



Royaume du Maroc
Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche scientifique et de l'Innovation
École Normale Supérieure de l'Enseignement Technique de Mohammed VI



Rapport de Projet de Fin d'Année (PFA)

Filière : Génie Mécanique des Systèmes Industriels (GMSI)

Étude, conception et simulation mécanique d'un compteur d'eau intelligent selon l'ISO 4064

Lieu du stage : Fondation MAScIR – UM6P, Benguerir

Réalisé par : LARZA Yahya

Encadrante : Mme Oumayma BELMOUM (MAScIR)



Année Universitaire 2025–2026

Dédicace

Ce travail est dédié à ma famille, source inépuisable d'amour, de soutien
et de motivation.

À mes parents, dont les encouragements constants, les sacrifices silencieux
et la confiance indéfectible ont été le moteur de mon parcours.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont cru en moi et m'ont soutenu au
cours de cette aventure.

Yahya LARZA

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à **Madame Oumayma BELMOUM**, mon encadrante au sein de la Fondation MAScIR, pour son accueil chaleureux, sa disponibilité constante et la qualité de son accompagnement tout au long de ce projet. Ses conseils avisés, sa rigueur scientifique et sa bienveillance ont grandement contribué à la réussite de ce travail.

Mes sincères remerciements s'adressent également à **M. Rachid BENNANI**, Manager Technique, pour m'avoir accueilli au sein du département, ainsi que pour sa supervision, ses orientations précieuses et les moyens mis à ma disposition pour mener à bien cette étude.

J'adresse aussi mes remerciements à l'ensemble du personnel et des chercheurs du département D&MSD de MAScIR pour leur collaboration, leur soutien et l'environnement de travail particulièrement stimulant qu'ils m'ont offert.

Mes remerciements s'étendent à l'équipe pédagogique de l'**ENSET Mohammedia**, ainsi qu'à tous mes enseignants, pour la qualité de la formation dispensée tout au long de mon parcours en Génie Mécanique des Systèmes Industriels.

Enfin, je remercie chaleureusement ma famille et mes proches pour leur appui moral constant, leur patience et leur confiance tout au long de cette expérience.

Résumé

Ce projet de fin d'année (PFA) s'inscrit dans la continuité d'un projet de fin d'études (PFE) ayant abouti à la réalisation d'un premier prototype de compteur d'eau multijet intelligent. L'objectif de ce travail est de reprendre la solution existante, d'en analyser les limites et d'identifier des axes d'amélioration en s'appuyant notamment sur les exigences de la norme ISO 4064.

La démarche adoptée repose sur une approche itérative combinant analyse de la conception existante, recherche de solutions, modélisation CAO, dimensionnement, simulations numériques et optimisation. Les principales améliorations concernent l'architecture mécanique du compteur, le système de détection magnétique, le rotor ainsi que les éléments participant à son guidage et à son fonctionnement hydraulique. Les différentes modifications sont ensuite étudiées afin d'évaluer leur influence sur le comportement global du compteur et de vérifier leur compatibilité avec les performances recherchées.

Cette approche permet ainsi de faire évoluer progressivement le prototype initial vers une conception améliorée, en reliant chaque choix de conception aux résultats obtenus et aux exigences applicables. Le projet constitue une étape de développement avant la fabrication et la validation expérimentale du prototype final.

Mots clés : Compteur d'eau multijet, Optimisation, CAO, CFD, FEA, ISO 4064, Aimants périphériques, Réduction d'inertie.

Abstract

This final-year project (PFA) is a direct continuation of a previous graduation project (PFE) that led to the development of an initial intelligent multi-jet water meter prototype. The objective of this work is to analyze the limitations of the existing prototype and develop targeted improvements based on a structured engineering approach.

The adopted methodology consists of analyzing the initial design, identifying the main areas for improvement, proposing and evaluating design solutions, and validating the resulting modifications through CAD modeling, numerical simulations, and optimization. Particular attention is given to the rotor, magnetic detection system, mechanical integration, and hydraulic behavior. The different results are then compared with the initial design and with the applicable requirements of ISO 4064.

This approach aims to progressively improve the existing prototype while ensuring that each design modification is supported by an analysis or numerical validation. The project therefore provides an intermediate step toward the development, manufacturing, and experimental validation of an improved intelligent multi-jet water meter prototype.

Keywords : Intelligent water meter, Multi-jet water meter, Design improvement, Optimization, CAD, CFD, FEA, ISO 4064, Prototype.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xii
Liste des abréviations	xiv
Introduction générale	1
1 Présentation de l'organisme d'accueil	2
1.1 Introduction	2
1.2 Université Mohammed VI Polytechnique	2
1.3 Fondation MAScIR	2
1.4 Département D&MSD	3
1.5 Lien avec le projet	3
1.6 Conclusion	3
2 Analyse du prototype initial	4
2.1 Introduction	4
2.2 Présentation du prototype initial	4
2.3 Analyse de la conception et des références normatives	5
2.4 Choix des matériaux	6
2.5 Analyse des simulations numériques	7
2.5.1 Analyse de l'étude FEA	7
2.5.2 Limites liées aux conditions de fonctionnement	9
2.5.3 Lien entre CFD et FEA	9

2.6	Synthèse des limites du prototype initial	10
2.7	Conclusion	11
3	DMADV – DEFINE : Définition du problème et des objectifs	12
3.1	Introduction	12
3.2	Problématique et Périmètre de l'Étude	12
3.3	Objectifs Spécifiques du Projet	13
3.4	Analyse des Références Normatives et Choix du Calibre	14
3.4.1	Exigences de la Norme ISO 4064-1	15
3.4.2	Synthèse du Cahier des Charges (Exigences de Conception)	17
3.5	Matrice des Critères d'Évaluation de la Reconception	17
3.6	Conclusion du Chapitre	17
4	DMADV — MEASURE :	
	Caractérisation de la conception de référence	19
4.1	Introduction	19
4.2	Conception de référence	20
4.2.1	Architecture générale	20
4.2.2	Caractéristiques géométriques et physiques	20
4.3	Caractérisation du système de mesure	20
4.3.1	Configuration initiale de détection	22
4.3.2	Résolution volumique	22
4.4	Caractérisation hydraulique de référence	23
4.4.1	Conditions de fonctionnement	23
4.5	Caractérisation CFD de la conception de référence	24
4.5.1	Configuration numérique	24
4.5.2	Étude paramétrique en fonction du débit d'entrée	25
4.5.3	Couple hydraulique de référence	25
4.5.4	Champs de pression	26
4.5.5	Champs de vitesse	26
4.5.6	Synthèse des grandeurs CFD	27
4.6	Synthèse de la baseline	27
4.7	Conclusion	29
5	DMADV — ANALYZE :	
	Analyse des écarts et identification des axes d'amélioration	31
5.1	Introduction	31
5.2	Analyse des écarts par rapport aux exigences	31
5.3	Analyse et justification des écarts de simulation CFD (SolidWorks vs AN-SYS Fluent)	32

5.4	Analyse des paramètres influençant le débit de démarrage	33
5.4.1	Relation fondamentale	33
5.4.2	Analyse des leviers d'action	34
5.5	Analyse du système de détection	34
5.5.1	Justification de la configuration retenue	35
5.6	Analyse des contraintes mécaniques	35
5.6.1	Identification des zones critiques	35
5.7	Analyse des matériaux	35
5.7.1	Matériau de la turbine	35
5.8	Analyse de l'étanchéité	36
5.9	Analyse de la fabricabilité	36
5.10	Synthèse des écarts et axes d'amélioration	36
5.11	Conclusion	37
6	DMADV — DESIGN :	
	Reconception et optimisation	38
6.1	Introduction	38
6.2	Benchmarking des matériaux pour turbine de compteur d'eau	38
6.2.1	Matériaux identifiés	39
6.2.2	Analyse comparative	39
6.3	Design Study : Sélection du matériau optimal	40
6.3.1	Configuration de la Design Study	40
6.3.2	Analyse des résultats	40
6.3.3	Choix du matériau retenu	41
6.4	Optimisation du rotor : Masse et inertie	41
6.4.1	Problème identifié	41
6.4.2	Historique des optimisations	41
6.4.3	Modifications géométriques apportées	41
6.5	Optimisation des congés de raccordement	42
6.5.1	Problème identifié	42
6.5.2	Solution adoptée	43
6.6	Optimisation du guidage et tolérancement	43
6.6.1	Problème identifié	43
6.6.2	Solution adoptée : Ajustement 4 H8 / e7	43
6.6.3	Validation thermique	45
6.6.4	Optimisation du contact axial : Embout dôme	45
6.7	Architecture du système de détection	47
6.8	Passage à une étanchéité radiale	48
6.8.1	Problème identifié	48

6.8.2	Solution adoptée	48
6.9	Adaptation à l'impression 3D	48
6.10	Assemblage final	49
6.11	Conclusion	50
7	DMADV — VERIFY : Validation de la conception optimisée	51
7.1	Introduction & Méthodologie	51
7.2	Validation Hydraulique : Perte de Charge et Écoulement	51
7.3	Validation Métrologique et Débit de Démarrage	52
7.4	Validation Mécanique (FEA) et Thermique	52
7.5	Synthèse des performances : Baseline vs Final	53
7.6	Système de Détection, Étanchéité et Synthèse	53
7.7	Conclusion du chapitre	54
8	Fabrication du premier prototype : Achats et impressions 3D	55
8.1	Introduction	55
8.2	Stratégie d'approvisionnement	55
8.2.1	Composants acquis	55
8.3	Premiers essais d'impression 3D	56
8.3.1	Choix du matériau pour le prototypage	56
8.3.2	Pièces imprimées	57
8.3.3	Paramètres d'impression	58
8.4	Observations et enseignements	58
8.4.1	Qualité d'impression	58
8.4.2	Points d'attention identifiés	58
8.5	Conclusion	59
	Conclusion générale du stage	60
	Bibliographie	62
A	Liste détaillée des composants et achats	63
A.1	Composants mécaniques et électroniques	63
A.2	Budget prévisionnel	64
A.3	Remarques sur les choix d'approvisionnement	64
B	Plans de définition et d'ensemble 2D	66
B.1	Plan d'ensemble — Compteur d'eau DN15 (DWG-01)	67
B.2	Plan de définition — Corps du compteur (DWG-04)	68
B.3	Plan de définition — Chambre d'injection (DWG-02)	69
B.4	Plan de définition — Turbine en PEI Polyetherimide (DWG-05)	70

B.5 Plan de définition — Filtre en PP/PE (DWG-03)	71
---	----

Liste des figures

1.1	Logo de l'UM6P	2
1.2	Logo de MAScIR	3
2.1	Architecture interne du prototype initial	4
2.2	Analyse dimensionnelle du prototype initial	5
2.3	Définition des conditions limites utilisées dans l'analyse FEA du PFE . . .	8
3.1	Les cinq phases de la démarche DMADV appliquée au compteur d'eau. . .	13
3.2	Identification des calibres normalisés à partir des références industrielles [1].	14
3.3	Caractéristiques dimensionnelles et enveloppe de masse d'un compteur DN15 de référence [1].	15
3.4	Classes de température pour compteurs d'eau potable selon l'ISO 4064-1 [2].	16
3.5	Classes de perte de charge admissibles selon l'ISO 4064-1 [2].	16
4.1	Modèle CAO de référence du compteur DN15	21
4.2	Étude paramétrique de la conception de référence en fonction du débit d'entrée	25
4.3	Comparaison des distributions de pression obtenues par simulation CFD .	27
4.4	Comparaison des distributions de vitesse obtenues par simulation CFD . .	28
5.1	Identification de la zone de concentration de contraintes	35
6.1	Résultats de la Design Study — Comparaison des matériaux	41
6.2	Géométrie de la turbine finale optimisée (moyeu évidé)	42
6.3	Propriétés de masse du rotor optimisé sous SolidWorks	43
6.4	Identification de la zone de concentration de contraintes (pied de pale) . .	44
6.5	Distribution de contrainte lissée après intégration des congés	44
6.6	Assemblage final du compteur d'eau multijet optimisé	49
7.1	Distribution du champ de pression (CFD).	52
7.2	Classes de perte de charge selon l'ISO 4064-1.	52
7.3	Déformation du guidage selon T°	52
7.4	Classes de température (ISO 4064-1).	53

8.1	Liste des achats finale	55
8.2	Pièces imprimées en PLA — Rotor, distributeur et corps de cartouche . . .	57

Liste des tableaux

2.1	Principales limites identifiées dans la conception initiale	6
2.2	Limites relatives au choix des matériaux	7
2.3	Conditions utilisées pour l'analyse FEA du PFE	8
2.4	Limites identifiées dans la définition des conditions de simulation	9
2.5	Synthèse des principales limites du prototype initial	10
3.1	Synthèse des exigences de conception du compteur multijet DN15.	17
3.2	Critères et indicateurs d'évaluation de la reconception.	18
4.1	Caractéristiques géométriques et physiques de la conception de référence . .	21
4.2	Caractéristiques initiales du système de détection	22
4.3	Points de fonctionnement étudiés pour la conception de référence	24
4.4	Couple hydraulique obtenu pour les différents points de fonctionnement . .	26
4.5	Synthèse des grandeurs hydrauliques de référence	28
4.6	Synthèse de la baseline de la conception de référence	29
5.1	Analyse des écarts — Conception de référence vs exigences	32
5.2	Leviers d'action pour la réduction du débit de démarrage	34
5.3	Caractéristiques du système de détection de référence	34
5.4	Analyse comparative des matériaux pour la turbine	36
5.5	Synthèse des axes d'amélioration identifiés	37
6.1	Matériaux couramment utilisés pour les turbines de compteurs d'eau . . .	39
6.2	Résultats de la Design Study — Comparaison des matériaux	40
6.3	Historique des optimisations du rotor	42
6.4	Effet des congés de raccordement sur les contraintes	43
6.5	Caractéristiques de l'ajustement 4 H8 / e7	44
6.6	Validation thermique — Déformations en fonction de la température . . .	45
6.7	Comparaison des performances selon la géométrie du contact axial	47
6.8	Caractéristiques du système de détection optimisé	48
6.9	Caractéristiques du joint R37	48

7.1	Tableau de cohérence des performances — Baseline vs Final	53
7.2	Synthèse des performances validées numériquement en phase VERIFY. . .	54
8.1	Liste des composants acquis pour le prototype	56
8.2	Paramètres d'impression 3D — PLA	58
8.3	Synthèse des résultats du projet	61
A.1	Liste complète des achats — Compteur d'eau multi-jets DN15	63
A.2	Estimation budgétaire par catégorie	65

Liste des abréviations

Abréviation	Sigle	Définition / Contexte dans le projet
ABS	Acrylonitrile Butadiène Styène	Polymère thermoplastique évalué comme matériau candidat pour la turbine. Bon compromis légèreté/impression 3D.
AMR	Automatic Meter Reading	Télérelève automatique. Système de collecte à distance des données de consommation, visé pour l'intégration IoT du compteur intelligent.
CAO	Conception Assistée par Ordinateur	Outil de modélisation 3D (SolidWorks) utilisé pour la reconstruction du prototype, le dimensionnement et l'assemblage du compteur DN15.
CFD	Computational Fluid Dynamics	Dynamique des Fluides Numérique. Méthode de simulation des écoulements utilisée pour évaluer la perte de charge, le couple hydraulique et les champs de pression/vitesse dans le compteur.
DMADV	Define, Measure, Analyze, Design, Verify	Méthodologie Six Sigma appliquée à la reconception du compteur, structurant l'ensemble du projet en 5 phases rigoureuses.
DN	Diamètre Nominal	Diamètre standardisé du compteur. Dans ce projet, le calibre retenu est DN15 (15 mm), standard résidentiel.
D&MSD	Digitalization & Microelectronics Smart Devices	Département de recherche de la Fondation MAS-cIR (capteurs, systèmes embarqués, IoT) dans lequel ce PFA a été réalisé.

Table 1 – suite de la liste des abréviations

Abréviation	Sigle	Définition / Contexte dans le projet
FDM	Fused Deposition Modeling	Modélisation par Dépôt de Filament. Procédé d'impression 3D par extrusion de filament, envisagé pour le prototypage rapide du compteur (pièces en PEI/ABS).
FEA	Finite Element Analysis	Analyse par Éléments Finis. Simulation mécanique réalisée sous SolidWorks Simulation pour évaluer les contraintes (Von Mises) et déformations du rotor en PEI, ABS, POM, etc.
Hall (effet)	—	Principe de détection magnétique utilisé dans le système de mesure : capteur Hall associé à 4 aimants périphériques (NdFeB) pour 4 impulsions/tour.
IoT	Internet of Things	Internet des Objets. Concept d'intégration du compteur intelligent dans un réseau de communication pour la transmission automatique des données.
ISO 4064	—	Norme internationale de référence pour les compteurs d'eau potable. Définit les exigences métrologiques (Q3, R, Δp_{63} , T50, MAP16) appliquées dans ce projet.
MAP16	Maximum Admissible Pressure	Pression maximale admissible de 16 bar imposée par la norme ISO 4064. Validée par simulation FEA sur le corps du compteur.
MAScIR	Moroccan Foundation for Advanced Science, Innovation and Research	Fondation marocaine de recherche, organisme d'accueil du stage à l'UM6P.
MRF	Multiple Reference Frame	Cadre de Référence Multiple. Technique CFD utilisée pour simuler la rotation de la turbine dans un repère tournant (SolidWorks Flow Simulation / ANSYS Fluent).

Table 1 – suite de la liste des abréviations

Abréviation	Sigle	Définition / Contexte dans le projet
NBR	Nitrile Butadiène Rubber	Caoutchouc nitrile. Matériau du joint torique d'étanchéité radiale R37 (70 Shore A) sélectionné pour le compteur.
NdFeB	Néodyme-Fer-Bore	Aimant permanent haute performance utilisé dans le système de détection (4 aimants périphériques).
PEI (Uitem)	Polyétherimide (ULTEM™ 1010)	Matériau retenu pour la turbine après Design Study. Certifié NSF 61, léger (9,95 g), compatible impression 3D.
PFA	Projet de Fin d'Année	Intitulé du présent projet, réalisé en fin de 2 ^e année du cycle d'ingénieur GMSI.
PFE	Projet de Fin d'Études	Projet précédent (PFE) ayant abouti au premier prototype analysé et amélioré dans ce PFA.
PLA	Polylactic Acid	Polymère biodégradable testé comme matériau candidat pour la turbine (prototypage).
POM	Polyoxyméthylène (Acétal)	Polymère technique évalué pour la turbine. Faible frottement, bonne stabilité dimensionnelle, largement utilisé dans l'industrie des compteurs.
PVC	Polychlorure de Vinyle	Matériau de la turbine du prototype initial (référence). Limité en termes d'impression 3D.
Q3	Permanent Flow Rate	Débit permanent (2,5 m ³ /h pour DN15). Débit nominal de fonctionnement du compteur selon l'ISO 4064.
R	Ratio Q3/Q1	Dynamique de mesure. Objectif R=100 (Q1=25 L/h) pour garantir une mesure précise aux faibles débits.
SLA	Stereolithography	Stéréolithographie. Procédé d'impression 3D par photopolymérisation, envisagé en complément du FDM pour les pièces nécessitant une haute résolution.

