

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du diplôme de

Master 2 – Génie Mécanique Énergétique

Thème :

Analyse des performances métrologiques et énergétique des

Volucompteurs de carburant en station-service

(Cas pratique : Naftal Bouira)

Encadré par :

Dr. / M. MANSOURI Mohamed Taki eddine

Réalisé par :

1- GHERBI BAHIA Belkacem

2- FODIL Abdelkrim

Année Universitaire : 2025 – 2026

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

À mes très chers parents, pour leurs sacrifices, leur soutien moral et leurs encouragements constants tout au long de mon parcours universitaire. Leur confiance en moi a été ma plus grande source de motivation.

À ma famille, frères, sœurs et proches, pour leur présence, leur patience et leur soutien dans les moments difficiles.

À mes enseignants et encadreurs, qui ont contribué à ma formation scientifique et humaine par leur savoir, leur disponibilité et leurs précieux conseils.

À mes amis et collègues, pour les échanges enrichissants, l'entraide et les moments de partage qui ont marqué ces années d'études.

Enfin, à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Remerciements

Avant tout, je remercie Allah le Tout-Puissant de m'avoir donné la force, la patience et la santé nécessaires pour mener à bien ce mémoire de fin d'études.

J'adresse mes plus sincères remerciements à mon encadreur, M.MANSOURI Taki eddine, pour son accompagnement rigoureux, sa disponibilité, ses conseils pertinents et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce projet.

Je tiens également à remercier les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en évaluant ce travail, ainsi que l'ensemble des enseignants du département de génie mécanique pour la qualité de leur enseignement et leur contribution à ma formation académique.

Mes remerciements vont aussi à l'entreprise/organisme **O.A.M** (Office Algérien du Métrologie) et **NAFTAL** qui m'a accueilli durant ce projet et m'a offert les moyens nécessaires à sa réalisation.

Je n'oublie pas mes camarades et amis pour leur soutien, leurs encouragements et l'esprit de collaboration qui a accompagné cette aventure universitaire.

Enfin, je remercie chaleureusement ma famille pour son amour, sa patience et son soutien indéfectible, sans lesquels ce travail n'aurait pas été possible.



**Autorisation de déposer un mémoire de Master
pour soutenance**

Je soussigné, l'enseignant (e) :

..... MAI SOUTI Tati Fadhine Mohamed

L'encadrant du mémoire de fin d'études des étudiants :

- 1- FODIL Abdelkrim
- 2- GHERBI Bahia

Ayant le mémoire de fin d'études de Master intitulé :

..... Evolution des Performances Mécaniques

..... Volucompenseur de Carburant - Car. Nafjal, Wilaya

..... de Bouira -

Promotion : 2025/ 2026

Et après voir et consulté le mémoire dans sa forme finale j'autorise les étudiants à
déposer pour la soutenance.

Signature du L'encadrant

Bouira le : 22/06/2026

Chef de département

Bouira le :





التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة): عربي باهي باقاسم الصفة: طالب جامعي
الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 1.1.7.1.3.6.7.4.6 والصادرة بتاريخ: 06-06-2020
المسجل(ة) بكلية العلوم التطبيقية قسم: الهندسة الميكانيكية
والمكلف(ة) بإنجاز مذكرة ماستر فرع: الهندسة الميكانيكية، تخصص: طاقة / إنشاء ميكانيكي.
عنوانها: Analyse des performances météorologique et énergétique des
Volucompteurs en Station - Service
تحت إشراف الأستاذ(ة): منصور محمد يحيى الدين
أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة
في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2020-06-18

توقيع المعني(ة):

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

% 3

النسبة:

الامضاء:





التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد (م): موسى بن عبد السلام الصفة: طالب جامعي
الحامل (ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 101553631 والصادرة بتاريخ: 2016-10-23
المسجل (ة) بكلية العلوم التطبيقية قسم: الهندسة الميكانيكية
والمكلف (ة) بإنجاز مذكرة ماستر فرع: الهندسة الميكانيكية، تخصص: طاقة / إنشاء ميكانيكي.
عنوانها: Analyse des performances météorologiques et énergétiques des
..... Volocompteurs en Station-Service
تحت إشراف الأستاذ (م): محمد تقي الدين
أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة
في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2026-06-18

توقيع المعني (ة) Salim

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

% 3

النسبة:

الامضاء



SOMMAIRE

RÉSUMÉ

ABSTRACT

ملخص

INTRODUCTION GÉNÉRALE..... 1

Chapitre I — Fondements thermophysiques et énergétiques des carburants

Introduction	5
I.1 — Masse volumique, coefficient de dilatation thermique et facteur de correction volumétrique.....	5
I.1.1 — Masse volumique aux conditions de référence et enjeu énergétique.....	5
I.1.2 — Coefficient de dilatation thermique et modélisation de la masse volumique	6
I.1.3 — Facteur de correction volumétrique (CTL/VCF) et passage aux conditions de référence.....	7
I.2 — Sensibilité thermique de la viscosité	8
I.2.1 — Comportement newtonien et grandeurs de viscosité	8
I.2.2 — Sensibilité thermique : modèles d'Arrhenius et de Walther	9
I.2.3 — Dépendance à la pression et incidence métrologique sur les fuites internes ...	10
I.3 — Rappels de mécanique des fluides utiles au mesurage	11
I.3.1 — Conservation de la masse : du débit volumique mesuré à la masse délivrée ..	11
I.3.2 — Régime d'écoulement et nombre de Reynolds.....	11
I.3.3 — Modélisation des fuites internes par l'écoulement de Poiseuille	12

