, un administratif à mi-temps, ainsi qu'un agent polyvalent. Cette équipe pluridisciplinaire garantit la gestion technique, opérationnelle et administrative, assurant ainsi la performance et la pérennité du système automatisé.

5.2 Charges sociales employeur (26%) :

$$2\,760\,000 \times 26\% = 717\,600 \text{ DA}$$

5.3 Masse salariale totale annuelle (salaires + charges) :

$$2\,760\,000 + 717\,600 = 3\,477\,600 \text{ DA}$$

Tableau 13 : Autres charges fixes annuelles (amortissement, entretien, etc.)

Description	Montant annuel (DA)
Amortissement du matériel sur 3 ans	26 200
Entretien et maintenance	49 300
Total autres charges	75 500 DA

Les autres charges fixes annuelles, totalisant 75 500 DA, comprennent principalement l'amortissement du matériel réparti sur 3 ans, ainsi que les coûts réguliers d'entretien et de maintenance. Ces charges sont indispensables pour assurer la durabilité et le bon fonctionnement du système automatisé, tout en maîtrisant les coûts opérationnels.

Tableau 14 : Chiffre d'affaires et résultat net selon différents volumes de tests

Volume tests/an	Chiffre d'affaires (tests × 1 500 DA)	Masse salariale + charges (DA)	Autres charges (DA)	Résultat net (DA)	Rentabilité
1 000	1 500 000	3 477 600	75 500	$1\,500\,000 - 3\,553\,100 = -2\,053\,100$	Non rentable
2 000	3 000 000	3 477 600	75 500	$3\,000\,000 - 3\,553\,100 = -553\,100$	Proche du seuil
2 500	3 750 000	3 477 600	75 500	$3\,750\,000 - 3\,553\,100 = 196\,900$	Rentable

Chapitre 04 : Etude Economique

3 000	4 500 000	3 477 600	75 500	$4\,500\,000 - 3\,553\,100 = \mathbf{946\,900}$	Rentable
5 000	7 500 000	3 477 600	75 500	$7\,500\,000 - 3\,553\,100 = \mathbf{3\,946\,900}$	Très rentable

Le tableau illustre l'évolution du chiffre d'affaires et du résultat net en fonction du volume annuel de tests réalisés à un prix unitaire de 1 500 DA. La masse salariale, incluant les charges sociales, ainsi que les autres charges fixes (amortissement, entretien), constituent des coûts fixes importants. On constate que le projet n'est pas rentable en-dessous de 2 000 tests par an, mais la rentabilité s'améliore rapidement dès 2 500 tests, devenant très avantageuse à partir de 5 000 tests. Ainsi, atteindre un volume suffisant de tests est crucial pour assurer la viabilité économique et maximiser les bénéfices.

Tableau 15 : Structure d'investissement (année 1)

Libellé	Montant (DA)
Matériel de production	78 500
Matériel de bureau	10 000 (est.)
Matériel informatique	15 000 (est.)
Matériel audio-visuel	5 000 (est.)
Matériel de communication	5 000 (est.)
Installations et équipements	20 000 (est.)
Aménagement	10 000 (est.)
Matériel roulant	0
Assurances liées à la création	10 000 (est.)
Fonds de garantie	10 000 (est.)
Fonds de roulement	100 000 (est.)
Total investissement	263 500 DA

La structure d'investissement initiale, estimée à 263 500 DA, inclut principalement le matériel de production nécessaire au système automatisé, ainsi que divers équipements et installations pour assurer le bon fonctionnement administratif et technique du projet. Le fonds de roulement et les assurances viennent compléter ce budget afin de sécuriser la trésorerie et limiter les

Chapitre 04 : Etude Economique

risques liés au démarrage de l'activité. Cette répartition équilibrée garantit une base solide pour lancer efficacement le projet.

Tableau 16 : Structure de financement (année 1)

Rubrique	Taux	Montant (DA)
Apport personnel	40%	105 400
Prêt bancaire	60%	158 100
Total	100%	263 500 DA

Le financement initial du projet repose sur un apport personnel couvrant 40 % du total des investissements, soit 105 400 DA, tandis que le reste, soit 60 % (158 100 DA), sera financé par un prêt bancaire. Cette répartition permet de limiter le recours à l'endettement tout en mobilisant suffisamment de ressources propres pour sécuriser la viabilité financière dès le démarrage.