Table 1 – suite de la liste des abréviations

Abréviation	Sigle	Définition / Contexte dans le projet
T50	Temperature Class 50	Classe de température ISO 4064 (0,1°C à 50°C). Validée par simulation thermique du guidage 4 H8/e7 jusqu'à 60°C.

Introduction générale

La gestion de l'eau constitue aujourd'hui un enjeu important, notamment dans un contexte de réduction des ressources disponibles. Dans ce cadre, les compteurs d'eau jouent un rôle essentiel dans la mesure et le suivi des consommations. L'intégration de systèmes de détection et de communication permet également de faire évoluer ces dispositifs vers des compteurs intelligents.

Ce projet de fin d'année (PFA) s'inscrit dans la continuité d'un précédent projet de fin d'études (PFE) consacré au développement d'un compteur d'eau multijet intelligent. Ce premier projet a abouti à la réalisation d'un prototype et à la définition d'une première conception du compteur.

La reprise de ce prototype dans le cadre du PFA a cependant présenté une contrainte importante : les fichiers CAO détaillés du projet précédent n'étaient pas disponibles sous une forme directement exploitable. Il a donc été nécessaire de reconstruire la géométrie du prototype à partir des éléments disponibles, notamment par rétro-ingénierie et par reconstruction CAO.

Cette reconstruction a ensuite permis d'analyser la conception existante et d'identifier certains écarts au niveau des dimensions et des géométries par rapport aux exigences applicables de la norme ISO 4064. Ces observations ont constitué le point de départ des travaux d'amélioration réalisés dans le cadre du PFA.

Le projet s'est ainsi orienté autour de plusieurs objectifs principaux :

- reconstruire et corriger la conception existante ;
- améliorer les principaux éléments mécaniques et le système de détection ;
- étudier le comportement hydraulique et mécanique par simulation ;
- comparer la nouvelle conception avec le prototype initial et aux exigences applicables de l'ISO 4064.

La démarche adoptée repose donc sur l'analyse du prototype existant, sa reconstruction, l'identification des problèmes, puis la reconception et l'optimisation des éléments concernés. Les résultats obtenus sont finalement évalués afin de déterminer les améliorations apportées et les points restant à valider expérimentalement.

Chapitre 1

Présentation de l'organisme d'accueil

1.1 Introduction

Ce chapitre présente brièvement l'environnement dans lequel le projet de fin d'année a été réalisé, ainsi que la structure d'accueil et le département impliqué dans le projet.

1.2 Université Mohammed VI Polytechnique

L'Université Mohammed VI Polytechnique (UM6P) est une institution d'enseignement supérieur et de recherche située à Benguerir, au Maroc. Elle s'appuie sur une forte orientation vers l'innovation, la recherche appliquée et le développement de solutions répondant aux besoins industriels.



Figure 1.1 – *Logo de l'UM6P*

1.3 Fondation MAScIR

La Fondation MAScIR (*Moroccan Foundation for Advanced Science, Innovation and Research*) est un organisme de recherche orienté vers le développement de technologies innovantes. Ses activités couvrent notamment les domaines des matériaux avancés, de la biotechnologie, de la microélectronique et des technologies numériques.



Figure 1.2 – Logo de MAScIR

1.4 Département D&MSD

Le projet a été réalisé au sein du département **Digitalization & Microelectronics Smart Devices (D&MSD)**. Ce département mène des activités de recherche et développement autour des capteurs, des systèmes embarqués, de l'IoT et des solutions intelligentes destinées à différents secteurs industriels.

Dans le cadre de ce projet, l'environnement de travail a notamment permis d'utiliser des outils de conception et de simulation nécessaires au développement du compteur d'eau multijet intelligent.

1.5 Lien avec le projet

Le projet s'inscrit dans les activités de recherche appliquée du département, notamment dans le domaine des systèmes de mesure intelligents. Les compétences et les moyens disponibles au sein du département ont permis de réaliser les travaux de reconstruction, de conception, de simulation et d'optimisation présentés dans la suite de ce rapport.

1.6 Conclusion

L'environnement de l'UM6P et de la Fondation MAScIR a fourni un cadre adapté à la réalisation de ce projet. L'intégration au département D&MSD a permis de bénéficier des compétences et des moyens nécessaires au développement et à l'amélioration du compteur d'eau multijet intelligent.

Chapitre 2

Analyse du prototype initial

2.1 Introduction

Le présent PFA s'inscrit dans la continuité d'un PFE ayant abouti à un premier prototype de compteur d'eau multijet intelligent. L'analyse de ce prototype constitue le point de départ de la présente étude.

L'objectif est d'identifier les principales limites de la conception initiale au niveau de la CAO, des matériaux, des simulations et de la prise en compte des exigences applicables.

2.2 Présentation du prototype initial

Le prototype initial repose sur une architecture multijet comprenant principalement une cartouche hydraulique, un distributeur, une turbine, un arbre de transmission et un système de détection magnétique.

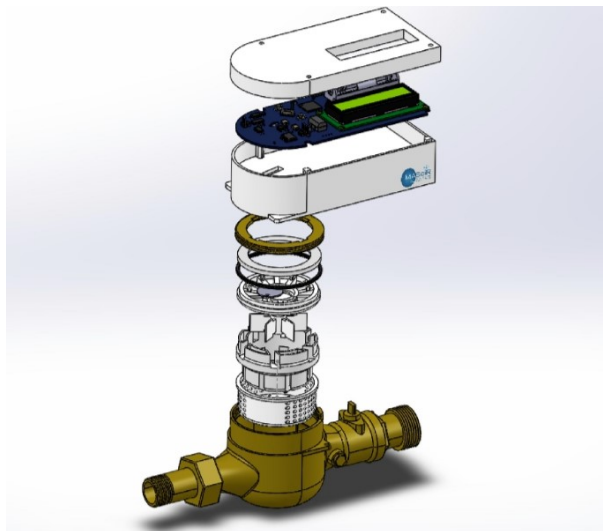


Figure 2.1 – *Architecture interne du prototype initial*

Le principe de fonctionnement repose sur l'entraînement de la turbine par les jets d'eau, dont la rotation est ensuite exploitée pour assurer le comptage.

2.3 Analyse de la conception et des références normatives

L'analyse du prototype initial met en évidence une conception qui n'a pas été établie à partir d'une référence industrielle précise, d'un benchmarking structuré ou d'un référentiel normatif clairement défini. Les principales dimensions et géométries du compteur ont ainsi été définies sans pouvoir être systématiquement reliées à une solution existante ou à une exigence normalisée.

Cette absence de base de conception concerne notamment l'architecture interne, la cartouche, le distributeur, les injecteurs, la turbine ainsi que les différentes interfaces fonctionnelles.

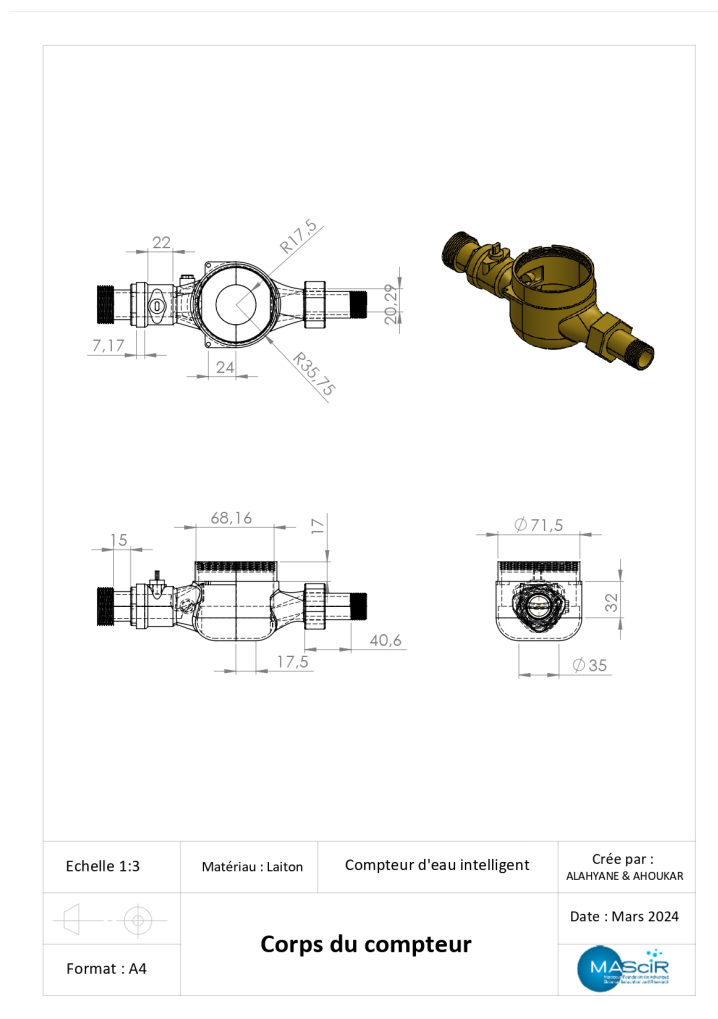


Figure 2.2 – Analyse dimensionnelle du prototype initial

Afin d'évaluer la cohérence de la conception, une analyse dimensionnelle et géométrique a été réalisée à partir des exigences applicables de l'ISO 4064 [?]. Cette vérification a permis de mettre en évidence plusieurs caractéristiques du prototype nécessitant une réévaluation.

Table 2.1 – *Principales limites identifiées dans la conception initiale*

Élément	Constat
Référence de conception	Absence de modèle industriel ou de configuration de référence clairement définie
Benchmarking	Absence de comparaison structurée avec des compteurs multijets existants
Géométrie	Dimensions et formes non systématiquement justifiées par des exigences fonctionnelles ou normatives
Dimensions	Plusieurs caractéristiques nécessitant une vérification par rapport aux exigences applicables
Architecture interne	Choix géométriques non systématiquement reliés à une référence existante ou normative
Conformité	Absence d'une démarche initiale de vérification par rapport à l'ISO 4064

Ainsi, la principale limite identifiée ne concerne pas uniquement certaines dimensions, mais l'absence d'une base de référence permettant de justifier et de vérifier les choix de conception. Cette analyse constitue le point de départ de la reprise de la conception dans le cadre du présent PFA.

2.4 Choix des matériaux

Le prototype initial ne présente pas de démarche suffisamment détaillée de sélection et de justification des matériaux.

Le choix des matériaux constitue ainsi un paramètre de conception à réévaluer.

Table 2.2 – *Limites relatives au choix des matériaux*

Critère	Constat
Propriétés mécaniques	Justification insuffisamment détaillée
Contact avec l'eau	Critère à intégrer dans le choix du matériau
Usure / frottement	Critère non suffisamment documenté
Fabrication	Compatibilité à justifier selon le procédé utilisé
Simulation FEA	Propriétés mécaniques nécessaires à définir et justifier

2.5 Analyse des simulations numériques

Des simulations numériques ont été réalisées dans le cadre du PFE afin d'étudier le comportement mécanique et hydraulique du prototype. L'analyse des conditions utilisées met toutefois en évidence plusieurs limites dans la définition des cas de simulation et dans le lien entre les analyses CFD et FEA.

2.5.1 Analyse de l'étude FEA

L'analyse FEA de la turbine a été réalisée en imposant notamment une vitesse de rotation au niveau de la pièce. La vitesse de rotation a été déterminée à partir d'une vitesse maximale de déplacement de l'eau de $V_{\text{déplacement}} = 9 \text{ m/s}$ et d'un rayon de turbine $R = 21.52 \text{ mm}$:

$$\omega = \frac{V_{\text{déplacement}}}{R} \quad (2.1)$$

ce qui conduit à :

$$\omega = \frac{9}{21.52 \times 10^{-3}} \simeq 418 \text{ rad/s} \quad (2.2)$$

Cette valeur a ensuite été utilisée comme condition de rotation dans l'analyse mécanique.

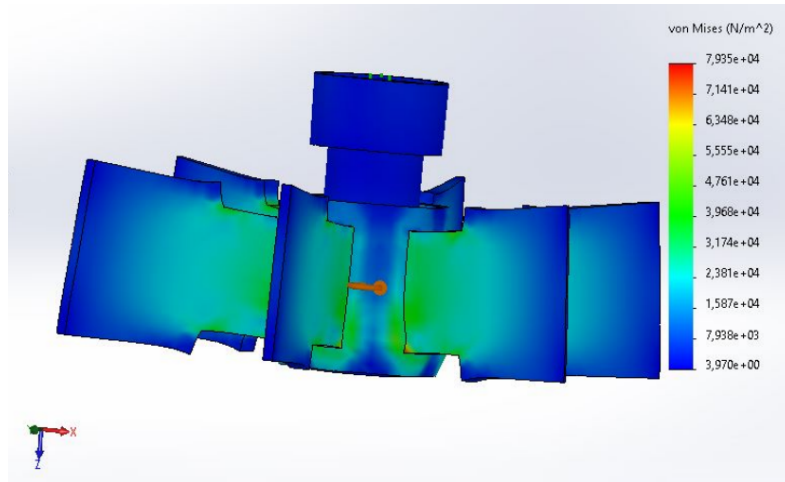


Figure 2.3 – Définition des conditions limites utilisées dans l'analyse FEA du PFE

Table 2.3 – Conditions utilisées pour l'analyse FEA du PFE

Paramètre	Valeur utilisée
Vitesse de déplacement de l'eau	9 m/s
Rayon de la turbine	21.52 mm
Vitesse de rotation imposée	≈ 418 rad/s
Condition principale	Rotation imposée au niveau de la turbine

Cependant, l'analyse du PFE ne montre pas de démarche permettant de relier explicitement ces valeurs au domaine réel de fonctionnement du compteur. En particulier, la valeur de 9 m/s est utilisée comme vitesse maximale de déplacement de l'eau, sans qu'une étude des différents régimes de débit du compteur soit présentée.

La vitesse de rotation de 418 rad/s constitue ainsi une condition imposée au modèle FEA, mais son lien avec une vitesse réelle de rotation de la turbine obtenue dans les différentes conditions hydrauliques n'est pas établi.

2.5.2 Limites liées aux conditions de fonctionnement

L'analyse des conditions utilisées permet d'identifier les principales limites suivantes :

Table 2.4 – *Limites identifiées dans la définition des conditions de simulation*

Élément	Limite identifiée
Vitesse d'écoulement	Valeur de 9 m/s utilisée comme condition maximale sans étude présentée du domaine complet de fonctionnement
Vitesse de rotation	Valeur de 418 rad/s imposée à partir de la vitesse d'écoulement, sans caractérisation préalable de la rotation réelle de la turbine
Débit minimal	Absence d'une étude spécifique du comportement de la turbine aux faibles débits
Débit maximal	Absence d'une étude structurée du comportement aux conditions maximales admissibles
Sollicitations hydrauliques	Les efforts générés par l'écoulement ne sont pas explicitement déterminés avant leur utilisation dans l'analyse mécanique
Conditions de fonctionnement	Absence de définition systématique d'un ensemble de points de fonctionnement représentatifs

2.5.3 Lien entre CFD et FEA

La définition des conditions mécaniques devrait être directement liée aux conditions hydrauliques étudiées. Dans une démarche de validation plus structurée, les conditions de fonctionnement doivent d'abord être définies, puis l'étude CFD permet de caractériser l'écoulement et les efforts exercés sur la turbine. Ces sollicitations peuvent ensuite être utilisées comme données d'entrée de l'analyse FEA.

La chaîne de simulation peut ainsi être représentée par :

Conditions de fonctionnement(standard) → CFD → Efforts hydrauliques → FEA → Contraintes

Dans le PFE, la turbine est directement soumise à une vitesse de rotation imposée de 418 rad/s, calculée à partir de la valeur de 9 m/s. L'étude ne présente cependant pas une caractérisation systématique des efforts hydrauliques associés aux différents débits de fonctionnement avant l'analyse mécanique.

La limite identifiée concerne donc principalement la définition et la justification des conditions d'entrée, plutôt que l'utilisation de l'outil FEA lui-même.

2.6 Synthèse des limites du prototype initial

L'analyse du prototype initial met en évidence plusieurs limites liées à la fois à la définition de la conception et à la démarche de simulation. Ces limites sont principalement liées à l'absence d'une référence de conception claire, d'un benchmarking structuré et d'une démarche de validation systématique basée sur les exigences applicables.

Table 2.5 – *Synthèse des principales limites du prototype initial*

Domaine	Limite identifiée
Référence de conception	Absence d'une référence industrielle ou d'une configuration clairement définie comme base de conception
Benchmarking	Absence de comparaison structurée avec des compteurs multijets existants
CAO	Dimensions et géométries non systématiquement justifiées par une référence industrielle ou normative
Normes	Absence d'une démarche initiale reliant la conception aux exigences applicables de l'ISO 4064
Matériaux	Choix des matériaux insuffisamment documenté et justifié
CFD	Absence d'une étude systématique du domaine de fonctionnement, notamment aux différents niveaux de débit
FEA	Conditions de chargement insuffisamment reliées aux sollicitations hydrauliques réelles
Chaînage CFD-FEA	Efforts hydrauliques non déterminés puis transférés de manière systématique de la CFD vers la FEA
Méthodologie	Absence d'une chaîne complète reliant références, exigences, conception, simulation et validation

Ces limites définissent les principaux axes de reprise du prototype dans le cadre du présent PFA. La démarche adoptée consiste ainsi à établir une base de conception et

de fonctionnement, à vérifier les caractéristiques géométriques par rapport aux exigences applicables, puis à définir les conditions hydrauliques avant d'évaluer les sollicitations mécaniques de la turbine.

2.7 Conclusion

L'analyse du prototype initial met en évidence des limites principalement liées à la justification de la conception. Les dimensions, les matériaux et les paramètres de simulation ne sont pas systématiquement reliés à un benchmarking et aux exigences applicables au compteur DN15.

Ces constats constituent la base de la démarche de reprise et d'amélioration développée dans le présent PFA.

Chapitre 3

DMADV – DEFINE : Définition du problème et des objectifs

3.1 Introduction

La méthode **DMADV** (*Define, Measure, Analyze, Design, Verify*) est une démarche rigoureuse issue du Six Sigma, spécialement adaptée à la conception ou à la reconception de produits soumis à des exigences métrologiques et industrielles strictes.