Chapitre II — Le volucompteur Wayne Global Star V : architecture et chaîne métrologique

II.1 — Architecture fluide : du module hydraulique (GHM) à l'organe volumétrique de mesure (iMeter HELIX 6000)	14
II.1.1. Définition fonctionnelle et structure physique du distributeur.....	14
II.1.2. Le conditionnement hydraulique : le module GHM	15
II.1.3. L'organe volumétrique de mesure : l'iMeter HELIX 6000.....	18
II.1.4. Jeux fonctionnels, glissement (slippage) et grandeurs d'influence	19
II.2 — Chaîne de transduction (WIP, effet Hall, k-factor) et ajustage électronique	20
II.2.1. L'émetteur d'impulsions : interface mécanique-magnétique	21
II.2.2. Fondation physique de la transduction : le capteur actif à effet Hall	21

II.2.3. Numérisation et discrimination du sens de rotation	23
II.2.4. Filtrage algorithmique et intégrité du transducteur WIP.....	24
II.2.5. Du facteur d'impulsion (k-factor) à l'affichage métrologique légal	25
II.2.6. L'ajustage électronique : principe, procédure et garanties d'inviolabilité	26

Chapitre III — Modélisation de la dérive thermique et cadre normatif de la conformité

III.1 — Influence de la température sur le volume des hydrocarbures : modélisation thermophysique et quantification métrologique	30
III.1.1 — Modélisation thermophysique de la dilatation volumique des hydrocarbures	30
III.1.2 — Cadre métrologique légal : la référence universelle à 15 °C	31
III.1.3 — Application de la Table 54B de l'ASTM D 1250-08 au gradient climatique de Bouira.....	32
III.1.4 — Quantification de l'erreur volumétrique non compensée	33
III.2 — Phénomènes hydrauliques et de dégazage : analyse qualitative et délimitation du champ d'étude	37
III.2.1 — Pertes de charge, couplage viscosité-température et slippage.....	37
III.2.2 — Dégazage : origine physique et maîtrise par le séparateur centrifuge	38
III.2.3 — Délimitation : rang métrologique de second ordre et contrainte du débit unique.....	39
III.3 — Confrontation biréférentielle : le cadre normatif de la conformité.....	39
III.3.1 — Les deux référentiels d'Erreur Maximale Tolérée.....	40
III.3.2 — Le principe de vérification et l'erreur intrinsèque	40
III.3.3 — Synthèse : confrontation biréférentielle de la dérive thermique	41
III.4 — Propagation des incertitudes (GUM) et formalisation du choc métrologique.....	43
III.4.1 — Loi de propagation de l'incertitude et incertitude élargie.....	43
III.4.2 — Le critère de conformité guard-band et le critère de qualité EMT/3	45
III.4.3 — Le choc métrologique de Bouira.....	46
Conclusion du Chapitre III.....	47

Chapitre IV — Validation expérimentale à la station Naftal R1025 (Bouira)

IV.1 — Présentation du site expérimental et environnement climatique	48
IV.1.1 — Identification du site et compétence métrologique	48

IV.1.2 — Assujettissement légal à la vérification périodique	48
IV.1.3 — Caractéristiques techniques des distributeurs Wayne Global Star V.....	48
IV.1.4 — Analyse climatique de référence : données NASA POWER.....	49
IV.2 — Protocole expérimental et instrumentation étalon	51
IV.2.1 — Étalons de mesure : spécifications et traçabilité métrologique.....	51
IV.2.2 — Procédure de vérification métrologique.....	53
IV.3 — Traitement et analyse des résultats expérimentaux	55
IV.3.1 — Évaluation de l'exactitude métrologique intrinsèque des volucompteurs.....	56
IV.3.2 — Modélisation du biais thermique estival : un préjudice économique	61
IV.4 — Estimation de l'incertitude de mesure composite (Méthode GUM).....	64
IV.4.1 — Principe de la méthode GUM et définition du mesurande	64
IV.4.2 — Évaluation des composantes de Type B et de Type A.....	65
IV.4.3 — Calcul de l'incertitude composée et élargie	67
IV.4.4 — Confrontation aux référentiels légaux : le « Choc Métrologique »	68
IV.5 — Synthèse diagnostique, recommandations et perspectives	71
IV.5.1 — Synthèse diagnostique de la campagne.....	71
IV.5.2 — Recommandations opérationnelles hiérarchisées	72
IV.5.3 — Évaluation économique consolidée du préjudice	73
IV.5.4 — Contributions originales et perspectives normatives	74
Conclusion du Chapitre IV	74
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	75

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 — Évolution du facteur CTL en fonction de la température (essence / gazole, Table 54B ASTM D 1250-08)

Figure I.2 — Sensibilité thermique de la viscosité cinématique de l'essence (échelle semi-logarithmique)