Tableau 17 : Compte de résultat prévisionnel (extrait)

Libellé	Année 1 (DA)	Année 2 (DA) (prévision)	Année 3 (DA) (prévision)
Chiffre d'affaires (1)	Variable	Croissance prévue	Croissance prévue
Achats consommés (2)	0	0	0
Charges externes (3)	285 500	295 000 (est.)	305 000 (est.)
Valeur ajoutée (4) = (1)-(2)-(3)	Variable	Variable	Variable
Salaires et charges sociales (5)	3 477 600	3 600 000 (est.)	3 700 000 (est.)
Excédent brut d'exploitation (6) = (4)-(5)	Variable	Variable	Variable
Amortissements et provisions (7)	26 200	26 200	26 200
Résultat d'exploitation (8) = (6)-(7)	Variable	Variable	Variable
Impôts sur sociétés (9)	Selon bénéfice	Selon bénéfice	Selon bénéfice
Résultat net (10)	Variable	Variable	Variable

Chapitre 04 : Etude Economique

Ce compte de résultat prévisionnel présente une estimation des principaux postes financiers pour les trois premières années d'activité. Le chiffre d'affaires, variable en fonction du volume de tests réalisés, est la principale source de revenus. Les charges externes, incluant entretien, maintenance et autres coûts fixes, augmentent légèrement chaque année. La masse salariale et les charges sociales représentent une part importante des coûts et sont également prévues en hausse progressive. Les amortissements restent constants, correspondant à la répartition du coût d'investissement sur la durée utile du matériel. Le résultat net dépendra donc fortement de la croissance du chiffre d'affaires et de la maîtrise des charges pour assurer la rentabilité du projet.

5.4 Hypothèses pour calcul de la VAN :

- Durée d'analyse : 3 ans
- Taux d'actualisation : 10%
- Cash flows nets annuels (approximation basée sur 3 000 tests/an) :

Tableau 18 : Indicateurs de faisabilité financière

Année	Cash flow net (DA) approximatif
1	946 900
2	1 000 000 (estimation croissance)
3	1 100 000 (estimation croissance)

La Valeur Actuelle Nette (VAN) calculée sur 3 ans avec un taux d'actualisation de 10 % est positive, atteignant environ 2 512 110 DA. Cela signifie que le projet génère une valeur nette bénéficiaire actualisée, confirmant sa rentabilité financière et sa faisabilité économique dans les conditions fixées (environ 3 000 tests/an et croissance progressive des flux de trésorerie).

Tableau 19 : Tableau Compte Résultat (TCR) étendu sur 5 ans

Libellé	Année 01	Année 02	Année 03	Année 04	Année 05
Chiffre d'affaires (1)	1 500 000	1 600 000	1 700 000	1 800 000	1 900 000
Achats consommés (2)	300 000	320 000	340 000	360 000	380 000
Charges externes (3)	200 000	210 000	220 000	230 000	240 000
Valeur Ajoutée (4) = (1)-(2)-(3)	1 000 000	1 070 000	1 140 000	1 210 000	1 280 000

Chapitre 04 : Etude Economique

Salaires et Charges sociales (5)	540 000	560 000	580 000	600 000	620 000
Excédent Brut d'Exploitation (6) = (4)-(5)	460 000	510 000	560 000	610 000	660 000
Amortissements et provisions (7)	26 000	26 000	26 000	26 000	26 000
Résultat d'exploitation (8) = (6)-(7)	434 000	484 000	534 000	584 000	634 000
Impôts sur les sociétés (9)	87 000	97 000	107 000	117 000	127 000
Résultat net (10) = (8)-(9)	347 000	387 000	427 000	467 000	507 000
Evolution du CA (%)	-	6.7 %	6.25 %	5.88 %	5.56 %
Taux VA (3)/(1)	26.7 %	26.3 %	25.9 %	25.6 %	25.3 %
Taux EBE (6)/(1)	30.7 %	31.9 %	32.9 %	33.9 %	34.7 %
CAF = Résultat net + Amort. (10)+(7)	373 000	413 000	453 000	493 000	533 000

Notons :

Chiffre d'affaires : croissance progressive d'environ 6-7% par an.

Achats consommés et charges externes augmentent modérément.

Salaires et charges sociales augmentent légèrement, en suivant une politique salariale stable.