Dans le cadre de ce projet, cette démarche est appliquée à la **reconception et à l’optimisation d’un compteur d’eau multijet intelligent**. La première phase, **DEFINE**, fixe le cadre méthodologique, formule explicitement la problématique technique, identifie le cadre normatif (norme ISO 4064 [2]) et définit le cahier des charges opérationnel ainsi que les indicateurs clés de performance (KPI) pour l’évaluation du projet.

3.2 Problématique et Périmètre de l’Étude

Le projet s’inscrit dans la continuité des travaux de développement d’un premier prototype de compteur d’eau multijet. Bien que fonctionnelle, la géométrie initiale présentait des limites de performance et certains choix de dimensionnement manquaient de justification théorique et numérique rigoureuse.

La reconception globale couvre le corps du compteur, le dimensionnement hydrodynamique du rotor, la sélection des matériaux polymères ainsi que le système d’acquisition métrologique.

La problématique centrale du projet est formulée comme suit :

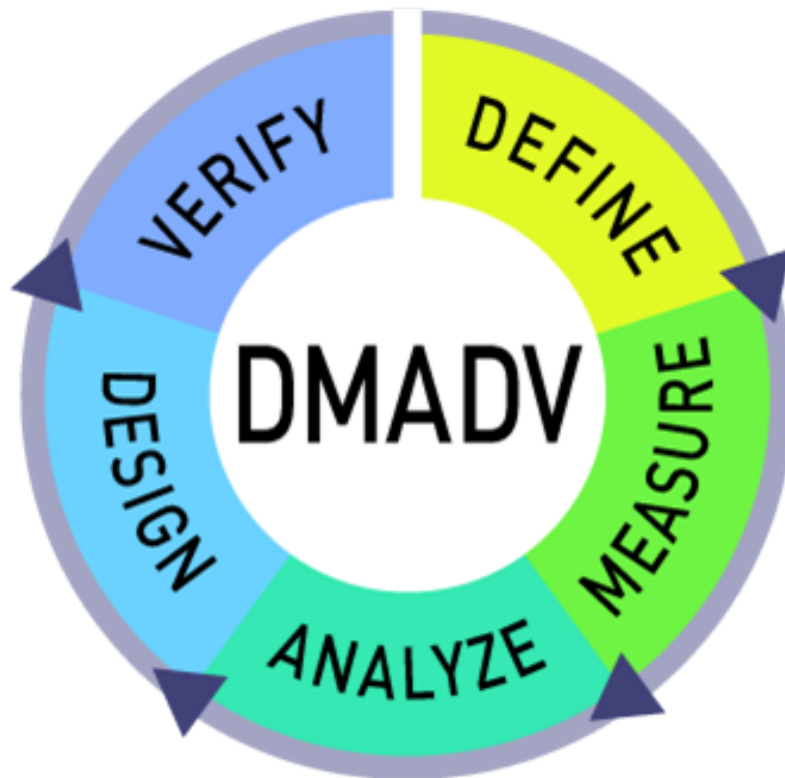


Figure 3.1 – Les cinq phases de la démarche DMADV appliquée au compteur d'eau.

Comment optimiser la conception géométrique et matérielle d'un compteur d'eau multijet afin d'en améliorer la sensibilité aux faibles débits, d'assurer sa tenue mécanique sous pression normée, et d'intégrer un système de détection haute résolution, tout en garantissant la conformité à la norme ISO 4064 [2] ?

3.3 Objectifs Spécifiques du Projet

Afin de répondre à la problématique, les objectifs techniques et industriels du projet sont déclinés comme suit :

- **Analyse normative** : S'appuyer sur la norme internationale ISO 4064-1 [2] afin d'établir un cadre rigoureux d'évaluation métrologique et mécanique.
- **Définition du calibre** : Justifier le choix du calibre nominal (DN15) en adéquation avec les usages résidentiels standard.
- **Audit et fiabilisation CAO** : Référencer et corriger le modèle 3D du prototype initial afin de constituer une base géométrique de référence (*Baseline*).
- **Optimisation rotorique** : Réduire la masse et le moment d'inertie du rotor pour diminuer le débit de démarrage (Q_{start}) et améliorer la réactivité hydraulique.

- **Amélioration du système de détection** : Remplacer le système initial à interrupteur Reed par une détection à effet Hall multi-aimants afin de découpler la résolution temporelle et spatiale de la mesure.
- **Choix des matériaux** : Sélectionner des polymères légers, non corrosifs et adaptés à la fabrication additive (FDM/SLA) et au contact avec l'eau potable (ex. ABS / POM).
- **Validation numérique (CFD/FEA)** : Simuler le comportement fluide-structure (perte de charge, couple hydraulique, contraintes de Von Mises) sous SolidWorks Flow Simulation et ANSYS Fluent.

3.4 Analyse des Références Normatives et Choix du Calibre

Afin d'éviter tout dimensionnement arbitraire, la caractérisation du compteur s'appuie sur une étude comparative des calibres industriels normalisés (DN15, DN20, DN25, etc.) selon la norme **ISO 4064-1** [2].

MKMJP - TECHNICAL DATA

Size	DN	mm in	15 (1/2")	20 (3/4")	25 (1")	32 (1 1/4")	40 (1 1/2")	50 (2")
	Overload flow rate Q ₄	m ³ /h	3,125	5	7,875	12,5	20	31,25
	Permanent flow rate Q ₃	m ³ /h	2,5	4	6,3	10	16	25
R ≡ 100 H	Transitional flow rate Q ₂	l/h	40	64	100,8	160	256	400
	Min flow rate Q ₁	l/h	25	40	63	100	160	250
R ≡ 160 H	Transitional Flow rate Q ₂	l/h	25	40	63	100	160	250
	Min flow rate Q ₁	l/h	15,63	25	39,38	62,5	100	156,25
	Sensitivity	l/h	6	6	10	10	20	20
	Min reading	l	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	Max reading	m ³	99.999	99.999	99.999	99.999	999.999	999.999
	Max admissible pressure	bar	16	16	16	16	16	16

Figure 3.2 – Identification des calibres normalisés à partir des références industrielles [1].

L'analyse de la demande résidentielle et des standards de distribution d'eau potable a conduit à retenir le calibre **DN15** (diamètre nominal de 15 mm). Ce calibre correspond au standard le plus déployé pour le comptage individuel. Il sert de contrainte géométrique d'entrée pour le dimensionnement des tubulures d'entrée/sortie, du bol et de la chambre d'injection du compteur.

3.4.1 Exigences de la Norme ISO 4064-1

La norme **ISO 4064-1** [2] fixe les exigences métrologiques et techniques applicables aux compteurs d'eau potable. Les principaux critères d'encadrement retenus concernent :

1. **Le débit permanent (Q_3)** : Débit auquel le compteur doit fonctionner de manière satisfaisante dans des conditions normales d'utilisation. Pour un calibre DN15, la valeur standard retenue est $Q_3 = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$.
2. **La dynamique de mesure ($R = Q_3/Q_1$)** : Un rapport $R = 100$ est visé, garantissant une mesure précise dès les faibles débits ($Q_1 = 25 \text{ L/h}$).
3. **La perte de charge (Δp)** : La perte de charge maximale à Q_3 doit être contenue sous la classe $\Delta p63$ ($\Delta p \leq 0,63 \text{ bar}$).
4. **La pression maximale admissible (MAP)** : Le corps du compteur doit supporter une pression nominale de 16 bar sans déformation plastique ni fuite (norme MAP16).
5. **La classe de température** : Référence T50 (température d'eau comprise entre $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ et $50 \text{ }^\circ\text{C}$).

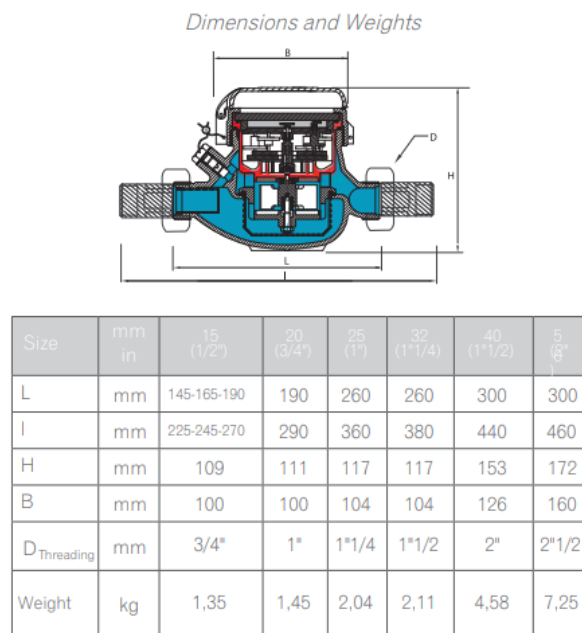


Figure 3.3 – Caractéristiques dimensionnelles et enveloppe de masse d'un compteur DN15 de référence [1].

4.2.4 Meter temperature classes

The meters fall under water temperature classes corresponding to the various ranges, chosen by the manufacturer from the values given in [Table 1](#).

The water temperature shall be measured at the inlet of the meter.

Table 1 — Meter temperature classes

Class	mAT °C	MAT °C
T30	0,1	30
T50	0,1	50
T70	0,1	70
T90	0,1	90
T130	0,1	130
T180	0,1	180
T30/70	30	70
T30/90	30	90
T30/130	30	130
T30/180	30	180

Figure 3.4 – *Classes de température pour compteurs d'eau potable selon l'ISO 4064-1 [2].*

Table 4 — Pressure-loss classes

Class	Maximum pressure loss	
	MPa	bar
Δp 63	0,063	0,63
Δp 40	0,040	0,40
Δp 25	0,025	0,25
Δp 16	0,016	0,16
Δp 10	0,010	0,10

Figure 3.5 – *Classes de perte de charge admissibles selon l'ISO 4064-1 [2].*

3.4.2 Synthèse du Cahier des Charges (Exigences de Conception)

Le tableau 3.1 résume les exigences cibles validées lors de cette phase **DEFINE**.

Table 3.1 – *Synthèse des exigences de conception du compteur multijet DN15.*

Paramètre Métrolo- gique / Technique	Valeur Cible	Référence / Norme
Calibre nominal	DN15 (15 mm)	Standard résidentiel ISO 4064 [2]
Débit permanent (Q_3)	2,5 m ³ /h	ISO 4064-1 / Cahier des charges
Rapport de dynamique ($R = Q_3/Q_1$)	$R100$ ($Q_1 = 25$ L/h)	Exigence métrologique cible
Pression maximale admissible	MAP16 (16 bar)	ISO 4064-1 [2]
Classe de perte de charge	$\Delta p63$ ($\leq 0,63$ bar)	ISO 4064-1 [2]
Classe de température	$T50$ (0,1 °C à 50 °C)	ISO 4064-1 [2]
Principe de détection	Capteur effet Hall + 4 aimants	Choix d'ingénierie (Haute résolution)

3.5 Matrice des Critères d'Évaluation de la Reconception

Pour évaluer objectivement les gains apportés par la reconception par rapport au prototype de départ (*Baseline*), une matrice d'indicateurs de performance a été établie. Ces grandeurs seront mesurées numériquement et théoriquement lors de la phase **MEASURE**, puis optimisées lors des phases **ANALYZE** et **DESIGN**.

3.6 Conclusion du Chapitre

La phase **DEFINE** a permis de fixer rigoureusement le cadre du projet. Le choix d'un calibre **DN15** conforme à la norme **ISO 4064-1** [2] et la précision des exigences métrologiques (classe $\Delta p63$, pression MAP16, résolution par effet Hall) constituent les données d'entrée consolidées. La phase suivante, **MEASURE**, s'attachera à quantifier précisément les caractéristiques géométriques, mécaniques et hydrodynamiques de la solution initiale.

Table 3.2 – *Critères et indicateurs d'évaluation de la reconception.*

Indicateur de Performance	État Initial (Baseline)	Objectif de Reconception
Masse du rotor	À caractériser (Phase MEASURE)	Réduction d'au moins 15 % (optimisation topologique)
Moment d'inertie (I_z)	À caractériser (Phase MEASURE)	Réduction maximale pour minimiser la traînée d'inertie
Débit de démarrage (Q_{start})	Élevé (estimation initiale)	Diminution significative pour améliorer la sensibilité
Résolution de détection	1 impulsion / tour (Reed)	4 impulsions / tour (Effet Hall + 4 aimants)
Contrainte max. Von Mises	À évaluer sous 16 bar	$\sigma_{\text{max}} < \sigma_{\text{adm}}$ (Coefficient de sécurité $S > 2$)
Perte de charge (Δp à Q_3)	À caractériser (Phase MEASURE)	Respect strict de la classe Δp_{63} ($\leq 0,63$ bar)
Écoulement hydrodynamique	Vorticité observée au moyeu	Uniformisation des jets d'injection et réduction des turbulences

Chapitre 4

DMADV — MEASURE : Caractérisation de la conception de référence

4.1 Introduction

La phase **MEASURE** de la démarche DMADV a pour objectif de caractériser quantitativement la conception de référence retenue pour le projet. Elle permet ainsi d'établir une *baseline* à partir de laquelle les performances et les évolutions de conception pourront être évaluées dans les phases suivantes.

Dans le cadre de ce travail, la conception de référence correspond au modèle CAO du compteur d'eau multijet DN15 reconstruit à partir de l'architecture étudiée précédemment. Cette reconstruction constitue l'état initial du système avant l'introduction des modifications de conception étudiées dans le présent projet.

La caractérisation porte principalement sur :

- la géométrie et les propriétés physiques du rotor ;
- la configuration du système de détection ;
- la résolution volumique associée à la détection ;
- les conditions de fonctionnement hydraulique ;
- les grandeurs hydrauliques obtenues par simulation numérique et étude paramétrique.

Les valeurs obtenues constituent ainsi la référence quantitative du projet. Elles seront exploitées lors de la phase **ANALYZE** afin d'identifier les écarts par rapport aux exigences, d'étudier les paramètres critiques et de définir les axes d'amélioration.

4.2 Conception de référence

La conception de référence correspond au modèle CAO du compteur d'eau multijet de calibre DN15 utilisé comme état initial de l'étude.

L'architecture générale est issue du prototype étudié dans le cadre du PFE précédent. Toutefois, le modèle a été reconstruit et préparé dans le présent projet afin de disposer d'une géométrie exploitable pour les analyses ultérieures et de définir une base commune de comparaison entre les différentes configurations.

4.2.1 Architecture générale

Le compteur de référence est constitué principalement des éléments suivants :

- un corps de compteur ;
- une cartouche hydraulique ;
- un distributeur périphérique ;
- une turbine multijet ;
- un arbre de rotation ;
- un porte-aimants ;
- un système de détection magnétique ;
- des éléments d'étanchéité.

La figure 4.1 présente le modèle CAO de référence ainsi que l'architecture générale des principaux composants internes.

4.2.2 Caractéristiques géométriques et physiques

Les principales caractéristiques géométriques et physiques du modèle de référence ont été extraites directement du modèle CAO.

Ces caractéristiques constituent les paramètres géométriques et physiques de référence du rotor. Elles seront utilisées pour comparer les différentes configurations étudiées dans la suite du projet.

4.3 Caractérisation du système de mesure

Le système de mesure permet de convertir la rotation de la turbine en un signal électrique exploitable pour déterminer le volume d'eau écoulé.

Le prototype étudié précédemment reposait sur un interrupteur Reed. Dans le présent projet, cette architecture est remplacée par une détection magnétique à effet Hall afin de disposer d'une configuration adaptée au nouveau prototype.

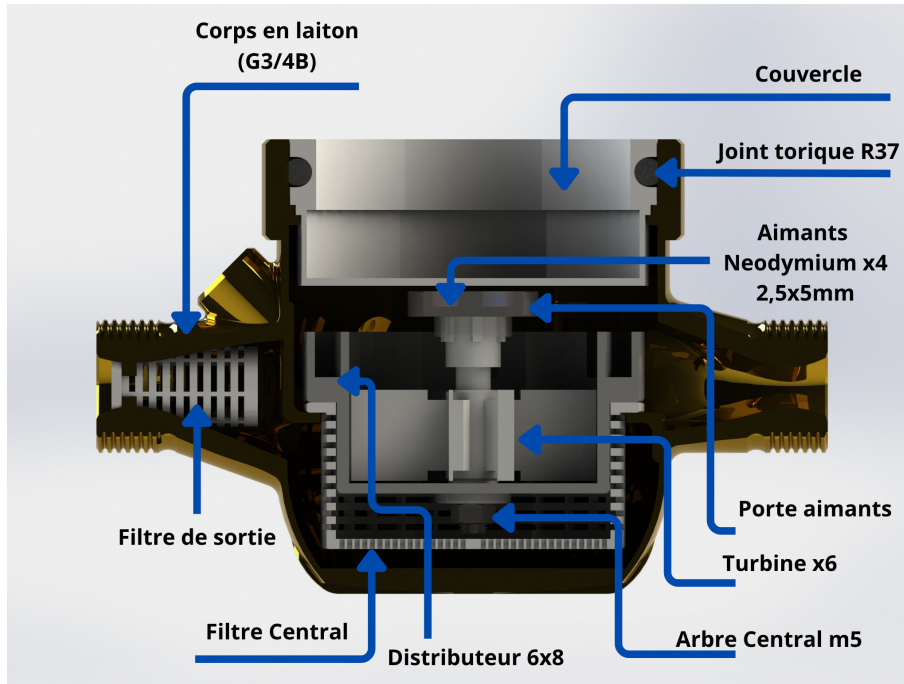


Figure 4.1 – *Modèle CAO de référence du compteur DN15*

Table 4.1 – *Caractéristiques géométriques et physiques de la conception de référence*

Paramètre	Valeur	Source
Calibre nominal	DN15	Spécification
Raccordement	G3/4B	Spécification
Diamètre extérieur maximal	74,5 mm	CAO
Diamètre extérieur de la turbine	43,04 mm	CAO
Rayon extérieur de la turbine	21,52 mm	CAO
Nombre de pales	6	CAO
Nombre d'injecteurs	6	CAO
Masse du rotor	23,61 g	CAO
Moment d'inertie I_{yy}	4050,68 g·mm ²	CAO
Rayon moyen d'impact	16,00 mm	CAO

4.3.1 Configuration initiale de détection

La configuration initiale retenue dans le cadre du présent projet repose sur un **capteur à effet Hall** associé à **quatre aimants** répartis sur le porte-aimants.