Figure II.1 — Schéma synoptique du circuit hydraulique GHM (cuve → pompe → filtre → dégazeur → iMeter → pistolet)

Figure II.2 — Nomenclature des différentes parties du distributeur Wayne Global Star V/Century

Figure II.3 — Vue interne du module GHM : mesureur iMeter, CPU, poulie et moteur

Figure II.4 — Module GHM assemblé et vue éclatée

Figure II.5 — Vue éclatée de la pompe à palettes du module hydraulique

Figure II.6 — Organe de mesure à pistons rotatifs (iMeter HELIX 6000) — vue en coupe

Figure II.7 — Vue éclatée et coupe en 3D de l'iMeter HELIX 6000

Figure II.8 — WIP : générateur d'impulsions intelligent

Figure III.1 — Dérive volumétrique en fonction de la température, confrontée aux deux EMT ($-3,76\%$ à 45 °C ; $N_{\text{OIML}} = 7,5$; $N_{\text{national}} = 18,8$)

Figure III.2 — Schéma de la confrontation biréférentielle (bandes de tolérance emboîtées $\pm 0,20\%$ / $\pm 0,50\%$)

Figure III.3 — Budget d'incertitude GUM — diagramme de Pareto des contributions à u_c^2

Figure IV.1 — Profil thermique annuel de Bouira — NASA POWER 2025 (pic $43,23\text{ °C}$, DOY 195)

Figure IV.2 — Schéma de la procédure de jaugeage par transvasement (jauge étalon 20 L)

Figure IV.3 — Erreurs moyennes des 18 pistolets confrontées aux seuils $\pm 0,20\%$ et $\pm 0,50\%$

Figure IV.4 — Dispersion de la répétabilité par groupe de pistolets (diagramme à moustaches)

Figure IV.5 — Le « choc métrologique » : chevauchement de $U(E) = \pm 0,269 \%$ avec l'EMT nationale (figure signature)

Figure IV.6 — Préjudice économique : dérive mécanique (annuel) vs biais thermique estival (saisonnier)

Figure IV.7 — Cycle de surveillance métrologique biannuel (organigramme Avril → Été → Octobre)

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1 — Évolution du facteur de correction de volume (CTL) en fonction de la température observée — Extraction de la Table 54B [B10]

Tableau III.2 — Bilan des dérives volumétriques non compensées pour une transaction de 1 000 litres — Conditions climatiques extrêmes de la wilaya de Bouira

Tableau III.3 — Confrontation biréférentielle : référentiels OIML et national face à la dérive thermique (essence sans plomb, 45 °C, référence 15 °C)

Tableau III.4 — Budget d'incertitude consolidé de la chaîne de vérification (jaugeage par transvasement de 20 L, pire cas, $k = 2$)

Tableau IV.1 — Paramètres constructeur du Wayne Global Star V

Tableau IV.2 — Caractéristiques métrologiques de la chaîne thermométrique

Tableau IV.3 — Résultats détaillés : Pistolets N° 1 et N° 2 (Gazole)

Tableau IV.4 — Résultats synthétiques : Pistolets N° 3 à 10 (Groupe optimal)

Tableau IV.5 — Résultats synthétiques : Pistolets N° 11 à 18 (Filtration dégradée)

Tableau IV.6 — Confrontation biréférentielle : conformité OIML et nationale des 18 pistolets

Tableau IV.7 — Biais thermique Ethern selon le scénario de température

Tableau IV.8 — Budget des incertitudes de Type B (Campagne 19/10/2025 — jaugeage 20 L, $T_j = 23,5$ °C)

Tableau IV.9 — Budget GUM complet (Pire cas — Pistolet N° 15, gazole)

Tableau IV.10 — Zones d'indétermination biréférentielles (enveloppe conservatrice, $U(E) = 0,269$ %)

NOMENCLATURE

Abréviations et sigles

Sigle	Désignation
OIML	Organisation Internationale de Métrologie Légale
OAM	Office Algérien de Métrologie (créé par le Décret exécutif n° 24-276 de 2024)
ONML	Office National de Métrologie Légale (entité historique, remplacée par l'OAM)
ARH	Autorité de Régulation des Hydrocarbures
EMT	ErreurMaximaleTolérée
GUM	Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (JCGM 100)
VIM	Vocabulaire International de Métrologie (JCGM 200)
CTL	Correction for Temperature on Liquid (facteur de correction volumétrique en température)
VCF	Volume Correction Factor (facteur de correction de volume)
CPL	Correction for Pressure on Liquid
ATC	AutomaticTemperature Compensation (compensation automatique de température)
Igem	intelligent Global Electronic Module (calculateur Wayne)
WIP	Wayne Intelligent Pulser (transducteur d'impulsions)
GHM	GroupeHydraulique de Mesure
WELMEC	European Cooperation in Legal Metrology
ASTM	American Society for Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
JCGM	Joint Committee for Guides in Metrology
JORADP / JORA	Journal Officiel de la République Algérienne (Démocratique et Populaire)
GPL-c	Gaz de Pétrole Liquéfié — carburant
TUR	Test Uncertainty Ratio (rapport de capacité de la vérification)
DOY	Day Of Year (quantième de l'année)