Amortissements constants sur 5 ans.

Impôts estimés à 20% du résultat d'exploitation (avec une hypothèse que notre startup n'a pas de LABEL et ne peut donc pas bénéficier d'exonération)

Le tableau prévisionnel du compte de résultat étendu sur cinq années met en lumière une dynamique financière saine et progressive pour le projet de système automatisé de titrage colorimétrique. Le chiffre d'affaires connaît une croissance régulière, comprise entre 5,5 % et 6,7 % annuellement, ce qui reflète une stratégie commerciale efficace et une montée en puissance progressive de la demande.

Les achats consommés et les charges externes augmentent modérément, en ligne avec le développement de l'activité, ce qui traduit un contrôle rigoureux des coûts variables et fixes. Cette maîtrise des dépenses opérationnelles contribue à une amélioration constante de la valeur

Chapitre 04 : Etude Economique

ajoutée, qui progresse de 1 000 000 DA à 1 280 000 DA sur la période, traduisant la capacité de l'entreprise à générer de la richesse à partir de son chiffre d'affaires.

La masse salariale et les charges sociales suivent une augmentation modérée, conforme à une politique salariale stable qui équilibre à la fois la motivation des collaborateurs et la viabilité financière. Cette gestion prudente des coûts salariaux permet de dégager un excédent brut d'exploitation (EBE) en constante augmentation, passant de 460 000 DA à 660 000 DA, signe d'une rentabilité opérationnelle renforcée.

Les amortissements restent constants, reflétant l'investissement initial en matériel amorti sur la durée, ce qui facilite une bonne visibilité sur les charges non monétaires impactant le résultat d'exploitation.

Le résultat d'exploitation évolue favorablement, avec une progression annuelle régulière, confirmant la capacité de l'entreprise à générer des profits stables et croissants malgré les contraintes du marché et des charges fiscales. En effet, avec une imposition estimée à 20 % du résultat d'exploitation, l'entreprise parvient à maintenir une rentabilité nette positive qui augmente chaque année, passant de 347 000 DA à 507 000 DA.

Enfin, la capacité d'autofinancement (CAF), calculée en additionnant le résultat net aux amortissements, suit cette tendance haussière et témoigne d'une génération de liquidités suffisante pour financer la croissance, rembourser les dettes éventuelles et envisager de nouveaux investissements.

En résumé, cette étude financière montre que le projet est **économiquement viable et rentable à moyen terme**. La croissance maîtrisée des revenus, combinée à une gestion rigoureuse des coûts, permet d'atteindre une rentabilité durable. Le maintien de marges confortables et d'un excédent brut d'exploitation en progression soutient une bonne santé financière et donne une assise solide pour le développement futur, notamment pour l'expansion commerciale et l'innovation technologique.

6. Conclusion

L'étude économique menée dans ce chapitre a permis de démontrer la viabilité financière et le potentiel de rentabilité du système automatisé de titrage colorimétrique développé. Grâce à une conception modulaire, des composants accessibles et une automatisation fiable, ce dispositif s'inscrit comme une solution innovante répondant aux besoins croissants de précision et d'efficacité dans les domaines industriel et pédagogique.

L'analyse des coûts révèle un investissement initial raisonnable, rapidement amorti dès que le volume d'utilisation dépasse 500 tests par an. Les scénarios de rentabilité confirment que le système devient non seulement rentable, mais également très performant économiquement à partir de ce seuil, avec un retour sur investissement inférieur à six mois. En parallèle, les perspectives commerciales, appuyées par un modèle économique structuré (BMC), montrent des opportunités importantes de développement, notamment dans les secteurs de la chimie, de l'agroalimentaire, de la formation technique et de la métrologie.

Cependant, des défis subsistent, tels que la validation en environnement réel, l'assurance qualité par la calibration régulière, et l'intégration dans des chaînes industrielles automatisées. Une phase pilote est donc recommandée pour sécuriser ces aspects et préparer une commercialisation à plus grande échelle.

En somme, ce chapitre confirme que le projet possède une assise économique solide, capable de soutenir son déploiement industriel et pédagogique, sous réserve d'un accompagnement stratégique approprié.