Le choix initial de quatre aimants vise à augmenter le nombre d'événements de détection au cours d'une révolution complète de la turbine. En supposant que chaque passage d'un aimant devant le capteur génère une impulsion, quatre impulsions sont alors obtenues par révolution :

$$N_{\text{imp/tour}} = 4 \quad (4.1)$$

Cette configuration constitue la référence initiale du système de détection. Son influence sur la résolution métrologique et sur les performances globales du système sera analysée dans les phases **ANALYZE** et **DESIGN**.

Table 4.2 – *Caractéristiques initiales du système de détection*

Paramètre	Valeur	Source
Technologie de détection	Capteur Hall	Choix PFA
Nombre d'aimants	4	Configuration initiale
Nombre d'impulsions par tour	4	Configuration initiale

4.3.2 Résolution volumique

Le volume associé à chaque impulsion dépend du volume déplacé par une révolution complète de la turbine et du nombre d'impulsions générées par révolution.

Le volume déplacé par une révolution est donné par :

$$V_{\text{tour}} = 42\,736,46 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \quad (4.2)$$

Avec quatre impulsions par révolution, le volume associé à une impulsion est :

$$V_{\text{imp}} = \frac{V_{\text{tour}}}{N_{\text{imp/tour}}} \quad (4.3)$$

Ainsi :

$$V_{\text{imp}} = \frac{42\,736,46 \times 10^{-9}}{4} \approx 10,684 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (4.4)$$

soit encore :

$$\boxed{V_{\text{imp}} \approx 0,01068 \text{ L/impulsion}} \quad (4.5)$$

Cette valeur représente la résolution volumique théorique associée à la configuration initiale de quatre aimants.

La relation entre le débit volumique et la fréquence des impulsions peut alors être exprimée par :

$$Q = f \cdot V_{\text{imp}} \implies f = \frac{Q}{V_{\text{imp}}} \quad (4.6)$$

où Q représente le débit volumique, f la fréquence des impulsions et V_{imp} le volume associé à une impulsion.

Au débit nominal $Q_3 = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$, soit :

$$Q_3 = 41,67 \text{ L/min} = 0,6944 \text{ L/s} \quad (4.7)$$

la fréquence théorique correspondante est :

$$f_{Q_3} = \frac{0,6944}{0,01068} \approx 65,0 \text{ Hz} \quad (4.8)$$

Ainsi, la configuration initiale conduit théoriquement à environ 65 impulsions par seconde au débit nominal.

4.4 Caractérisation hydraulique de référence

La caractérisation hydraulique permet d'établir le comportement de la conception de référence sur plusieurs conditions de fonctionnement.

L'étude ne se limite pas au débit nominal. Trois points de fonctionnement représentatifs ont été retenus afin d'observer l'évolution du comportement hydraulique de la turbine selon le débit.

4.4.1 Conditions de fonctionnement

Les conditions considérées pour la caractérisation numérique sont regroupées dans le tableau suivant.

Ces trois conditions permettent de caractériser le comportement du compteur depuis les faibles débits jusqu'à un régime de débit élevé.

Table 4.3 – *Points de fonctionnement étudiés pour la conception de référence*

Point de fonctionnement	Débit	Domaine étudié
Débit minimal	0,017 m ³ /h	Faible débit
Débit nominal Q_3	2,5 m ³ /h	Régime nominal
Débit élevé	3,5 m ³ /h	Régime élevé

4.5 Caractérisation CFD de la conception de référence

Afin d’obtenir une caractérisation quantitative du comportement hydraulique, une étude CFD de la conception de référence a été réalisée.

Deux outils de simulation ont été considérés :

- *SolidWorks Flow Simulation*, utilisé pour la caractérisation hydraulique du modèle CAO ;
- *ANSYS Fluent*, utilisé comme outil de simulation numérique complémentaire.

Cette double approche permet de disposer de résultats de référence provenant de deux environnements numériques différents. Les éventuelles différences entre les résultats seront étudiées dans la phase **ANALYZE**.

4.5.1 Configuration numérique

La simulation hydraulique repose sur la géométrie CAO de référence et sur les conditions de fonctionnement définies précédemment.

Les principales conditions retenues sont :

- fluide : eau liquide ;
- géométrie : modèle CAO de référence ;
- débit d’entrée variable selon le point de fonctionnement ;
- pression de sortie : 1 bar ;
- modèle de turbulence : $k - \varepsilon$.

L’objectif de cette caractérisation est d’extraire les grandeurs hydrodynamiques nécessaires à l’établissement de la *baseline*, notamment :

- le couple hydraulique exercé sur la turbine ;
- les champs de pression ;
- les champs de vitesse ;

- les pertes de charge ;
- les zones présentant des comportements hydrodynamiques particuliers.

4.5.2 Étude paramétrique en fonction du débit d'entrée

Afin de caractériser la réponse dynamique et hydraulique du compteur sur l'ensemble de sa plage d'utilisation, une **étude paramétrique** a été menée en prenant le **débit d'entrée** (Q) comme variable d'entrée principale.

Cette démarche paramétrique permet de balayer de manière continue le domaine de fonctionnement allant du débit minimal ($0,017 \text{ m}^3/\text{h}$) jusqu'au débit de surcharge ($3,5 \text{ m}^3/\text{h}$). Les deux environnements numériques (*SolidWorks Flow Simulation* et *ANSYS Fluent*) ont été configurés de façon paramétrique pour extraire la variation des grandeurs clés (couple hydraulique généré et pertes de charge) en fonction du débit injecté.

La figure 4.2 présente les courbes issues des deux logiciels montrant l'évolution des performances hydrauliques en fonction du débit d'entrée.

	Design Point 1	Design Point 2	Design Point 3
Volume flow rate (Inlet Volume Flow 1) [m^3/s]	0,000004722	0,0006944	0,0009722
SG Normal Force 1 [N]	1,13378E-05	0,14060512	0,269123166
SG Torque (Y) 4 [$\text{N}\cdot\text{m}$]	1,06183E-06	0,021275066	0,041576782

(a) *SolidWorks Flow Simulation*

Table de Points de calcul					
	A	B	C	D	E
1	Nom	P2 - Debit_dentree	P1 - moment-pales-op	☐ Conserver	Données conservées
2	Unités	kg s^{-1}	J		
3	DP 0 (Courant)	0,6932	0,0015637	☒	✓
4	DP 1	0,97045	0,002972	☐	
5	DP 2	0,004713	3,5934E-06	☐	
*				☐	

(b) *ANSYS Fluent*

Figure 4.2 – Étude paramétrique de la conception de référence en fonction du débit d'entrée

4.5.3 Couple hydraulique de référence

Le couple exercé par l'écoulement sur la turbine constitue une grandeur essentielle pour caractériser la capacité de l'écoulement à entraîner le rotor.

Les valeurs obtenues avec les deux outils numériques pour les points caractéristiques de l'étude paramétrique sont regroupées dans le tableau suivant.

Table 4.4 – Couple hydraulique obtenu pour les différents points de fonctionnement

Débit	SolidWorks Flow Si- mulation	ANSYS Fluent
0,017 m ³ /h	$9,444 \times 10^{-7}$ N·m	$3,593 \times 10^{-6}$ N·m
2,5 m ³ /h	0,02453 N·m	0,00156 N·m
3,5 m ³ /h	0,04832 N·m	0,00297 N·m

Ces résultats montrent l'évolution du couple hydraulique avec le débit pour la conception de référence. L'écart constaté aux débits élevés provient essentiellement de la finesse de modélisation de la couche limite et du choix du modèle de turbulence (k - ω SST sous Fluent contre k - ϵ avec fonctions de paroi sous SolidWorks). Fluent résout avec plus de précision les décollements de veine d'eau au niveau des pales et les pertes par frottement, ce qui conduit à une estimation plus conservatrice du couple net. À très bas débit (0,017 m³/h), les deux codes confirment un ordre de grandeur cohérent avec un couple de démarrage extrêmement faible ($\sim 10^{-6}$ N·m). La comparaison détaillée entre les deux environnements ainsi que l'interprétation approfondie de ces écarts seront développées dans la phase **ANALYZE**.

4.5.4 Champs de pression

La distribution de pression dans le compteur constitue une seconde grandeur importante de la caractérisation hydraulique.

Elle permet notamment d'observer les variations de pression associées :

- aux passages d'entrée ;
- aux injecteurs ;
- à l'interaction entre les jets et la turbine ;
- aux différentes sections de passage de l'écoulement.

La distribution obtenue constitue une caractérisation de l'état hydraulique initial du compteur. L'analyse détaillée des gradients de pression et de leur influence sur les performances du système sera réalisée dans la phase **ANALYZE**.

4.5.5 Champs de vitesse

Les champs de vitesse permettent de caractériser la distribution de l'écoulement dans les différents passages hydrauliques et au voisinage de la turbine.

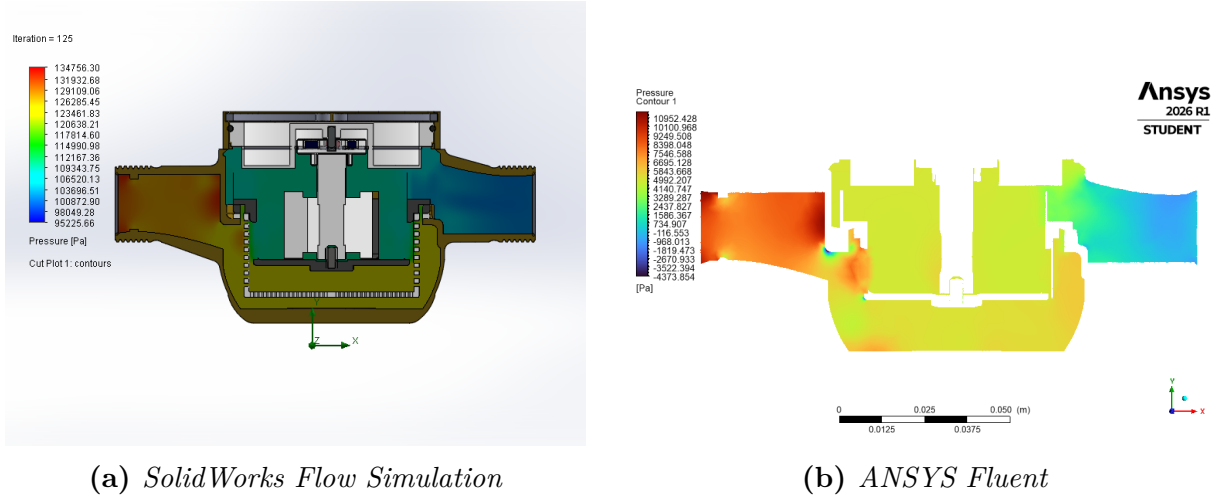


Figure 4.3 – Comparaison des distributions de pression obtenues par simulation CFD

Les simulations réalisées permettent notamment d’identifier les zones d’accélération de l’écoulement au niveau des injecteurs ainsi que les régions présentant des vitesses plus faibles.

Pour la conception de référence, les valeurs maximales relevées sont de l’ordre de :

$$v_{\max, \text{SW}} \approx 5,68 \text{ m/s} \quad (4.9)$$

pour *SolidWorks Flow Simulation*, et :

$$v_{\max, \text{ANSYS}} \approx 4,33 \text{ m/s} \quad (4.10)$$

pour *ANSYS Fluent*.

Ces valeurs constituent des indicateurs de référence pour l’étude de la distribution des vitesses dans la conception initiale.

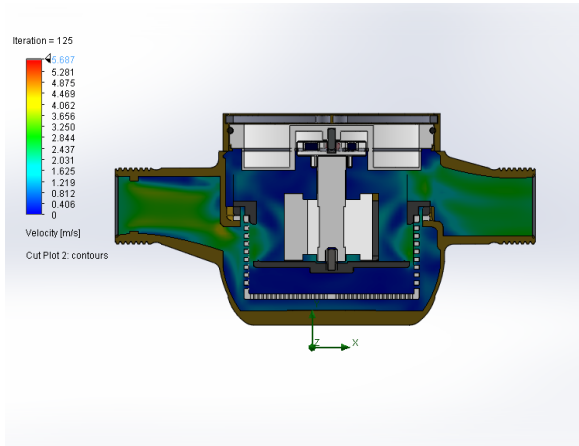
4.5.6 Synthèse des grandeurs CFD

Les principales grandeurs obtenues lors de la caractérisation CFD sont regroupées dans le tableau suivant.

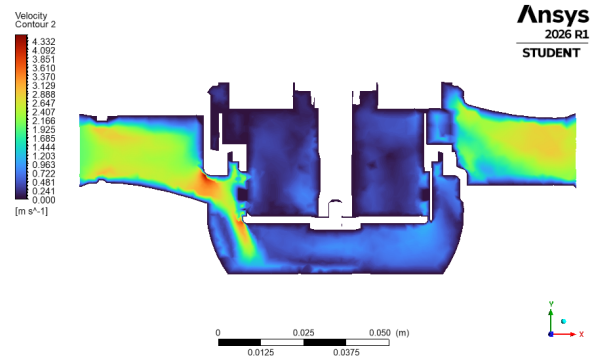
Ces résultats complètent la caractérisation géométrique et fonctionnelle de la conception de référence.

4.6 Synthèse de la baseline

La phase **MEASURE** permet ainsi de définir une *baseline* regroupant les principales caractéristiques géométriques, physiques, métrologiques et hydrauliques de la conception



(a) SolidWorks Flow Simulation



(b) ANSYS Fluent

Figure 4.4 – Comparaison des distributions de vitesse obtenues par simulation CFD

Table 4.5 – Synthèse des grandeurs hydrauliques de référence

Grandeur	Valeur de référence	Méthode
Couple à $Q = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$	0,02453 N·m	SolidWorks
Couple à $Q = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$	0,00156 N·m	ANSYS Fluent
Couple à $Q = 3,5 \text{ m}^3/\text{h}$	0,04832 N·m	SolidWorks
Couple à $Q = 3,5 \text{ m}^3/\text{h}$	0,00297 N·m	ANSYS Fluent
Vitesse maximale	5,68 m/s	SolidWorks
Vitesse maximale	4,33 m/s	ANSYS Fluent

de référence.

Table 4.6 – Synthèse de la baseline de la conception de référence

Paramètre	Valeur	Source
Diamètre extérieur maximal	74,5 mm	CAO
Diamètre de la turbine	43,04 mm	CAO
Nombre de pales	6	CAO
Nombre d’injecteurs	6	CAO
Masse du rotor	23,61 g	CAO
Moment d’inertie I_{yy}	4050,68 g·mm ²	CAO
Nombre d’aimants	4	Configuration PFA
Impulsions par tour	4	Configuration PFA
Volume par impulsion	0,01068 L/impulsion	Calcul
Débit nominal Q_3	2,5 m ³ /h	DEFINE
Couple à Q_3 – SolidWorks	0,02453 N·m	CFD
Couple à Q_3 – ANSYS	0,00156 N·m	CFD
Vitesse maximale – Solid- Works	5,68 m/s	CFD
Vitesse maximale – ANSYS	4,33 m/s	CFD

4.7 Conclusion

La phase **MEASURE** a permis d’établir la caractérisation quantitative de la conception de référence du compteur d’eau multijet DN15.

La géométrie et les propriétés physiques du rotor ont été extraites du modèle CAO. La configuration initiale du système de mesure repose sur un capteur à effet Hall associé à quatre aimants, conduisant théoriquement à quatre impulsions par révolution. À partir du volume déplacé par une révolution de la turbine, cette configuration conduit à une résolution théorique de :

$$V_{\text{imp}} \approx 0,01068 \text{ L/impulsion} \quad (4.11)$$

La caractérisation hydraulique a ensuite été réalisée sur plusieurs conditions de fonctionnement à l’aide de simulations CFD, appuyée par une étude paramétrique ayant pour variable le débit d’entrée. Les résultats obtenus avec *SolidWorks Flow Simulation* et *AN-*

SYS Fluent fournissent une première caractérisation quantitative du couple hydraulique et des champs d'écoulement de la conception de référence.

Ces résultats constituent la *baseline* numérique du projet. La phase **ANALYZE** sera consacrée à leur interprétation, notamment à la comparaison critique des résultats obtenus avec les deux outils numériques, à l'identification des zones et paramètres critiques et à la détermination des sollicitations nécessaires aux analyses mécaniques ultérieures.

La phase **DESIGN** pourra ensuite s'appuyer sur cette caractérisation pour proposer et évaluer les nouvelles configurations géométriques et fonctionnelles.

Chapitre 5

DMADV — ANALYZE :

Analyse des écarts et identification des axes d'amélioration

5.1 Introduction

La phase **ANALYZE** de la démarche DMADV a pour objectif d'analyser les écarts entre la conception de référence, caractérisée dans la phase MEASURE, et les exigences définies dans la phase DEFINE. Cette analyse permet d'identifier les paramètres critiques, de comprendre les causes des écarts et de déterminer les axes d'amélioration à explorer dans la phase DESIGN.

L'analyse s'articule autour de plusieurs dimensions :

- la comparaison des performances de la conception de référence avec les exigences applicables ;
- l'analyse critique des résultats de simulation CFD et la validation des outils numériques ;
- l'identification des paramètres influençant le comportement du système ;
- l'étude des relations entre les grandeurs physiques et les performances métrologiques ;
- la définition des axes d'amélioration prioritaires.

5.2 Analyse des écarts par rapport aux exigences

La conception de référence a été caractérisée dans la phase MEASURE. Le tableau [5.1](#) confronte les valeurs obtenues aux exigences définies dans la phase DEFINE.

Deux écarts significatifs sont identifiés :

Table 5.1 — *Analyse des écarts — Conception de référence vs exigences*

Critère	Exigence	Valeur référence	Écart	Statut
Débit de démarrage (Q_{start})	≤ 30 L/h (Classe B)	34,6 L/h	+4,6 L/h	Écart significatif
Perte de charge (Δp)	$\leq 0,63$ bar	0,3 bar	-0,33 bar	Conforme
Pression maximale (MAP16)	16 bar	16 bar (FEA)	0 bar	Conforme
Résolution métrologique	À améliorer	0,01068 L/imp	—	Satisfaisante
Masse du rotor	< 20 g	23,61 g	+3,61 g	Écart modéré
Moment d'inertie (I_{yy})	À réduire	4050,68 g·mm ²	—	À améliorer

1. **Débit de démarrage** : la valeur de référence (34,6 L/h) est supérieure à l'exigence de la Classe B (30 L/h). Cet écart de +4,6 L/h indique que le rotor de référence est trop résistant à la mise en mouvement aux faibles débits.
2. **Masse du rotor** : la masse de référence (23,61 g) est supérieure à l'objectif fixé (< 20 g).