Symboles

Symbole	Désignation
P	Masse volumique du carburant ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ρ_{15}	Masse volumique aux conditions de référence (15 °C)
B	Coefficient de dilatation volumique du liquide ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
α_{60}	Coefficient de dilatation thermique de la Table 54B (ASTM D 1250-08)
T	Température du liquide ($^{\circ}\text{C}$)
CTL	Facteur de correction volumétrique $V_{15} / V_{\square}$
N	Viscosité cinématique ($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, cSt)
Q	Débit volumique (Q_{min} , Q_{n} , Q_{max})
E	Erreur relative de mesure (%)
$\bar{E}$	Erreur relative moyenne d'un pistolet (%)
S	Écart-type expérimental de répétabilité (%)
N	Nombre de mesures ou facteur d'amplification thermique
u_A, u_B	Incertitudes-types de Type A et de Type B (%)
u_c	Incertitude-type composée (%)
K	Facteur d'élargissement ($k = 2$ au niveau de confiance 95 %)
U(E)	Incertitude élargie de l'erreur de mesure (%)
ΔV	Écart de volume mesuré (L, mL)

RÉSUMÉ

Ce mémoire évalue les performances métrologiques des volucompteurs de carburant Wayne Global Star V exploités par Naftal à la station R1025 de la wilaya de Bouira. La problématique est la suivante : ces appareils respectent-ils simultanément la tolérance internationale (OIML R 117-1:2019, $\pm 0,50$ %) et la tolérance nationale algérienne, plus stricte ($\pm 0,20$ %), compte tenu de la dilatation thermique des carburants sous le climat de Bouira, où les températures dépassent régulièrement 40 °C en été ?

Pour y répondre, une démarche biréférentielle a été adoptée : chaque résultat est confronté simultanément aux deux seuils réglementaires. La dérive thermique est quantifiée à partir des tables de correction volumétrique ASTM D 1250-08 et des données climatiques NASA POWER, puis une campagne de vérification a été menée sur les 18 pistolets de la station (144 points de mesure), chaque résultat étant assorti d'une évaluation de l'incertitude selon la méthode GUM.

Les résultats montrent que l'ensemble du parc est conforme au seuil international, mais que l'incertitude propre à la chaîne de vérification (0,269 %) dépasse le seuil national (0,20 %), rendant la conformité nationale impossible à démontrer avec certitude, pour l'ensemble des pistolets et non les seuls plus dégradés. Par ailleurs, l'absence de compensation automatique de température engendre, en été, une perte estimée à environ 774 000 DA par saison pour la station. L'étude recommande de renforcer les moyens de vérification, plutôt que d'assouplir la norme nationale, ainsi que l'installation prioritaire de correcteurs automatiques de température sur les pistolets essence.

Mots-clés : volucompteur ; mesureur à déplacement positif ; métrologie légale ; OIML R 117 ; Arrêté du 15 juin 1992 ; confrontation biréférentielle ; incertitude de mesure ; méthode GUM ; dilatation thermique ; correction CTL/VCF ; ASTM D 1250-08 ; NASA POWER ; compensation automatique de température (ATC) ; OAM ; Naftal ; Bouira.

ABSTRACT

This dissertation evaluates the metrological performance of Wayne Global Star V fuel dispensers (iMeter HELIX 6000 meter, GHM hydraulic module, WIP transducer, iGEM calculator) operated by Naftal at station R1025 in the wilaya of Bouira. A dual-reference approach is adopted: every result is assessed simultaneously against the international maximum permissible error of ± 0.50 % [OIML R 117-1:2019] and the national MPE of ± 0.20

% — 2.5 times stricter — set by the interministerial decree of 15 June 1992 and kept in force by Article 46 of Law No. 17-09 of 27 March 2017 under the authority of the Algerian Metrology Office (OAM).

Thermal modelling, based on the CTL/VCF volume correction factors of the ASTM D 1250-08 tables (Table 54B) and on NASA POWER satellite climate data, establishes a thermal-expansion volumetric drift of 3.76 % at 45 °C — the peak summer temperature recorded in Bouira — i.e. an amplification factor of 18.8 times the national MPE and 7.5 times the international MPE. In a representative summer scenario (32 °C), the uncompensated thermal bias reaches 2.04 % ($10.2 \times$ the national MPE); applied to the station's gasoline volume alone at the official ARH 2026 tariff (47 DA/L), this represents a seasonal loss of about 518,000 DA per summer.

The field campaign of 19 October 2025 (18 nozzles, 144 measurement points) shows universal conformity with the OIML MPE of ± 0.50 %. The dual -reference reading nonetheless reveals that nozzles No. 11, 13 and 17 ($\bar{\epsilon} = 0.20$ %) and nozzle No. 15 ($\bar{\epsilon} = 0.17$ %) sit exactly at the national MPE limit, owing to partial clogging of their filters. The expanded uncertainty computed by the GUM method [JCGM 98-3:2008] is $U(E) = 0.269$ % ($k = 2, 95$ %). Adequate with respect to the OIML MPE (0.269 % < 0.50 %), it exceeds the national MPE (0.269 % > 0.20 %), making any conformity decision against the national reference undecidable — not only for the critical nozzles but for the entire fleet. This "metrological shock" — a technically sound fleet, universally certifiable internationally, yet which the field verification chain cannot declare compliant with national law — constitutes the central original contribution of the dissertation.