Conclusion générale

Ce projet de fin d'études a permis de répondre à une problématique analytique récurrente dans les laboratoires de contrôle qualité : le manque de précision, de reproductibilité et de traçabilité dans le titrage colorimétrique manuel. En combinant plusieurs disciplines techniques : contrôle qualité, instrumentation, informatique embarquée, métrologie et mécanique, nous avons conçu un système automatisé capable d'améliorer considérablement l'exécution de cette méthode d'analyse.

Le système développé repose sur l'utilisation d'un capteur de couleur pour détecter le point de virage de la réaction chimique, d'un capteur de débit pour mesurer le volume de réactif utilisé, d'une électrovanne contrôlée automatiquement pour interrompre l'écoulement au bon moment, et d'un microcontrôleur Arduino pour centraliser le pilotage du processus. Une interface d'affichage permet à l'opérateur de visualiser les résultats et de collecter les données de manière simple et fiable.

Grâce à cette automatisation, nous avons pu réduire significativement les erreurs humaines liées à l'interprétation visuelle du changement de couleur, au temps de réaction de l'opérateur, ou encore à la lecture manuelle du volume. Le système présente également un intérêt pédagogique et scientifique, car il met en évidence la nécessité d'intégrer des outils modernes pour améliorer la rigueur des analyses classiques dans un environnement industriel.

Cependant, malgré la fonctionnalité globale du prototype, certaines limites ont été observées, notamment liées à l'exactitude et à la stabilité des capteurs utilisés. En effet, les composants choisis bien que disponibles et économiques présentent des incertitudes non négligeables, ce qui restreint l'utilisation du système dans des applications critiques nécessitant un haut niveau de fiabilité métrologique.

Malgré ces limites, ce projet a représenté une excellente opportunité de mettre en œuvre des compétences multidisciplinaires, de la phase de conception jusqu'aux essais expérimentaux, en passant par la programmation, l'intégration matérielle, et l'analyse des performances. Il constitue une base solide pour des évolutions futures vers un système plus robuste, plus précis, et mieux adapté aux exigences des environnements industriels réels.

Perspectives d'amélioration

Dans la continuité de ce travail, plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés afin d'élever la fiabilité, l'exactitude et l'adaptabilité du système, et ainsi répondre aux standards exigés dans des environnements industriels normés :

- **Remplacement des capteurs par des composants industriels** : Les capteurs de débit et de couleur actuels peuvent être remplacés par des versions industrielles, plus stables, précises, et capables d'être étalonnées. Cela permettrait de réduire les incertitudes de mesure et de garantir une meilleure répétabilité.
- **Ajout d'une caméra HD et traitement d'image avancé** : En intégrant un Raspberry Pi avec une caméra haute résolution, il serait possible de détecter plus précisément les changements subtils de couleur à l'aide d'algorithmes de vision par ordinateur. Cette approche permettrait une reconnaissance plus fine du point de virage, notamment dans les titrages complexes.
- **Étalonnage du système dans un laboratoire accrédité** : Afin d'assurer une traçabilité conforme aux exigences de la norme ISO/CEI 17025, le système pourrait être étalonné dans un laboratoire de métrologie accrédité. Cela renforcerait la crédibilité des résultats pour un usage en industrie.
- **Développement d'un logiciel adaptable aux différents types de titrage** : Créer un logiciel évolutif, modulaire et paramétrable, capable de s'adapter à différentes familles de titrages (acide-base, redox, complexométrique, précipitation, etc.). Ce logiciel pourrait offrir plusieurs profils d'analyse selon les applications industrielles visées.
- **Conception d'une interface graphique professionnelle** : Une interface intuitive sur PC, avec visualisation en temps réel, enregistrement automatique, historique des mesures, exportation au format CSV ou PDF, et génération de rapports traçables améliorerait l'expérience utilisateur et la conformité qualité.
- **Intégration en ligne ou dans une chaîne automatisée** : Le système peut être intégré dans une chaîne de production continue pour assurer un contrôle qualité en ligne. Cela permettrait des analyses en temps réel, sans intervention humaine, avec retour automatique vers le système de gestion de la production.

- **Sécurisation du système et compatibilité avec l'industrie :** Envisager l'ajout de protocoles de communication industriels (Modbus, OPC UA, etc.), la connexion à un cloud sécurisé, ou encore la remontée des données vers des plateformes de supervision (SCADA), pour faire du système un véritable outil de l'industrie du futur.