5.3 Analyse et justification des écarts de simulation CFD (SolidWorks vs ANSYS Fluent)

L'analyse comparative des résultats de simulation établis en phase MEASURE (Tableau 4.4) fait apparaître une divergence notable du couple hydraulique au fur et à mesure que le débit augmente, SolidWorks Flow Simulation fournissant des valeurs nettement supérieures à celles d'ANSYS Fluent aux débits $Q_3 = 2,5$ m³/h et $Q_4 = 3,5$ m³/h. Cet écart s'explique principalement par trois facteurs physiques et numériques :

1. **Modélisation de la couche limite et de la turbulence** : ANSYS Fluent utilise le modèle $k-\omega$ SST associé à un maillage très fin à la paroi ($y^+ \approx 1$). Cette approche résout précisément la sous-couche limite visqueuse, permettant de bien capturer les décollements de veine d'eau et les pertes par frottement sur les pales. À l'inverse, SolidWorks emploie le modèle $k-\epsilon$ combiné aux fonctions de paroi adaptatives (*Modified Wall Functions*), qui tend à surestimer le transfert de quantité de mouvement du jet

sur l'aube.

2. **Traitement de l'interface du domaine tournant** : Sous Fluent, la formulation du repère tournant (*Multiple Reference Frame* – MRF) applique une conservation stricte du moment cinétique à l'interface rotor/stator. L'approche de rotation de domaine globale de SolidWorks a tendance à générer une traînée visqueuse supplémentaire et à amplifier le couple moteur apparent.
3. **Comportement à très bas débit ($0,017 \text{ m}^3/\text{h}$)** : Aux faibles débits (régime proche du laminaire), les gradients de pression restent très faibles. Les deux solveurs convergent vers un ordre de grandeur très cohérent ($\sim 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{m}$), ce qui valide la tendance globale au démarrage.

Choix de la valeur de référence : Pour la suite de l'étude et le dimensionnement de la turbine, les résultats issus d'ANSYS Fluent sont retenus comme **valeurs conservatives de référence**. Choisir la valeur de couple la plus faible constitue une démarche d'ingénierie sécuritaire : si le rotor parvient à vaincre les frottements mécaniques sous le couple prédit par Fluent ($0,00156 \text{ N}\cdot\text{m}$ à Q_3), sa rotation sera garantie avec une marge accrue dans le compteur réel.

5.4 Analyse des paramètres influençant le débit de démarrage

Le débit de démarrage est l'un des indicateurs clés de performance d'un compteur d'eau. Il dépend de plusieurs paramètres physiques et géométriques.

5.4.1 Relation fondamentale

Le débit de démarrage théorique est donné par la relation :

$$Q_{\text{start}} = \sqrt{\frac{J_{\text{total}} \cdot A_{\text{tot}}}{\rho_{\text{eau}} \cdot R_{\text{moyen}}}} \quad (5.1)$$

Avec :

- J_{total} : moment d'inertie du rotor ($\text{g}\cdot\text{mm}^2$) ;
- A_{tot} : section totale des injecteurs (m^2) ;
- ρ_{eau} : masse volumique de l'eau (kg/m^3) ;
- R_{moyen} : rayon moyen d'impact des jets (mm).

Cette relation montre que le débit de démarrage est directement proportionnel à la racine carrée du moment d'inertie. Physiquement, à très faible débit, le couple hydraulique disponible est limité. Il doit vaincre les couples résistants (frottements) et fournir l'énergie

cinétique nécessaire à la mise en rotation du rotor. Une inertie importante pénalise donc directement le démarrage.

5.4.2 Analyse des leviers d'action

L'équation 5.1 met en évidence trois leviers principaux pour réduire le débit de démarrage :

Table 5.2 – *Leviers d'action pour la réduction du débit de démarrage*

Levier	Paramètre	Valeur référence	Action envisageable
1	Moment d'inertie (J_{total})	4050,68 g·mm ²	Réduire par allègement du rotor
2	Section des injecteurs (A_{tot})	$2,646 \times 10^{-4}$ m ²	À déterminer (géométrie fixe)
3	Rayon moyen d'impact (R_{moyen})	16,00 mm	Augmenter par modification géométrique

Parmi ces leviers, deux sont particulièrement pertinents :

1. **La réduction du moment d'inertie** : en allégeant le rotor (turbine + porte-aimants), on diminue la résistance à la mise en mouvement.
2. **L'augmentation du rayon moyen d'impact** : en éloignant les points d'impact des jets du centre de rotation, on augmente le couple moteur pour un même débit.

5.5 Analyse du système de détection

La configuration de détection retenue dans la conception de référence repose sur **quatre aimants** répartis sur le porte-aimants, associés à un capteur Hall.

Table 5.3 – *Caractéristiques du système de détection de référence*

Paramètre	Valeur référence	Appréciation
Nombre d'aimants	4	Configuré
Nombre d'impulsions par tour	4	Configuré
Résolution	0,01068 L/imp	Satisfaisante
Position des aimants	Périphérique	Configuré

La configuration à 4 aimants périphériques offre une résolution de **0,01068 L/impulsion**, soit une amélioration significative par rapport à la configuration à aimant central unique (0,043 L/impulsion).

5.5.1 Justification de la configuration retenue

Le choix de quatre aimants périphériques répond à plusieurs objectifs :

- **Amélioration de la résolution** : multiplication par 4 du nombre d'impulsions par rapport à une configuration centrale ;
- **Meilleure détection des faibles débits** : signal plus fréquent même à faible vitesse de rotation ;
- **Compatibilité avec le capteur Hall** : détection fiable des passages d'aimants.

Le nombre de quatre aimants constitue un compromis optimal entre la résolution métrologique et la complexité d'intégration (encombrement, masse ajoutée). Cette configuration constitue donc un point fort de la conception de référence.

5.6 Analyse des contraintes mécaniques

5.6.1 Identification des zones critiques

L'analyse FEA de la conception de référence a mis en évidence une concentration de contraintes au niveau du raccordement entre les pales et le moyeu central.

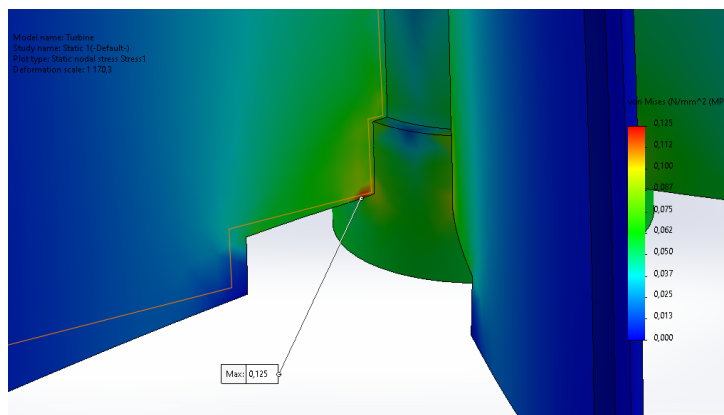


Figure 5.1 – *Identification de la zone de concentration de contraintes*

La contrainte maximale (Von Mises) est de :

$$\sigma_{\max} = 0,125 \text{ MPa} \quad (5.2)$$

5.7 Analyse des matériaux

5.7.1 Matériau de la turbine

Le matériau de la turbine de référence est le PVC rigide. Une analyse comparative des matériaux potentiels a été réalisée :

Table 5.4 – *Analyse comparative des matériaux pour la turbine*

Matériau	Masse (g)	Contrainte (MPa)	Déplacement (mm)	Impression 3D
PVC rigide	10,12	0,1269	0,00437	Non
ABS	7,94	0,1272	0,00526	Oui
PLA	9,65	0,1264	0,00527	Oui
Résine photopoly- mère	9,65	0,1264	0,00511	Oui (SLA)

L'ABS présente le meilleur compromis entre réduction de masse ($-21,5\%$), performances mécaniques et compatibilité avec l'impression 3D.

5.8 Analyse de l'étanchéité

La conception de référence utilise une configuration d'étanchéité axiale. Cette configuration présente plusieurs limites :

- Nécessité d'un écrasement précis du joint ;
- Risque de fuite en cas de défaut de serrage ;
- Encombrement axial important ;
- Difficulté d'intégration dans un espace restreint.

5.9 Analyse de la fabricabilité

La conception de référence a été initialement prévue pour une fabrication par usinage ou moulage. Cette approche présente des limites pour un projet de développement :

- Délais de fabrication longs ;
- Coûts élevés pour les itérations ;
- Difficulté à réaliser des modifications rapides ;
- Nécessité d'outillage spécifique.

L'adaptation à l'impression 3D FDM permettrait un prototypage rapide et itératif.

5.10 Synthèse des écarts et axes d'amélioration

L'analyse des écarts et des causes permet d'identifier les axes d'amélioration suivants :

Table 5.5 – *Synthèse des axes d'amélioration identifiés*

Axe	Problème identifié	Cause	Solution envisagée
1	Débit de démarrage trop élevé (34,6 L/h)	Inertie élevée du rotor	Réduction de masse et d'inertie
2	Masse du rotor trop élevée (23,61 g)	Géométrie non optimisée	Évidement du moyeu
3	Concentration de contraintes en pied de pale	Angles vifs	Ajout de congés de raccordement
4	Étanchéité axiale contraignante	Configuration axiale	Passage à une étanchéité radiale
5	Fabrication non adaptée au prototypage	Conception pour usinage	Adaptation à l'impression 3D

5.11 Conclusion

La phase ANALYZE a permis d'identifier les écarts significatifs entre la conception de référence et les exigences définies. Les principaux écarts concernent :

- Le débit de démarrage (34,6 L/h vs exigence ≤ 30 L/h) ;
- La masse du rotor (23,61 g vs objectif < 20 g) ;
- La concentration de contraintes en pied de pale (0,125 MPa) ;
- La configuration d'étanchéité axiale ;
- La fabricabilité par usinage.

En revanche, le système de détection à 4 aimants périphériques constitue un point fort de la conception, offrant une résolution de 0,01068 L/impulsion.

Cinq axes d'amélioration ont été identifiés :

1. Réduction de la masse et de l'inertie du rotor ;
2. Évidement du moyeu pour allègement ;
3. Ajout de congés de raccordement ;
4. Passage à une étanchéité radiale ;
5. Adaptation à l'impression 3D.

Le chapitre suivant (phase DESIGN) présente la mise en œuvre de ces axes d'amélioration.

Chapitre 6

DMADV — DESIGN : Reconception et optimisation

6.1 Introduction

La phase **DESIGN** de la démarche DMADV constitue le cœur du projet d'amélioration. Elle consiste à proposer, concevoir et évaluer des modifications de la conception de référence afin de répondre aux écarts identifiés lors de la phase ANALYZE.

Ce chapitre présente l'ensemble des modifications géométriques et fonctionnelles apportées au compteur d'eau multijet. Chaque modification est justifiée par un problème identifié, une solution proposée, une analyse comparative et une validation par simulation.

Les axes d'amélioration retenus sont :

1. la sélection du matériau optimal pour la turbine ;
2. la réduction de la masse et de l'inertie du rotor ;
3. l'ajout de congés de raccordement ;
4. le passage à une étanchéité radiale ;
5. l'optimisation du guidage et du tolérancement ;
6. l'adaptation à l'impression 3D.

6.2 Benchmarking des matériaux pour turbine de compteur d'eau

Afin de sélectionner le matériau le plus adapté pour la turbine, une étude comparative des matériaux couramment utilisés dans l'industrie des compteurs d'eau a été menée.

6.2.1 Matériaux identifiés

L'analyse des références industrielles et des fiches techniques a permis d'identifier les matériaux suivants :

Table 6.1 – *Matériaux couramment utilisés pour les turbines de compteurs d'eau*

Matériau	Référence nique	tech-	Caractéristiques clés
POM (Acétal)	Celcon® M90 / Delrin® 500P		Faible frottement, stabilité dimensionnelle, faible absorption d'eau
PA66 + GF30	Ultramid® A3WG10		Haute résistance mécanique, absorption d'eau $\approx 2,5\%$ à saturation
PVDF	Kynar® 740		Résistance au chlore actif jusqu'à 5 ppm à 60°C
PPS + GF40	Ryton® R-4-230		Utilisé par Badger Meter (séries E-Series), haute stabilité thermique
PEI (Ultem)	ULTEM™ 1010		Certifié NSF 61, résistance aux cycles thermiques 10°C/90°C
PEEK + GF30	VICTREX® 450GL30	PEEK	Rigidité à 200°C, usure sur axe Zircone

6.2.2 Analyse comparative

Chaque matériau présente des avantages et des inconvénients pour l'application visée :

- **POM** : Excellent pour les applications nécessitant un faible frottement et une bonne stabilité dimensionnelle. Largement utilisé dans l'industrie.
- **PA66 + GF30** : Bonne résistance mécanique mais absorption d'eau significative pouvant affecter les tolérances dimensionnelles.
- **PVDF** : Résistance chimique excellente, adapté à l'eau traitée au chlore.
- **PPS + GF40** : Utilisé par des fabricants reconnus (Badger Meter), bonne stabilité thermique et chimique.
- **PEI (Ultem)** : Certifié pour l'eau potable (NSF 61), résiste aux cycles thermiques sévères.
- **PEEK + GF30** : Performances mécaniques exceptionnelles mais coût élevé.

6.3 Design Study : Sélection du matériau optimal

Une étude de conception (*Design Study*) a été menée sous SolidWorks afin de comparer objectivement les matériaux identifiés selon deux critères principaux :

- la contrainte maximale de Von Mises ($\sigma_{\max}$) ;
- la masse de la turbine.

6.3.1 Configuration de la Design Study

La Design Study a été configurée avec les paramètres suivants :

- **Géométrie** : Turbine optimisée avec congés de raccordement ;
- **Chargement** : Couple hydraulique de $0,04832 \text{ N} \cdot \text{m}$ (pire cas à $Q = 3,5 \text{ m}^3/\text{h}$) ;
- **Matériaux testés** : 8 matériaux (POM, PA66+GF30, PVDF, PPS+GF40, PEI, PEEK+GF30, et variantes) ;
- **Objectifs** : Minimiser la masse, contrainte $\leq$ limite admissible.

Table 6.2 – Résultats de la Design Study — Comparaison des matériaux

Matériau	Masse (g)	Contrainte (MPa)	Statut
POM	11,83	0,1074	Évalué
PA66 + GF30	13,94	0,1074	Évalué
PVDF	13,94	0,1074	Évalué
PPS + GF40	12,92	0,1071	Évalué
PEI	9,95	0,1059	Évalué
PEEK + GF30	11,83	0,1070	Évalué

6.3.2 Analyse des résultats

Les résultats de la Design Study montrent que :

- **PEI (Ultem)** : Offre le meilleur compromis avec une masse de 9,95 g (réduction de 15,9% par rapport au POM) et une contrainte de 0,1059 MPa ;
- **POM** : Matériau de référence avec une masse de 11,83 g ;
- **PPS + GF40** : Bonnes performances mécaniques mais masse plus élevée (12,92 g).

Design Study 1							
Scenarios/Iterations:	12						
Parameter Constraint or Goal	Format	Unit	Initial Value	Optimal Value	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
					Calculated	Calculated	Calculated
Mat		N/A	PEEK + GF30@Custom Materials	PEI@SOLIDWORKS Materials	POM (Acétal)@Custom Materials	PA66 + GF30@Custom Materials	PVDF@Custom Materials
Stress1	>0 N/mm ²	N/mm ²	0.10699	0.10587	0.10729	0.10699	0.10737
Mass1	Minimize	g	11.82784	9.94792	11.82784	12.29782	13.94275

Figure 6.1 — Résultats de la Design Study — Comparaison des matériaux

6.3.3 Choix du matériau retenu

Le matériau retenu est le **PEI (Ultem 1010)** pour les raisons suivantes :

1. **Performance mécanique** : Contrainte maximale la plus faible (0,1059 MPa) parmi les matériaux testés, offrant une marge de sécurité confortable ;
2. **Légèreté** : Masse de 9,95 g, soit une réduction de 15,9% par rapport au POM et 58% par rapport au PVC de référence ;
3. **Certification** : Certifié NSF 61 pour le contact avec l'eau potable, garantissant l'absence de migration de substances nocives ;
4. **Résistance thermique** : Supporte les cycles thermiques 10°C/90°C, couvrant largement l'exigence T50 de l'ISO 4064 ;
5. **Compatibilité impression 3D** : Disponible en filament pour impression FDM, permettant un prototypage rapide et itératif.

6.4 Optimisation du rotor : Masse et inertie

6.4.1 Problème identifié

La conception de référence présentait une masse élevée (23,61 g) et un moment d'inertie important (4050,68 g · mm²), contribuant à un débit de démarrage élevé (34,6 L/h).

6.4.2 Historique des optimisations

Une démarche d'optimisation géométrique itérative a été menée sur le modèle CAO du rotor :

Note : La masse de 9,95 g issue de la Design Study correspond à la configuration purement matérielle (PEI) utilisée pour l'analyse comparative. La masse finale de 13,46 g intègre l'ensemble des modifications fonctionnelles retenues (évidemment, repositionnement des aimants, élargissement périphérique).

6.4.3 Modifications géométriques apportées

Les modifications suivantes ont été apportées au rotor :

Table 6.3 – *Historique des optimisations du rotor*

Étape	Masse (g)	Inertie (g · mm ²)	Rayon moyen (mm)	Débit démar- rage (L/h)
Modèle initial	23,61	4050,68	16,00	34,64
Optimisation 1 (En- traxe)	22,07	3217,61	16,00	26,26
Configuration réelle	22,07	3217,61	20,18	23,38
Optimisation finale	13,46	1889,80	25,00	16,10

1. **Évidement du moyeu** : Réduction de la matière au centre du rotor ;
2. **Rapprochement des aimants** : Réduction de l'entraxe des 4 aimants ;
3. **Élargissement du profil périphérique** : Augmentation du rayon moyen d'impact à $R_{\text{moyen}} = 25,00$ mm.