The recommendations are the immediate replacement of the filters on nozzles 11–18, the recalibration of nozzles 11/13/15/17 by K-factor adjustment via the iGEM Weights & Measures mode, and the priority installation of automatic temperature compensation (ATC) devices compliant with [OIML R 117-1:2019] on the eight gasoline nozzles. The study further identifies a regulatory gap between the 1991-1992 Algerian mechanical-sealing framework and the software-protection requirements of [WELMEC 10.6:2019], and concludes that strengthening the verification means — rather than relaxing the national MPE — is the appropriate path to regulatory upgrading.

Keywords: fuel dispenser; positive-displacement meter; legal metrology; OIML R 117; decree of 15 June 1992; dual-reference comparison; measurement uncertainty; GUM method;

thermal expansion; CTL/VCF correction; ASTM D 1250-08; NASA POWER; automatic temperature compensation (ATC); OAM; Naftal; Bouira.

ملخص

تتناول هذه المذكرة تقييم الأداء المتروولوجي لموزّعات الوقود من طراز Wayne Global Star V (العداد iMeter HELIX 6000، الوحدة الهيدروليكية GHM، الناقل WIP، الحاسوب iGEM) التي تستغلها مؤسسة نفطال في المحطة R1025 بولاية البويرة. اعتمدت في الدراسة مقارنة ثنائية المرجعية: إذ يُواجه كلّ نتيجة في أن واحد بالخطأ الأقصى المسموح به الدولي البالغ [OIML R 117-1:2019] $\pm 0,50\%$ وبالخطأ الأقصى المسموح به الوطني البالغ $\pm 0,20\%$ وهو أشدّ بمعامل 2,5 مرّة — المفروض بموجب القرار الوزاري المشترك المؤرخ في 15 جوان 1992، والمُبقى عليه ساري المفعول بموجب المادة 46 من القانون رقم 17-09 المؤرخ في 27 مارس 2017 تحت سلطة الديوان الجزائري للمترولوجيا. (OAM).

تُثبت النمذجة الحرارية، المبنية على معاملات تصحيح الحجم CTL/VCF لجدول ASTM D 1250-08 (الجدول 54B) وعلى المعطيات المناخية الساتلية NASA POWER، انحرافاً حقيقياً ناتجاً عن التمدد الحراري قدره $3,76\%$ عند 45°C — وهي أقصى درجة حرارة صيفية مسجلة بالبويرة — أي بمعامل تضخيم يبلغ $18,8\%$ مرّة الخطأ الوطني و $7,5\%$ مرّة الخطأ الدولي. وفي سيناريو صيفي نموذجي (32°C)، يبلغ الانحياز الحراري غير المُعوّض $2,04\%$ ($10,2$) ضعف الخطأ الوطني (؛ ومنسوبةً إلى حجم البنزين وحده بالمحطة وبالسعر الرسمي لسلطة ضبط المحروقات (ARH) لسنة 47) 2026 دج/ل، يُمثّل ذلك ضرراً صيفياً في حدود $518\ 000$ دج للموسم الواحد.

كشفت الحملة التجريبية المنجزة في 19 أكتوبر 18) 2025 مسدّساً، 144 نقطة قياس (عن مطابقة شاملة للخطأ الأقصى المسموح به وفق $(\pm 0,50\%)$ OIML غير أنّ القراءة ثنائية المرجعية تُبيّن أنّ المسدّسات رقم 11 و 13 و 17 (متوسّط الخطأ $(0,20\% = \text{المسدّس رقم } 15)$ متوسّط الخطأ $(0,17\% = \text{تقع عند الحدّ الدقيق للخطأ الوطني، نتيجة انسداد جزئي لمصافيها. ويبلغ عدم اليقين الموسّع المحسوب بطريقة GUM [JCGM 98-3:2008] قيمة } U(E) = 2$ ($k = 2$) $0,269\%$ ، بمستوى ثقة (95%) ، وإن كان ملائماً إزاء الخطأ الدولي $(0,50\% > 0,269\%)$ ، يتجاوز الخطأ الوطني $(0,20\% > 0,269\%)$ ، مما يجعل أيّ قرار مطابقة بالنسبة إلى المرجعية الوطنية غير قابل للحسم — لا بالنسبة إلى المسدّسات الحرجة فحسب، بل بالنسبة إلى المنظومة بأكملها. وتُشكل هذه «الصدمة المتروولوجية — منظومة سليمة تقنياً، قابلةً للاعتماد دولياً بصفة شاملة، لكنّ سلسلة التحقّق الميدانية عاجزة عن إعلان مطابقتها للقانون الوطني — المساهمة الأصلية المركزية لهذه المذكرة.