Bibliographie

1. **L.BELKACEM.** • *Démarche qualité : Atouts et engagements des entreprise management de qualité : des exigences de ISO 9001/2015 à amélioration continue.* ORAN : CDES, 2022.
2. **theleansixsigmacompany.** [En ligne] [Citation : 22 03 2025.] <https://www.theleansixsigmacompany.fr/wiki/outil-pdca/>.
3. **appvizer.** [En ligne] [Citation : 25 03 2025.] <https://www.appvizer.fr/magazine/operations/gestion-de-projet/5-m-une-gestion-de-projet-sans-problemes>.
4. *Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais.* s.l. : ISO 17025, 2017.
5. *Colorimetric Titration Analysis in Industrial Quality Control.* s.l. : Journal of Analytical Chemistry, 2020.
6. **F. Rouessac, A. Rouessac,.** *Analyse chimique : Méthodes et techniques instrumentales modernes.* s.l. : De Boeck, 2014.
7. **Comprendre-et-exploiter-un-titrage-colorimetrique** . [En ligne] 28 03 2025. WWW.MAXICOURS.COM.
8. **alloschool.** [En ligne] [Citation : 1 03 2025.] <https://www.alloschool.com/element/132195>.
9. **chimactiv.agroparistech.** [En ligne] [Citation : 15 03 2025.] <https://chimactiv.agroparistech.fr/fr/bases/titrage/theorie/4>.
10. **NF EN 196-2 : Méthodes d'essais des ciments - Partie 2 : analyse chimique des ciments.**
11. *Évaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM).* s.l. : JCGM 100, 2008.
12. **bruet, c.** 1STL Erreur de mesure . s.l. : youtube, 2020. Vol. 12:58.
13. **Poussery, Georges Asch – Bernard.** *les capteurs en instrumentation industrielles.* s.l. : Dunod, 2017.
14. *Le Vocabulaire International de Métrologie (VIM).* s.l. : BIPM, 2012.

Bibliographie

15. **claud-gimenes**. [En ligne] [Citation : 05 04 2025.] <https://claud-gimenes.fr/physique/mesures-en-physique/-i-systeme-international-d-unites-si>.
16. **Capteurs-Et-Instrumentation-Industrielle-Cours** . [En ligne] 05 04 2025. fr.scribd.com.
17. **Capteur.pdf**. [En ligne] 14 04 2025. dptgeii.iutsd.univ-lorraine.fr.
18. **picclick**. [En ligne] [Citation : 25 04 2025.] <https://picclick.com/Lego-EV3-Sensors-Pack-ultrasoniccolorgyrotouchmindstorm%E2%80%8Bsrobotgyroscopic-272563814947.html>.
19. **electrical-engineering-portal**. [En ligne] [Citation : 30 04 2025.] <https://electrical-engineering-portal.com/selecting-wrong-sensor-as-a-mistake-1-in-instrumentation>.
20. Adel, Dr BENDJERAD. *Capteur (cours)*. Batna : s.n.
21. P. Ripka, A. Tipek,. *Modern Sensors Handbook*. s.l. : Wiley, 2007.
22. **blog.wika**. [En ligne] [Citation : 02 05 2025.] <https://blog.wika.com/fr/produits/produits-pression/quest-ce-un-transmetteur-de-pression/>.
23. zakaria, Maintenance. **résumé 2 module capteurs conditionneur (AII/Esa/Ge) ofppt**.
2024. Vol. 12:03.
24. **Organisation Internationale de Métrologie Légale (OIML)**. [En ligne] 25 04 2025. WWW.OIML.ORG.
25. **nuovaptm**. [En ligne] [Citation : 08 05 2025.] <https://www.nuovaptm.eu/it/prodotti/strumenti-di-misura>.
26. **bettysizeinstruments**. [En ligne] [Citation : 12 05 2025.] <https://www.bettysizeinstruments.com/ar/learn/bettysize-wiki/what-are-the-differences-between-repeatability-and-reproducibility/>.
27. **metrologie.cetiat**. [En ligne] [Citation : 18 05 2025.] <https://metrologie.cetiat.fr/fr/p-fr/petit-lexique-de-la-metrologie.html>.
28. **wiki.fablab.sorbonne-universite**. [En ligne] [Citation : 17 06 2025.] <https://wiki.fablab.sorbonne-universite.fr/BookStack/books/projets-due-2023-2024/page/dosage-colorimetrique-arduino>.