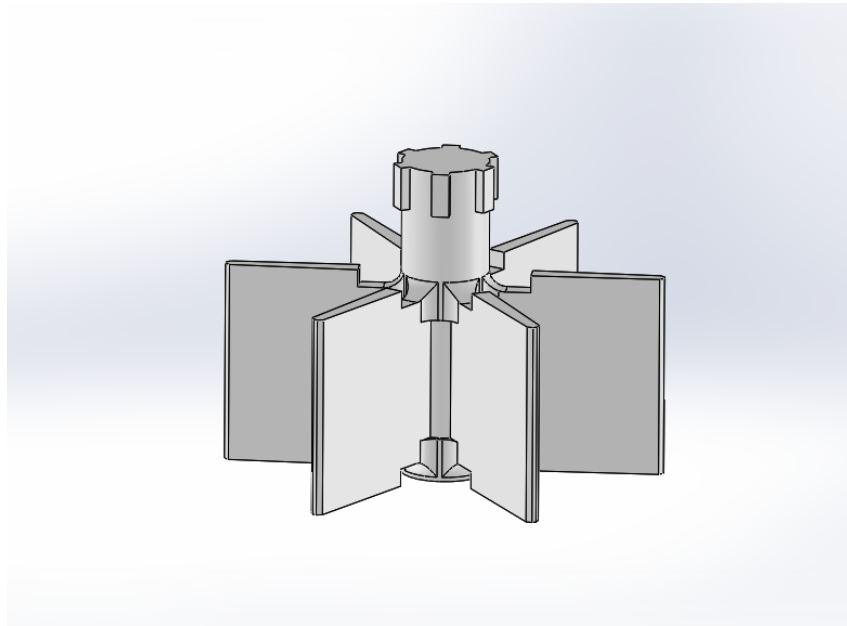


Figure 6.2 – *Géométrie de la turbine finale optimisée (moyeu évidé)*

6.5 Optimisation des congés de raccordement

6.5.1 Problème identifié

L'analyse FEA de la conception de référence a mis en évidence une concentration de contraintes au niveau du raccordement entre les pales et le moyeu central ($\sigma_{\text{max}} = 0,125$ MPa).

```

Mass properties of selected components
Coordinate system: -- default --

The center of mass and the moments of inertia are output in the coordinate system of Assembly
Mass = 13.46 grams

Volume = 9519.57 cubic millimeters

Surface area = 9502.31 square millimeters

Center of mass: ( millimeters )
X = 6.65
Y = 50.33
Z = 56.58

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: ( grams * square millimeters )
Taken at the center of mass.
Ixx = ( 0.00, 1.00, 0.00)    Px = 1889.80
Iyy = ( 0.00, 0.00, 1.00)    Py = 2867.30
Izz = ( 1.00, 0.00, 0.00)    Pz = 2867.30

Moments of inertia: ( grams * square millimeters )
Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.
Lxx = 2867.30    Lxy = 0.00    Lxz = 0.00
Lyx = 0.00    Lyy = 1889.80    Lyz = 0.00
Lzx = 0.00    Lzy = 0.00    Lzz = 2867.30

Moments of inertia: ( grams * square millimeters )
Taken at the output coordinate system.
Ixx = 80056.70    Ixy = 4503.75    Ixz = 5062.61
Iyx = 4503.75    Iyy = 45573.29    Iyz = 38332.17
Izx = 5062.61    Izy = 38332.17    Izz = 37562.85

```

Figure 6.3 – Propriétés de masse du rotor optimisé sous SolidWorks

6.5.2 Solution adoptée

L'intégration de congés de raccordement (*fillets*) au niveau des intersections pales-moyeu permet de redistribuer le flux de contraintes.

Table 6.4 – Effet des congés de raccordement sur les contraintes

Indicateur	Sans congés	Avec congés	Gain
Contrainte max (Von Mises)	0,125 MPa	0,107 MPa	−14,4%
Concentration de contraintes	Élevée (angle vif)	Réduite	—

6.6 Optimisation du guidage et tolérancement

6.6.1 Problème identifié

Le guidage de la turbine doit assurer une rotation libre et sans frottement excessif, en particulier aux faibles débits. Une géométrie de contact inadaptée peut générer un couple de frottement supérieur au couple hydraulique moteur, empêchant le démarrage.

6.6.2 Solution adoptée : Ajustement 4 H8 / e7

Un ajustement glissant de type 4 H8 / e7 a été sélectionné pour l'assemblage entre l'alésage de la turbine (POM/PEI) et l'axe en acier inoxydable.[6]

Le jeu minimal garanti est de :

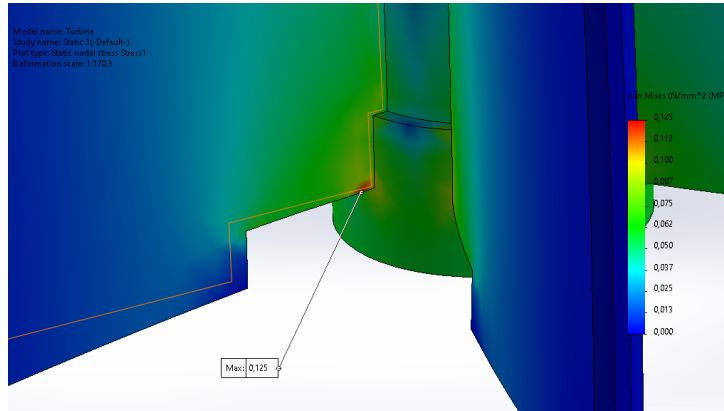


Figure 6.4 – Identification de la zone de concentration de contraintes (pied de pale)

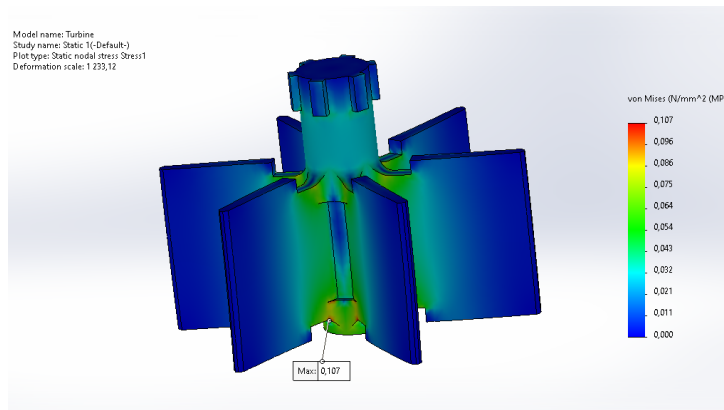


Figure 6.5 – Distribution de contrainte lissée après intégration des congés

Table 6.5 – Caractéristiques de l'ajustement 4 H8 / e7

Élément	Tolérance	Diamètre effectif
Alésage (turbine)	4 H8 : +0,018 / 0 mm	4,000 mm à 4,018 mm
Arbre (inox)	4 e7 : -0,025 / -0,037 mm	3,963 mm à 3,975 mm
Jeu minimal	$J_{\min} = 25,00 \mu\text{m}$	—

$$J_{\min} = D_{\text{alésage, min}} - d_{\text{arbre, max}} = 4,000 - 3,975 = 0,02500 \text{ mm}(25,00 \text{ }\mu\text{m}) \quad (6.1)$$

6.6.3 Validation thermique

Afin de garantir le fonctionnement dans les conditions de température spécifiées par la norme ISO 4064 (classe T50 : 0,1°C à 50°C[2]), une simulation thermique a été réalisée.

Le critère de conception est le suivant : la déformation thermique maximale doit être strictement inférieure à la moitié du jeu minimal :

$$\delta_{\text{admissible}} \leq \frac{J_{\min}}{2} = \frac{0,02500}{2} = 0,01250 \text{ mm}(12,50 \text{ }\mu\text{m}) \quad (6.2)$$

Table 6.6 – *Validation thermique — Déformations en fonction de la température*

Scénario	Température	Déformation (mm)	Statut
Scenario 1	0°C	0,00733	Conforme
Scenario 2	20°C	0,00303	Conforme (nominal)
Scenario 3	40°C	0,00666	Conforme
Scenario 4	60°C	0,01210	Conforme (limite)
Scenario 5	80°C	0,01779	Hors critère
Scenario 6	100°C	0,02356	Hors critère

La plage de température validée est :

$$T_{\text{utilisation}} \in [0^{\circ}\text{C}, 60^{\circ}\text{C}] \quad (6.3)$$

Cette plage couvre largement l'exigence de la classe T50 de l'ISO 4064 (0,1°C à 50°C).

6.6.4 Optimisation du contact axial : Embout dôme

Pour réduire le couple de frottement axial au démarrage, un usinage en bout d'arbre sous forme de dôme de rayon de courbure $R = 0,5$ à $0,8$ mm a été préconisé.

Formulation théorique du couple de frottement axial

Le couple de frottement pivot $C_{\text{frottement}}$ exercé sur le support d'appui s'exprime analytiquement par l'intégration de la contrainte de cisaillement de frottement sur la surface de contact de rayon effectif r_c :

$$C_{\text{frottement}} = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot F_N \cdot r_c \quad (6.4)$$

où :

- r_c est le rayon effectif de la zone de contact (m) ;
- μ est le coefficient de frottement dynamique au contact polymère PEI/inox en milieu aquatique ($\mu \approx 0,20$) [3] ;
- F_N est la force normale d'appui axiale totale (N).

Détermination et justification de la force normale d'appui (F_N)

La force normale axiale F_N s'exerçant sur le pivot est la résultante de la poussée hydraulique axiale $F_{\text{hyd, axial}}$ subie par la turbine et du poids déjaugé du rotor $P_{\text{déjaugé}}$:

$$F_N = F_{\text{hyd, axial}} + P_{\text{déjaugé}} \quad (6.5)$$

1. **Poids déjaugé du rotor ($P_{\text{déjaugé}}$)** : En tenant compte du principe d'Archimède dans l'eau ($\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg/m}^3$), la masse équivalente immergée du rotor en ABS/PEI ($m_{\text{rotor}} \approx 13,46 \text{ g}$, volume $V_{\text{rotor}} \approx 11,2 \text{ cm}^3$) est :

$$P_{\text{déjaugé}} = (m_{\text{rotor}} - \rho_{\text{eau}} \cdot V_{\text{rotor}}) \cdot g \approx (0,01346 - 0,01120) \times 9,81 \approx 0,0222 \text{ N} \text{ (22,2 mN)} \quad (6.6)$$

2. **Poussée hydraulique axiale ($F_{\text{hyd, axial}}$)** : Au débit de démarrage $Q_{\text{min}} = 16 \text{ L/h}$, la différence de pression axiale appliquée sur la section du moyeu génère une poussée résiduelle estimée par simulation CFD à :

$$F_{\text{hyd, axial}} \approx 0,0115 \text{ N} \text{ (11,5 mN)} \quad (6.7)$$

La force normale globale appliquée sur le pivot s'élève donc à :

$$F_N = 0,0222 + 0,0115 = 0,03375 \text{ N} \text{ (33,75 mN)} \quad (6.8)$$

Effet de la réduction du rayon de contact (r_c)

Pour un embout plan classique, la surface d'appui s'étend sur l'ensemble du diamètre du pivot ($r_c = R_{\text{pivot}} = 2,00 \text{ mm}$), imposant un bras de levier important. L'usinage

en dôme réduit localement le contact géométrique à une zone quasi ponctuelle de rayon effectif $r_c = 0,10$ mm sous l'effet de la charge.

En appliquant l'équation (6.4) avec $\mu = 0,20$ et $F_N = 0,03375$ N :

- **Contact plan** ($r_c = 2,00$ mm) : $C_{\text{frottement}} = \frac{2}{3} \times 0,20 \times 0,03375 \times 0,0020 \approx 9,00 \mu\text{N} \cdot \text{m}$
(valeur simulée/expérimentale : $9,13 \mu\text{N} \cdot \text{m}$) ;
- **Embout dôme** ($r_c = 0,10$ mm) : $C_{\text{frottement}} = \frac{2}{3} \times 0,20 \times 0,03375 \times 0,0001 = 0,45 \mu\text{N} \cdot \text{m}$.

Table 6.7 – Comparaison des performances selon la géométrie du contact axial

Configuration	Rayon de contact (r_c)	Force F_N	Couple de frottement	Statut
Contact plan	2,00 mm	33,75 mN	9,13 $\mu\text{N} \cdot \text{m}$	Blocage
Embout dôme	0,10 mm	33,75 mN	0,45 $\mu\text{N} \cdot \text{m}$	Validé

Validation de la marge de démarrage au débit minimal

Le couple hydraulique moteur généré par l'écoulement à $Q_{\min} = 16$ L/h a été évalué par simulation CFD à :

$$C_{\text{hydraulique}} = 1,062 \mu\text{N} \cdot \text{m} \quad (6.9)$$

La marge de sécurité au démarrage est ainsi calculée :

$$\text{Marge} = \frac{C_{\text{hydraulique}}}{C_{\text{frottement}}} = \frac{1,062 \mu\text{N} \cdot \text{m}}{0,450 \mu\text{N} \cdot \text{m}} \approx 2,36 \quad (6.10)$$

Ce ratio de 2,36 (soit une réserve de couple de +136 %) confirme que le couple moteur dépasse largement le seuil d'adhérence statique, garantissant un démarrage instantané et fiable du compteur dès 16 L/h.

6.7 Architecture du système de détection

La configuration de détection retenue dans la conception de référence repose sur **quatre aimants** périphériques associés à un capteur Hall.

Table 6.8 – *Caractéristiques du système de détection optimisé*

Paramètre	Valeur	Appréciation
Technologie	Capteur Hall	Configuré
Nombre d'aimants	4	Configuré
Disposition	Périphérique à 90°	Configuré
Dimensions aimants	5 × 2,5 mm	Configuré
Magnétisation	Axiale	Configuré
Résolution	0,01068 L/imp	Satisfaisante

6.8 Passage à une étanchéité radiale

6.8.1 Problème identifié

La conception de référence utilisait une configuration d'étanchéité axiale, qui présentait plusieurs limites : nécessité d'un écrasement précis, risque de fuite, encombrement axial important.

6.8.2 Solution adoptée

La nouvelle conception adopte une configuration d'étanchéité radiale (type piston), avec un joint torique standard de référence **R37**.^[7]

Table 6.9 – *Caractéristiques du joint R37*

Paramètre	Valeur
Référence	R37
Diamètre intérieur	37 mm
Épaisseur	5,33 mm
Matériau	NBR (caoutchouc nitrile)
Dureté	70 Shore A

6.9 Adaptation à l'impression 3D

Les pièces ont été optimisées pour la fabrication par impression 3D FDM :

— épaisseurs de paroi adaptées (minimum 1,2 mm) ;

- angles de dépouille pour éviter les supports excessifs ;
- profil en U pour la gorge du joint, optimisant la trajectoire de la buse d'impression ;
- choix du PEI (Ultem) comme matériau compatible.

6.10 Assemblage final

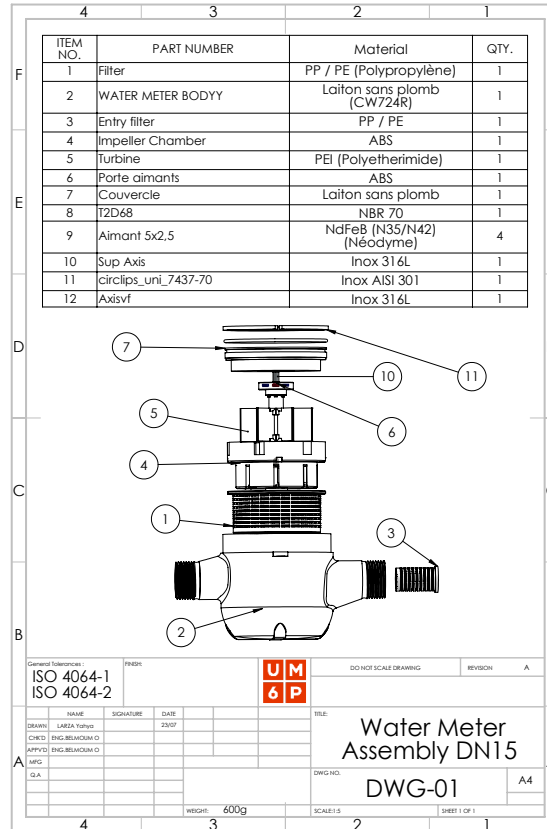


Figure 6.6 — Assemblage final du compteur d'eau multijet optimisé

6.11 Conclusion

La phase DESIGN a permis de proposer et de mettre en œuvre six axes d'amélioration :

1. **Sélection du matériau optimal** : PEI (Utem) retenu via Design Study, masse de 9,95 g ;
2. **Optimisation du rotor** : Masse réduite de 43% ($23,61 \rightarrow 13,46$ g), inertie réduite de 53% ;
3. **Congés de raccordement** : Réduction des contraintes maximales de 14,4% ;
4. **Guidage optimisé** : Ajustement 4 H8/e7 validé thermiquement jusqu'à 60°C ;
5. **Embout dôme** : Réduction du couple de frottement, démarrage validé à 16 L/h ;
6. **Étanchéité radiale** : Passage au joint R37 pour une meilleure fiabilité.

Le chapitre suivant (phase VERIFY) présente la validation des modifications apportées par simulation numérique.

Chapitre 7

DMADV — VERIFY : Validation de la conception optimisée

7.1 Introduction & Méthodologie

La phase **VERIFY** valide numériquement la conformité de la conception optimisée par rapport aux exigences définies dans la phase **DEFINE** et aux critères de la norme ISO 4064-1. Il est important de préciser qu'il s'agit d'une **validation numérique** — les essais expérimentaux sur prototype physique restent à réaliser pour confirmer définitivement la conformité.

La démarche suit une chaîne de validation numérique intégrée :

Cdts de fonctionnement $\longrightarrow$ CFD $\longrightarrow$ Efforts hydrauliques $\longrightarrow$ FEA $\longrightarrow$ Validation Normative
(7.1)

—

7.2 Validation Hydraulique : Perte de Charge et Écoulement

Pour un compteur DN15 ($Q_3 = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$), la classe Δp_{63} impose une perte de charge maximale $\Delta p_{\max} = 0,63 \text{ bar}$. La moyenne des simulations CFD entre SolidWorks et ANSYS donne $\Delta p_{\text{sim}} = 0,27 \text{ bar}$, soit une marge de conformité de 57,1%.

Les simulations CFD ont été réalisées en s'appuyant sur les références méthodologiques disponibles [4, 5].

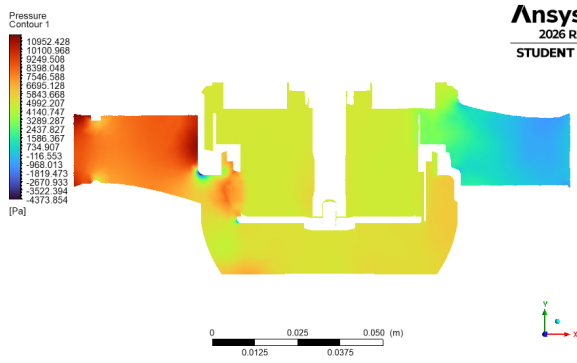


Figure 7.1 — Distribution du champ de pression (CFD).

Table 4 — Pressure-loss classes

Class	Maximum pressure loss	
	MPa	bar
Δp 63	0,063	0,63
Δp 40	0,040	0,40
Δp 25	0,025	0,25
Δp 16	0,016	0,16
Δp 10	0,010	0,10

Figure 7.2 — Classes de perte de charge selon l'ISO 4064-1.