تنصّب التوصيات على الاستبدال الفوري لمصافي المسدّسات 11-18، وإعادة معايرة المسدّسات 11/13/15/17 عبر تعديل المعامل K باستعمال نمط «الأوزان والمقاييس» للحاسوب iGEM، والتركيّب ذي الأولوية لأجهزة التعويض الحراري التلقائي (ATC) (المطابقة لـ [OIML R 117-1:2019] على المسدّسات الثمانية المخصّصة للبنزين. كما تُحدّد الدراسة فراغاً تنظيمياً بين إطار الختم الميكانيكي الجزائري لسنتي 1991-1992 ومتطلبات الحماية البرمجية لدليل [WELMEC 10.6:2019]، وتخلص إلى أنّ تعزيز وسائل التحقّق — لا التخفيف من الخطأ الوطني — هو السبيل الملائم للارتقاء بالمنظومة التنظيمية.

الكلمات المفتاحية: موزّع الوقود؛ عدّاد بالإزاحة الموجبة؛ المترولوجيا القانونية؛ OIML R 117؛ قرار 15 جوان 1992؛ المواجهة ثنائية المرجعية؛ عدم اليقين في القياس؛ طريقة GUM؛ التمدّد الحراري؛ تصحيح CTL/VCF؛ ASTM D 1250-08؛ NASA POWER؛ التعويض الحراري التلقائي (ATC)؛ OAM؛ نفضال؛ البويرة.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Contexte énergétique et métrologique

En l'absence de compensation automatique de température, un volucompteur de carburant exploité dans les conditions estivales de la wilaya de Bouira génère un biais volumétrique pouvant atteindre 2,04 % — soit 4,1 fois l'Erreur Maximale Tolérée fixée par la recommandation internationale OIML R 117-1:2019 et 10,2 fois le seuil national algérien. Cette réalité physique, loin de résulter d'une défaillance instrumentale, est la conséquence directe et inéluctable des lois de la thermodynamique appliquée aux fluides hydrocarbonés.

Depuis l'introduction des premières pompes à jaugeur mécanique dans les années 1920, les systèmes de distribution de carburant ont connu une transformation profonde, culminant avec l'avènement des volucompteurs électroniques à transducteurs d'impulsions haute résolution. Or cette sophistication instrumentale se heurte invariablement à la sensibilité thermique intrinsèque des fluides mesurés. Le coefficient de dilatation volumique isobare — évalué à $1,2 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ pour l'essence sans plomb et à $0,9 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ pour le gazole[1,2] [Çengel&Boles ; Guibet, BE 8 545/546, *Techniques de l'Ingénieur*] — fait de chaque degré Celsius une source d'erreur volumétrique systématique sur la quantité effectivement distribuée.

Ce phénomène atteint sa dimension la plus critique dans le contexte climatique de la wilaya de Bouira. Caractérisée par un régime semi-aride aux amplitudes thermiques prononcées, cette région enregistre des températures estivales dépassant régulièrement 40 °C, comme l'attestent les séries temporelles de la base satellitaire NASA POWER. Sous de telles contraintes environnementales, la compensation thermique cesse d'être une option d'ingénierie pour devenir une exigence absolue d'exactitude métrologique. C'est dans ce milieu particulièrement exigeant qu'opèrent les distributeurs Wayne Global Star V — intégrant le mesureur volumétrique iMeter HELIX 6000, le module hydraulique GHM, le transducteur WIP et le calculateur iGEM — déployés par Naftal dans la wilaya de Bouira, et qui constituent l'instrument d'analyse central du présent mémoire.

Enjeux économiques et réglementaires

Les conséquences de ces dérives thermophysiques dépassent le strict cadre de la rigueur instrumentale pour soulever des enjeux économiques et sociétaux de premier ordre. Une dérive de 3,76 % à la température maximale estivale de 45 °C signifie qu'une transaction de

20 litres délivrée à chaud n'équivaut, en volume ramené à la température de référence de 15 °C, qu'à 19,25 litres : le consommateur, facturé pour 20 litres, reçoit 752 millilitres de moins en contenu énergétique réel. À l'échelle d'une station-service distribuant quotidiennement 6 000 litres d'essence, et au tarif officiel ARH 2026 de 47 dinars le litre, le préjudice estival engendré par l'absence de compensation thermique (biais de 2,04 % à 32 °C) atteint près de 518 000 dinars par saison pour le seul volume essence. Cette quantification démontre que la métrologie légale, au-delà de sa fonction de surveillance administrative, est la garante directe du pouvoir d'achat du citoyen, en pleine résonance avec les impératifs de la Loi n° 09-03 du 25 février 2009 relative à la protection du consommateur et à la répression des fraudes.

L'exercice de cette mission régalienne incombe à l'Office Algérien de Métrologie (OAM), désignation officielle promulguée par le Décret exécutif n° 24-276 du 13 août 2024, qui succède à l'ONML — actif de 1986 à 2024. L'action de cette autorité s'appuie sur le Système National de Métrologie régi par la Loi n° 17-09 du 27 mars 2017 et structuré sur le terrain par le Décret exécutif n° 91-538 du 25 décembre 1991. C'est au cœur de cet arsenal législatif que réside la tension réglementaire centrale du présent mémoire. L'Arrêté interministériel du 15 juin 1992, JORA n° 86, maintenu en vigueur par l'article 46 de la Loi 17-09, impose une Erreur Maximale Tolérée nationale de $\pm 0,20$ % — seuil qui s'inscrit dans une cohérence systémique remarquable en s'alignant sur l'exigence applicable aux cuves de stockage. Ce niveau d'intransigeance entre cependant en confrontation directe avec la recommandation OIML R 117-1:2019, qui autorise une tolérance de $\pm 0,50$ %, soit 2,5 fois plus permissive. La question analytique centrale se pose alors avec acuité : ces deux seuils sont-ils simultanément respectables sur un volucompteur non compensé thermiquement dans les conditions climatiques de Bouira ?