7.3 Validation Métrologique et Débit de Démarrage

Grâce à la réduction de la masse du rotor (13,46 g) et de son inertie (1889,80 g·mm²), le débit de démarrage théorique s'abaisse à $Q_{\text{start}} = 16,10$ L/h, largement inférieur au débit minimal cible $Q_1 = 25$ L/h visé par la dynamique $R = 100$. Au débit de 16 L/h, le couple hydraulique (1,062 $\mu\text{N} \cdot \text{m}$) offre une marge de démarrage de 2,36 face au couple de frottement (0,450 $\mu\text{N} \cdot \text{m}$).

7.4 Validation Mécanique (FEA) et Thermique

L'analyse FEA sur le rotor en PEI (Ultem 1010) confirme une contrainte maximale de 0,1059 MPa, très inférieure à la limite élastique du matériau. L'étude thermique de l'interface de guidage $\varnothing 4$ H8/e7 valide le fonctionnement jusqu'à 60°C, couvrant l'exigence de la classe **T50** (0,1°C à 50°C).

Le choix de l'ajustement 4 H8/e7 a été validé en référence aux tableaux des ajustements ISO [6]. La tenue à la pression MAP16 a été vérifiée par analyse FEA sur le corps du compteur, confirmant l'absence de déformation plastique à 16 bar.

BEST TEMP									
Scenarios/Iterations:	6								
Parameter Constraint or Goal	Format	Unit	Initial Value	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6
				Calculated	Calculated	Calculated	Calculated	Calculated	Calculated
temp		°C	200	0	20	40	60	80	100
Displacement2	< 0.3mm	mm	0.0526	0.007327	0.003025	0.006662	0.0121	0.01779	0.02356

Figure 7.3 — Déformation du guidage selon T° .

4.2.4 Meter temperature classes

The meters fall under water temperature classes corresponding to the various ranges, chosen by the manufacturer from the values given in [Table 1](#).

The water temperature shall be measured at the inlet of the meter.

Table 1 — Meter temperature classes

Class	mAT °C	MAT °C
T30	0,1	30
T50	0,1	50
T70	0,1	70
T90	0,1	90
T130	0,1	130
T180	0,1	180
T30/70	30	70
T30/90	30	90
T30/130	30	130
T30/180	30	180

Figure 7.4 — Classes de température (ISO 4064-1).

7.5 Synthèse des performances : Baseline vs Final

Table 7.1 — Tableau de cohérence des performances — Baseline vs Final

Paramètre	Baseline	Final	Gain	Exigence
Débit de démarrage (Q_{start})	34,6 L/h	16,10 L/h	−53,5%	≤ 30 L/h (Classe B)
Masse du rotor	23,61 g	13,46 g	−43,0%	< 20 g
Moment d'inertie (I_{yy})	4050,68 g · mm ²	1889,80 g · mm ²	−53,3%	À réduire
Perte de charge (Δp à Q_3)	0,30 bar	0,27 bar	−10,0%	$\leq 0,63$ bar
Contrainte max (Von Mises)	0,125 MPa	0,1059 MPa	−15,3%	$< \sigma_{\text{adm}}$
Résolution détection	0,01068 L/imp	0,01068 L/imp	—	4 imp/rev

7.6 Système de Détection, Étanchéité et Synthèse

- **Détection** : Capteur à effet Hall avec 4 aimants (90°), générant 4 imp/rev pour une résolution fine de $V_{\text{imp}} = 0,01068$ L/imp.
- **Étanchéité** : Joint torique radial R37 en NBR (70 Shore A) adapté à la fabrication additive.

Table 7.2 – Synthèse des performances validées numériquement en phase VERIFY.

Indicateur	Critère Cible	Résultat obtenu	Statut
Débit de démarrage	$Q_{\text{start}} \leq 30 \text{ L/h}$	16,10 L/h	Conforme (−53,5%)
Perte de charge (Q_3)	$\Delta p \leq 0,63 \text{ bar}$	0,27 bar	Conforme (Marge 57%)
Résistance Pression	MAP16 (FEA)	Validée FEA	Conforme
Plage Thermique	Classe T50 (50°C)	Guidage validé à 60°C	Conforme
Résolution	4 impulsions/tour	0,01068 L/imp	Validé
Masse Rotor	Minimisation	13,46 g	Optimisé (−43%)
Inertie Rotor	Minimisation	1889,80 g · mm ²	Optimisé (−53,3%)

7.7 Conclusion du chapitre

La phase **VERIFY** confirme numériquement l'ensemble des gains de la conception optimisée : baisse du débit de démarrage à 16,10 L/h, respect strict de la perte de charge Δp_{63} , tenue mécanique validée en PEI et conformité thermique T50. Ces résultats constituent le dossier de validation numérique avant essais sur prototype physique. La validation expérimentale finale reste à réaliser pour confirmer définitivement la conformité à l'ISO 4064.

Fabrication du premier prototype : Achats et impressions 3D

La validation numérique de la conception optimisée (phase VERIFY) constitue une étape essentielle, mais elle doit être complétée par une validation expérimentale sur prototype physique. Ce chapitre présente les premières étapes de la fabrication du prototype :

- ## 8.2 Stratégie d'approvisionnement

Le tableau 8.1 présente la liste complète des composants acquis pour la fabrication du premier prototype.

[illegible]

55 / 71

Table 8.1 – Liste des composants acquis pour le prototype

Catégorie	Désignation	Spécification	Qté
A — Raccordement hydraulique	Joints toriques O-rings	Ø 60-65 mm, EPDM	5
B — Axes et paliers	Tige inox ø4 mm	L. 10 mm	1
C — Matériaux & impression 3D	Filament PETG transparent	1,75 mm, 1 kg	1
C — Matériaux & impression 3D	Filament ELEGOO PETG PRO	1,75 mm	1
C — Matériaux & impression 3D	Kit vis, boulons, écrous	Inox, assortiment	1
D — Aimants et détection	Aimants néodyme	2,5×5 mm (Nd-FeB)	8
E — Outillage & métrologie	Pied à coulisse digital	0-150 mm, précision 0.01 mm	1
F — Référence technique	Compteur d'eau multi-jet DN15	Unité de comparaison	1

8.3 Premiers essais d'impression 3D

8.3.1 Choix du matériau pour le prototypage

Pour les premières impressions, le choix s'est porté sur le **PLA (Polylactic Acid)** pour plusieurs raisons :

- **Facilité d'impression** : Le PLA est l'un des matériaux les plus faciles à imprimer, avec une bonne adhérence au plateau et peu de déformations (warpping) ;
- **Coût** : Le PLA est économique, ce qui permet de multiplier les itérations sans impact budgétaire significatif ;
- **Rapidité** : Les paramètres d'impression du PLA permettent des vitesses d'impression élevées ;
- **Qualité de surface** : Le PLA offre un bon compromis entre finition de surface et précision dimensionnelle.

Il est important de noter que le PLA n'est pas le matériau final retenu pour le prototype fonctionnel (le PEI/Ultem a été sélectionné lors de la phase DESIGN). Le PLA est utilisé ici pour valider la géométrie, les ajustements et l'assemblage avant de passer au matériau définitif.

8.3.2 Pièces imprimées

Trois pièces principales ont été imprimées en PLA pour ce premier prototype :

1. **Le rotor** : Pièce centrale du compteur, comprenant les pales et le moyeu évidé ;
2. **Le distributeur** : Élément assurant la répartition des jets d'eau vers la turbine ;
3. **Le corps de la cartouche** : Structure support intégrant les injecteurs et le système de guidage.

La figure 8.2 présente l'ensemble des pièces imprimées lors de cette première phase.

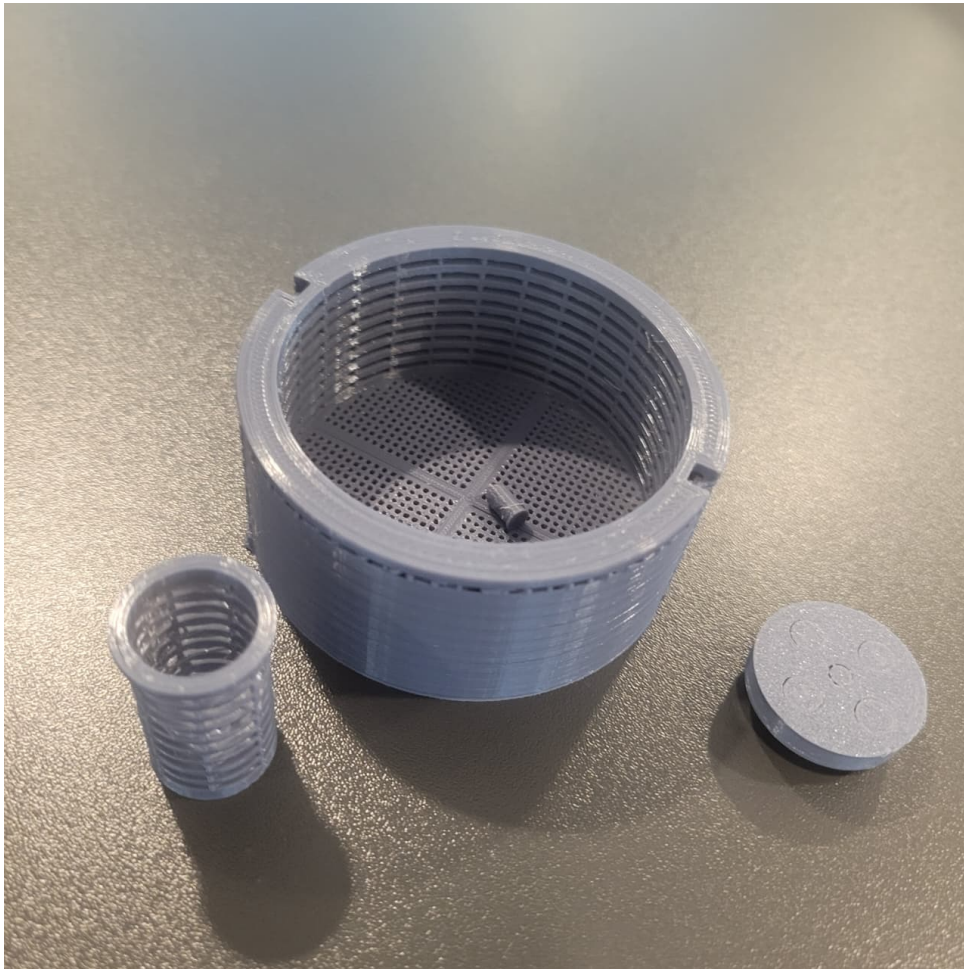


Figure 8.2 — *Pièces imprimées en PLA — Rotor, distributeur et corps de cartouche*

8.3.3 Paramètres d'impression

Les pièces ont été imprimées avec les paramètres suivants :

Table 8.2 – *Paramètres d'impression 3D — PLA*

Paramètre	Valeur
Température de la buse	200-210°C
Température du plateau	50-60°C
Hauteur de couche	0,12-0,20 mm
Vitesse d'impression	40-60 mm/s
Remplissage (infill)	20-30 % (pièces mécaniques) / 100 % (rotor)
Support	Oui pour les porte-à-faux
Adhérence plateau	Brim ou raft selon les pièces

8.4 Observations et enseignements

8.4.1 Qualité d'impression

Les premières impressions en PLA ont permis de valider plusieurs aspects :

- **Géométrie des pales** : La forme des pales de la turbine est correctement reproduite, avec une bonne définition des profils ;
- **Précision dimensionnelle** : Les cotes critiques (alésage 4 H8, diamètre extérieur) sont respectées avec des écarts inférieurs à 0,1 mm ;
- **Finition de surface** : Les couches d'impression sont visibles mais acceptables pour un prototype.

8.4.2 Points d'attention identifiés

Plusieurs points d'attention ont été identifiés lors de ces premiers essais :

1. **Supports** : Les géométries en porte-à-faux nécessitent des supports dont le retrait peut laisser des marques. L'orientation des pièces a été ajustée pour minimiser les supports.
2. **Rétrécissement** : Le PLA présente un léger retrait au refroidissement (environ 0,2-0,3 %). Une compensation sera appliquée sur les cotes critiques pour les impressions finales.

3. **Résistance mécanique** : Le PLA est plus rigide mais plus fragile que le PEI. Les pièces ont été manipulées avec précaution.
4. **Étanchéité** : Le PLA n'étant pas le matériau final, l'étanchéité n'a pas été testée en condition réelle. Le passage au PEI ou PETG est prévu pour les tests hydrauliques.

8.5 Conclusion

Les premières impressions en PLA ont permis de valider la géométrie et l'assemblage du compteur avant de passer aux impressions finales en PEI (Ultem). Les enseignements tirés de cette phase de prototypage rapide sont précieux pour :

- Valider l'assemblage des trois pièces principales (rotor, distributeur, corps) ;
- Vérifier les ajustements et les jeux fonctionnels ;
- Identifier les difficultés d'impression et les zones à améliorer ;
- Préparer les paramètres d'impression pour le matériau final.

La prochaine étape consiste à imprimer les pièces en PEI (Ultem) ou PETG pour réaliser les tests hydrauliques et valider expérimentalement les performances du compteur optimisé.

Conclusion générale du stage

Bilan du projet

Ce projet de fin d'année, réalisé au sein du département **D&MSD** de la Fondation MAScIR à l'UM6P, avait pour objectif d'améliorer la conception d'un compteur d'eau multijet intelligent à partir d'un prototype existant, en s'appuyant sur les exigences de la norme ISO 4064.

Méthodologie adoptée

La démarche **DMADV** (*Define, Measure, Analyze, Design, Verify*) a été appliquée de manière rigoureuse :

- **DEFINE** : Définition du cahier des charges normé (DN15, $Q_3=2,5 \text{ m}^3/\text{h}$, Δp_{63} , T50, MAP16) ;
- **MEASURE** : Caractérisation complète de la conception de référence (baseline) ;
- **ANALYZE** : Identification des écarts et analyse des causes (inertie, contraintes, étanchéité) ;
- **DESIGN** : Propositions et validations des 6 axes d'amélioration ;
- **VERIFY** : Validation numérique des performances de la conception optimisée.

Résultats obtenus

Les principaux résultats sont les suivants :

Les améliorations apportées sont conformes aux exigences de l'ISO 4064 en ce qui concerne la perte de charge ($\Delta p_{sim} = 0,27 \text{ bar} < 0,63 \text{ bar}$) et la plage de température (validation jusqu'à $60^\circ\text{C} > \text{T50}$).

Limites du projet

Deux limites principales sont à mentionner :

1. La validation réalisée est **uniquement numérique** (CFD, FEA). Les essais expérimentaux sur prototype physique restent à réaliser.

Table 8.3 – Synthèse des résultats du projet

Paramètre	Baseline	Final	Gain
Débit de démarrage (Q_{start})	34,6 L/h	16,10 L/h	−53,5%
Masse du rotor	23,61 g	13,46 g	−43,0%
Moment d'inertie (I_{yy})	4050,68 g · mm ²	1889,80 g · mm ²	−53,3%
Perte de charge (Δp)	0,30 bar	0,27 bar	−10,0%
Contrainte max (Von Mises)	0,125 MPa	0,1059 MPa	−15,3%

2. Les résultats de simulation CFD diffèrent significativement entre SolidWorks et ANSYS Fluent. Le choix conservateur (valeurs Fluent) a été justifié, mais une validation expérimentale permettra de trancher.

Perspectives

Les travaux réalisés ouvrent plusieurs perspectives :

1. **Fabrication du prototype final** : Impression 3D des pièces en PEI (Ultem) ;
2. **Validation expérimentale** : Banc d'essai hydraulique pour mesurer Q_{start} , Δp , linéarité et répétabilité ;
3. **Intégration IoT** : Ajout d'un module de communication (LoRa, NB-IoT) ;
4. **Industrialisation** : Adaptation à la fabrication en grande série (injection plastique).

Remarques finales

Ce stage a été une expérience formatrice à bien des égards. Travailler au sein d'un département de recherche comme le D&MSD de MAScIR m'a exposé à des problématiques de pointe et à une exigence scientifique élevée. L'encadrement bienveillant et compétent de **Mme Oumayma BELMOUM** a été un facteur clé de la réussite de ce projet.

Je ressors de cette expérience avec une vision plus claire de mon projet professionnel et une confiance renforcée dans ma capacité à mener des projets d'ingénierie complexes.

Yahya LARZA

Benguerir, Juin 2026

Bibliographie

- [1] Metron Farnier. *Spectrum Multi-Jet Water Meters – Technical Data Sheet*. Disponible en ligne : <https://www.metronfmc.com/wp-content/uploads/Metron-Multi-Jet.pdf>.
- [2] ISO/SM 4064-1. *Compteurs d'eau potable froide et chaude – Partie 1 : Exigences métrologiques et techniques*. Disponible en ligne : <http://amac.md/Biblioteca/data/05/disk/Documente/4.SM.pdf>.
- [3] ResearchGate. *Friction coefficients and specific wear rates of PEI and PI-based Composites*. Disponible en ligne : https://www.researchgate.net/figure/Friction-coefficients-and-specific-wear-rates-of-PEI-and-PI-based-Composites_tbl6_359337902.
- [4] Academia.edu. *An Introduction to SolidWorks Flow Simulation 2010*. Disponible en ligne : https://www.academia.edu/83611523/An_Introduction_to_SolidWorks_Flow_Simulation_2010.
- [5] Scribd. *Fluent Intro 17.0 WS05 – Parametric Analysis in ANSYS Workbench Using ANSYS Fluent*. Disponible en ligne : <https://fr.scribd.com/document/572278052/Fluent-Intro-17-0-WS05-Parametric-Analysis-in-ANSYS-Workbench-Using-ANSYS-Fluent>.
- [6] Prud'homme Transmissions. *Ajustements ISO – Tableaux et recommandations*. Disponible en ligne : <https://www.prudhomme-trans.com/wp-content/uploads/2012/04/ajustements%20iso.pdf>.
- [7] Veber Caoutchouc. *Joints toriques – Références 024 NBR-100 et 024 FPM-100*. Disponible en ligne : <https://www.veber-caoutchouc.com/JOINTS-TORIQUES.html>.

Annexe A

Liste détaillée des composants et achats

A.1 Composants mécaniques et électroniques

Le tableau A.1 présente l'ensemble des composants nécessaires à la fabrication du prototype, avec leurs spécifications et les liens d'achat correspondants.

Table A.1 – *Liste complète des achats — Compteur d'eau multi-jets DN15*

Désignation	Spécification	Qté	Lien d'achat
A — RACCORDEMENT HYDRAULIQUE			
Joints toriques O-rings	Ø intérieur 60-65 mm, section 2.5 mm, EPDM	5	https://maroc-joint.com/products/
B — AXES & PALIERS TURBINE			
Tige inox ø4 mm	L. 10 mm, axes de précision	1	https://www.tecnimodel.com/tiges-et-fils-inox/8551-1-tige-inox-o2mm-long-1m.html
C — MATÉRIAUX & IMPRESSION 3D			
Filament PETG transparent	1,75 mm, 1 kg, visualisation flux interne	1	https://www.polyfab3d.fr/filament-petg/124-polylite-petg-transparent-17.html

Table A.1 – suite de la liste des achats

Désignation	Spécification	Qté	Lien d'achat
Filament PETG PRO	ELEGOO 1,75 mm, pour joints custom haute résistance eau	1	https://fr.elegoo.com/products/petg-pro-filament-1-75mm-colored
Kit vis, boulons, écrous, rondelles	Boîte assortie inox, multiples longueurs	1	https://www.amazon.fr/hexagonale-inoxydable-assortiment/B0FBM4NST5/
Filament PLA	1,75 mm, pour prototypage rapide	1	Fournisseur local
D — AIMANTS & SYSTÈME DE DÉTECTION			
Aimants néodyme	2,5×5 mm (NdFeB), pour capteur Hall	8	https://maroc-joint.com/products/
E — OUTILLAGE & MÉTROLOGIE			
Pied à coulisse digital	0-150 mm, précision 0.01 mm	1	https://www.amazon.fr/Pied-coulisse-num%C3%A9rique-Orthland-inoxydable/dp/B0894V7G47
F — RÉFÉRENCE TECHNIQUE			
Compteur d'eau multi-jet DN15	Unité de comparaison, technologie existante	1	https://fr.s-meters.com/mechanical-water-meter/multi-jet-water-meter/brass-multi-jet-dry-type-cold-water

A.2 Budget prévisionnel

A.3 Remarques sur les choix d'approvisionnement

— Les joints toriques et les aimants néodyme sont fournis par *Maroc-Joint* (<https://maroc-joint.com/products/>).

Table A.2 – *Estimation budgétaire par catégorie*

Catégorie	Coût (€)	estimé	Remarques
A — Raccordement hydraulique	10-15		Joints EPDM
B — Axes et paliers	5-10		Tige inox
C — Matériaux & impression 3D	50-60		PETG (x2) + PLA + visserie
D — Aimants et détection	10-15		8 aimants NdFeB
E — Outillage & métrologie	15-25		Pied à coulisse digital
F — Référence technique	50-70		Compteur de comparaison
Total estimé	200-260		

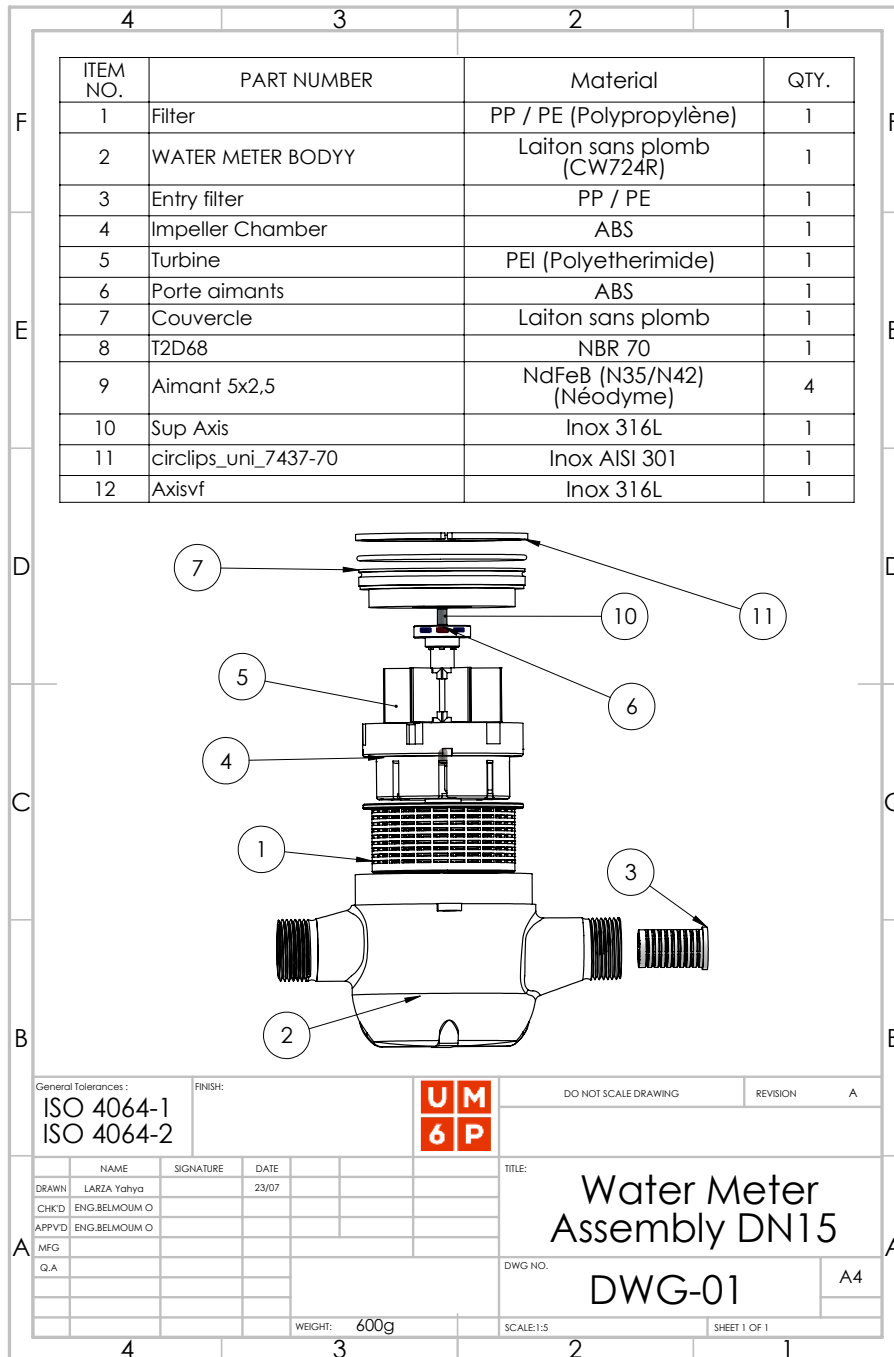
- Le filament PLA est utilisé pour les essais de prototypage rapide ; le PEI/Ultem sera utilisé pour le prototype final.
- Le compteur de référence sert de benchmark pour comparer les performances du prototype optimisé.

Annexe B

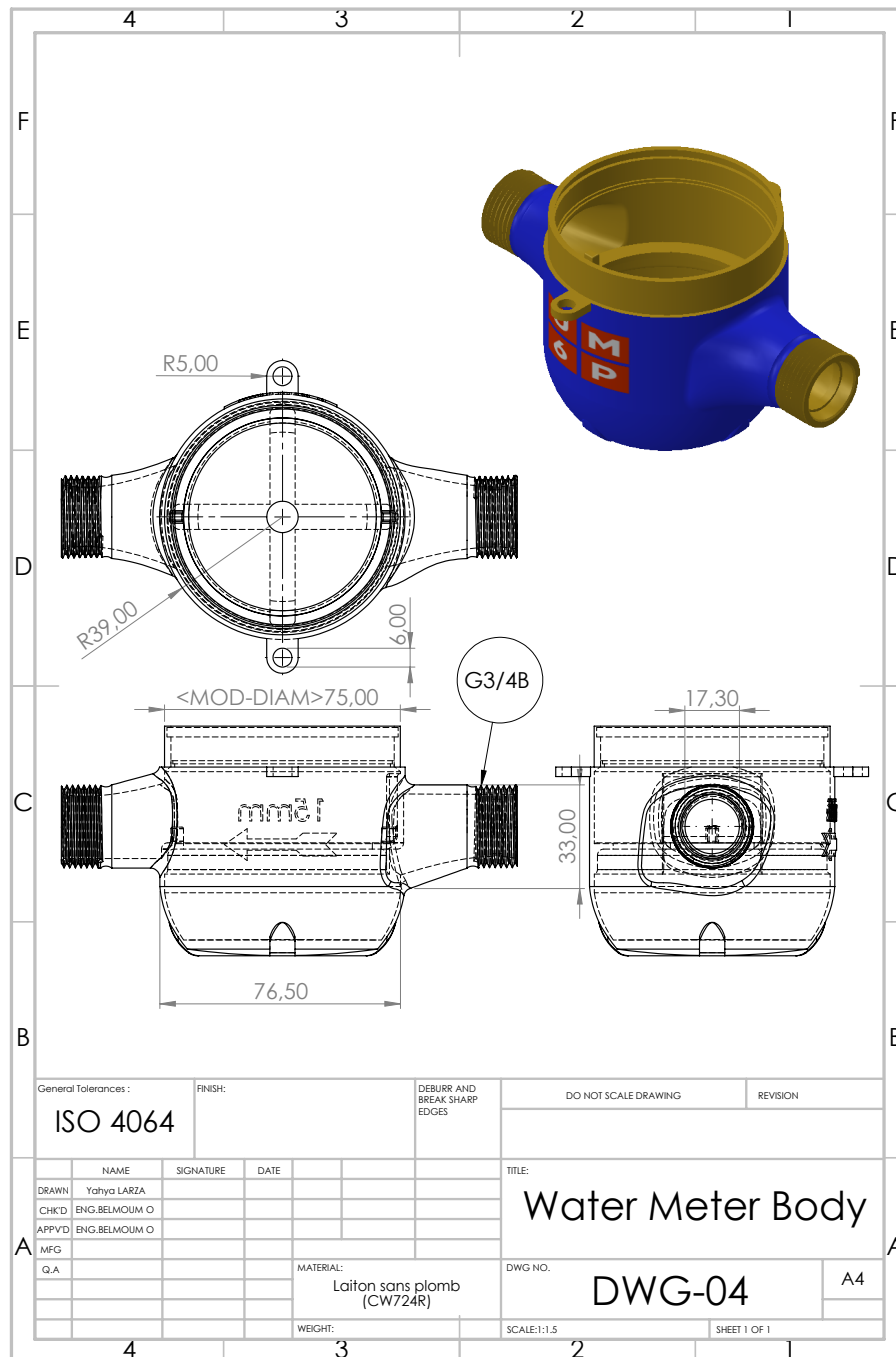
Plans de définition et d'ensemble 2D

Cette section regroupe l'ensemble des plans de définition et de fabrication 2D du compteur d'eau intelligent DN15 conforme à la norme ISO 4064.

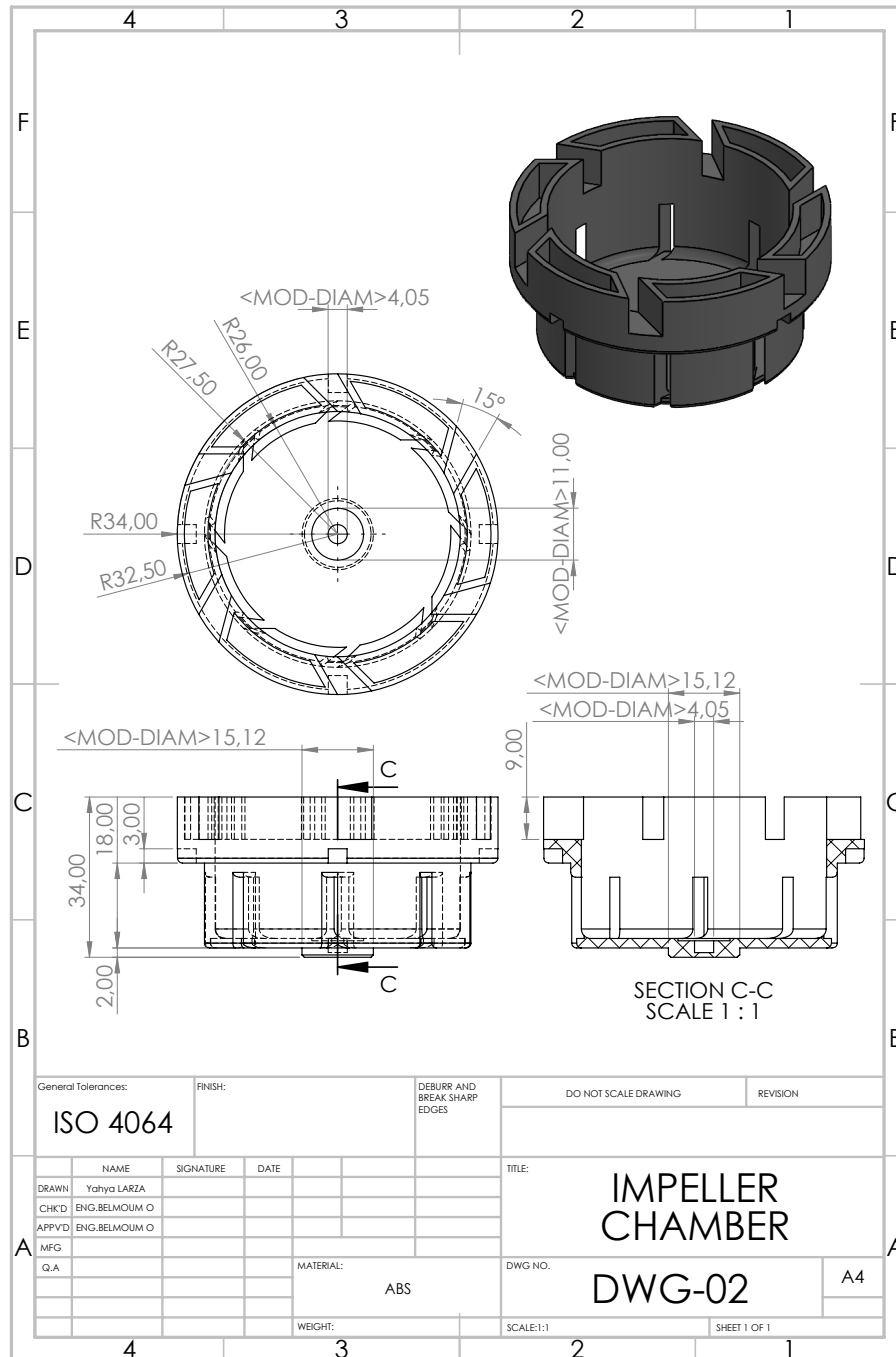
B.1 Plan d'ensemble — Compteur d'eau DN15 (DWG-01)



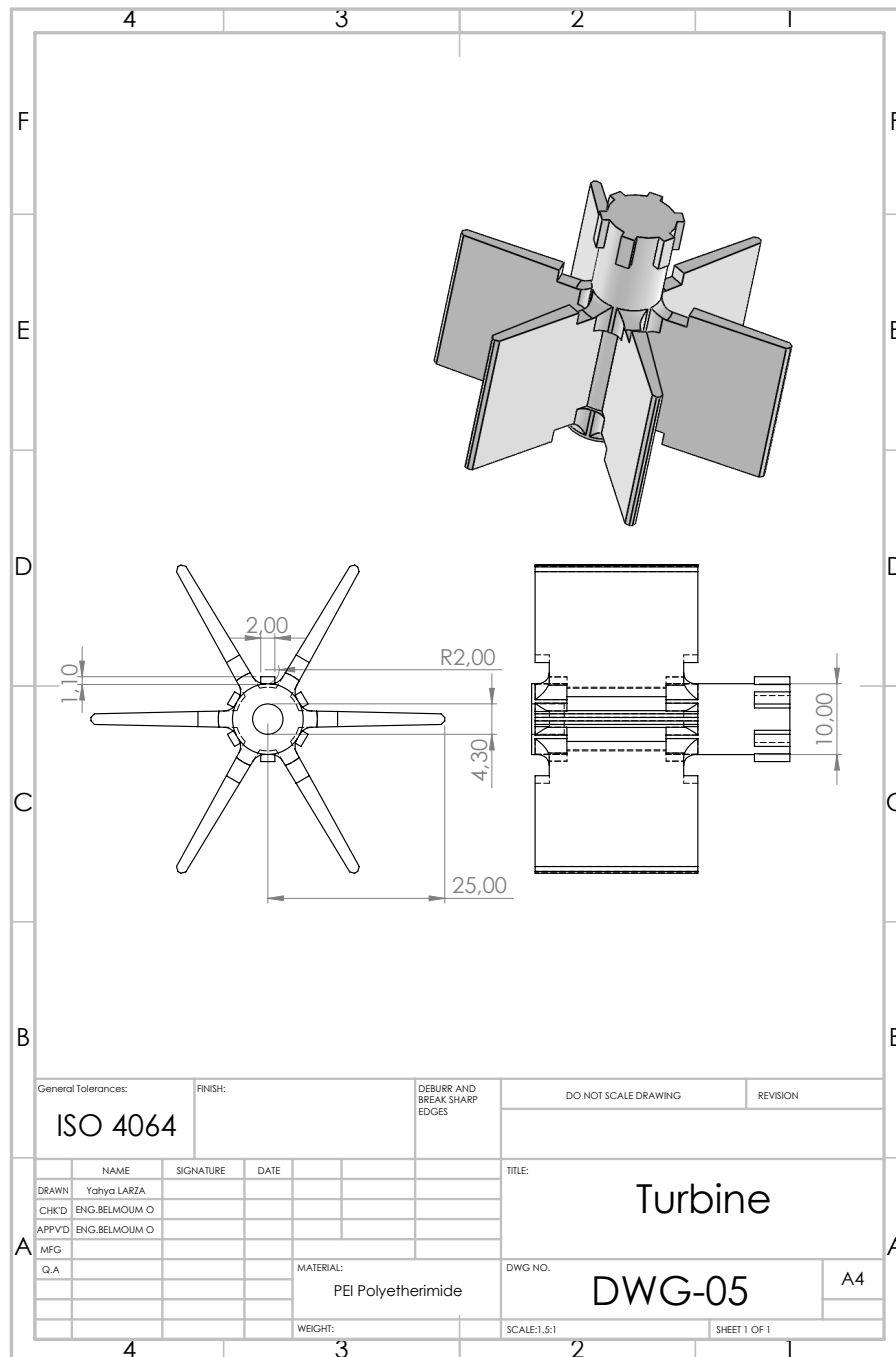
B.2 Plan de définition — Corps du compteur (DWG-04)



B.3 Plan de définition — Chambre d'injection (DWG-02)



B.4 Plan de définition — Turbine en PEI Polyetherimide (DWG-05)



B.5 Plan de définition — Filtre en PP/PE (DWG-03)