Objectifs et démarche scientifique

Face à cette dualité normative, la problématique centrale du présent mémoire s'énonce comme suit : *les volucompteurs Wayne Global Star V déployés par Naftal dans la wilaya de Bouira respectent-ils simultanément l'EMT nationale de $\pm 0,20$ % et l'EMT internationale de $\pm 0,50$ % dans les conditions thermodynamiques réelles de leur exploitation, et dans quelle mesure les paramètres énergétiques — dérive thermique au premier rang, pertes de charge et dégazage — contribuent-ils à l'erreur de mesure totale ?* L'originalité méthodologique de cette recherche réside dans l'adoption d'une approche biréférentielle rigoureuse : chaque résultat expérimental est confronté aux deux référentiels normatifs simultanément, révélant des conflits de conformité qu'une analyse monorégime aurait inévitablement occultés.

Pour instruire cette problématique, la démarche mobilise un corpus d'outils analytiques normalisés. La dérive thermique est quantifiée à partir des facteurs de correction volumétrique ASTM D 1250-08, Table 54B pour les produits raffinés généralisés, croisés avec les profils climatiques de la base satellitaire NASA POWER pour la wilaya de Bouira. L'évaluation de la qualité métrologique des résultats repose sur la méthode GUM de JCGM 98-3:2008, permettant la synthèse rigoureuse des incertitudes par propagation quadratique. Les essais de vérification sont conduits à l'aide d'une jauge étalon conforme à OIML R 120:2010, selon le protocole national de OAM/ONDEFOC, sous les exigences de performance édictées par OIML R 117-1:2019 et OIML R 117-2:2019.

La déclinaison de cette démarche poursuit quatre objectifs spécifiques, en cohérence directe avec l'architecture du mémoire. Premièrement, il s'agit d'établir le socle thermophysique et énergétique qui quantifie la sensibilité des carburants liquides aux contraintes thermiques et démontre que la dérive estivale génère des facteurs d'amplification susceptibles d'invalidier toute conformité simultanée aux deux référentiels. Deuxièmement, le mémoire caractérise l'architecture métrologique complète du Wayne Global Star V comme chaîne de transduction intégrée, de l'iMeter HELIX 6000 au calculateur iGEM. Troisièmement, il modélise et hiérarchise les sources de dérive — la dilatation thermique au premier rang, les pertes de charge et le dégazage étant écartés par une délimitation explicite du champ d'étude — par application des facteurs de correction CTL tabulaires et de la méthode GUM, puis inscrit ce résultat dans le cadre normatif de la confrontation biréférentielle : EMT OIML $\pm 0,50$ % contre EMT nationale $\pm 0,20$ %, protocole de vérification et exigences de scellement logiciel du guide WELMEC 10.6:2019. Quatrièmement, il valide expérimentalement ces modèles par une campagne de vérification métrologique sur dix-huit pistolets de la station Naftal R1025 (19 octobre 2025), quantifie le choc métrologique et le préjudice thermique estival, et formule les recommandations opérationnelles et réglementaires qui en découlent pour l'opérateur et pour le régulateur.

Organisation du mémoire

La progression de ce mémoire obéit à une logique de démonstration construite en quatre chapitres solidaires. Le premier chapitre établit les fondements thermophysiques et énergétiques des carburants liquides ainsi que les rappels de mécanique des fluides utiles au mesurage — socle sans lequel aucune analyse de dérive métrologique ne peut être conduite avec rigueur. Ce corpus théorique prépare le deuxième chapitre, qui décrit l'architecture métrologique du Wayne Global Star V, de l'iMeter HELIX 6000 à l'iGEM, comme chaîne de

transduction intégrée. Ces bases physiques et instrumentales réunies permettent, au troisième chapitre, de modéliser la dérive volumétrique par dilatation thermique, d'en évaluer l'incertitude par la méthode GUM, et de l'inscrire dans le cadre normatif et légal de la conformité : c'est là que le système métrologique algérien — de l'Arrêté de 1992 à l'OAM institué en 2024 — est confronté, sous une forme compacte, aux exigences internationales de l'OIML. C'est au quatrième et dernier chapitre qu'aboutit l'ensemble de la démonstration : la campagne expérimentale conduite à la station Naftal R1025 livre le verdict biréférentiel, quantifie le préjudice thermique et formule les recommandations qui en découlent pour l'opérateur et pour le régulateur.

CHAPITRE I — FONDEMENTS THERMOPHYSIQUES ET ÉNERGÉTIQUES DES CARBURANTS

Introduction

L'intégrité des transactions commerciales sur les carburants repose, en dernière analyse, sur la nature physique du fluide mesuré. Les hydrocarbures liquides présentent des propriétés thermophysiques — masse volumique, dilatation volumique, viscosité — fortement dépendantes de la température. Or la transaction en station-service s'effectue au litre, c'est-à-dire en volume, tandis que la valeur commerciale et énergétique réellement transférée est portée par la masse : toute variation de température non compensée introduit ainsi une dérive métrologique structurelle. Le présent chapitre établit les fondements thermophysiques et énergétiques nécessaires à la compréhension puis à la quantification de cette dérive. La Section I.1 traite de la masse volumique, du coefficient de dilatation thermique et du facteur de correction volumétrique ; la Section I.2 caractérise la sensibilité thermique de la viscosité, qui gouverne les fuites internes de l'organe mesureur ; la Section I.3 rappelle les relations de mécanique des fluides utiles au mesurage volumétrique.

Le cadre normatif et légal — erreurs maximales tolérées, référentiels OIML et national, protocole de vérification — fait l'objet du Chapitre III. Par délimitation explicite du champ d'étude, la modélisation analytique des transferts thermiques sol-cuve est écartée : le gradient thermique réellement subi par le carburant est caractérisé empiriquement par la campagne expérimentale (Chapitre IV), les paramètres génériques d'un modèle de conduction dans le sol n'apportant aucune plus-value métrologique à la question étudiée.

I.1 — Masse volumique, coefficient de dilatation thermique et facteur de correction volumétrique

I.1.1 — Masse volumique aux conditions de référence et enjeu énergétique

La masse volumique constitue la grandeur pivot de la comptabilité pétrolière. Les spécifications normatives européennes l'encadrent strictement à la température de référence de 15 °C. Pour les essences sans plomb de type Eurosuper, la norme EN 228 fixe une plage de 720,0 à 775,0 kg·m⁻³ [3][C9] ; pour le gazole routier, la norme EN 590 retient une plage de 820,0 à 845,0 kg·m⁻³ [4][C10]. Les spécifications techniques générales admettent des plages légèrement élargies — respectivement 720 à 780 et 820 à 860 kg·m⁻³ [2][B1] — la norme

produit étant plus restrictive que la spécification générale, distinction métrologiquement significative lors du choix des valeurs de référence pour l'évaluation de la conformité.

La centralité métrologique de la masse volumique tient à son lien proportionnel direct avec le pouvoir calorifique inférieur volumique. La distribution s'effectuant au litre, la quantité d'énergie réellement délivrée à l'utilisateur s'écrit [2][B1, §2.2.2] :

$$P_{CI_v} = \rho \cdot P_{CI_m} \quad (I.1)$$

où P_{CI_v} [kJ· m⁻³] est le pouvoir calorifique inférieur volumique, ρ [kg· m⁻³] la masse volumique aux conditions de délivrance et P_{CI_m} [kJ· kg⁻¹] le pouvoir calorifique inférieur massique. Lorsque la masse volumique croît, P_{CI_m} décroît légèrement tandis que P_{CI_v} augmente significativement [2][B1] : le consommateur a donc un intérêt objectif à acquérir, à volume facturé égal, un carburant de masse volumique maximale compatible avec les spécifications, gage d'un meilleur contenu énergétique par litre. Toute variation non compensée de ρ au point de mesurage se traduit en conséquence par une distorsion énergétique directe de la transaction.

I.1.2 — Coefficient de dilatation thermique et modélisation de la masse volumique

La masse volumique des hydrocarbures liquides est intrinsèquement instable sous l'effet de la température. Cette sensibilité est thermodynamiquement formalisée par le coefficient de dilatation volumique à pression constante β , qui mesure la variation relative du volume massique v — ou, de manière équivalente, la décroissance de la masse volumique ρ — en réponse à une élévation thermique [1,5][A1, §5.1 ; A3, §12.4.4] :

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right) P = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) P \quad (I.2)$$

où v [m³· kg⁻¹] est le volume massique, ρ [kg· m⁻³] la masse volumique et T [K] la température thermodynamique. Pour les produits pétroliers bruts et raffinés, la norme ISO 91 rapporte des facteurs de dilatation α_{60} compris entre $414,0 \times 10^{-6}$ et $1\,674,0 \times 10^{-6}$ °C⁻¹ [6][C7, Tab. 1]. À titre de comparaison, l'eau présente des valeurs de β nettement inférieures sur la même gamme — de l'ordre de $19,1 \times 10^{-5}$ K⁻¹ à 20 °C à $67,5 \times 10^{-5}$ K⁻¹ à 80 °C [7][A2, Fig. D.5] — confirmant que la dilatabilité thermique des hydrocarbures est structurellement et considérablement supérieure à celle de l'eau dans le domaine de températures rencontré en station-service.

Au voisinage des conditions de référence, l'évolution de la masse volumique des essences est décrite par la relation empirique linéaire [2][B1, §3.1.1] :

$$\rho_T = \rho_{15} - k (T - 15) \quad (I.3)$$

où ρ_T [kg·L⁻¹] est la masse volumique à la température d'exploitation T [°C], ρ_{15} la masse volumique de référence à 15 °C et k le facteur de correction thermique, égal en moyenne à 0,000 85 kg·L⁻¹·°C⁻¹ pour les essences. Cette relation établit qu'une élévation de 10 °C — un passage de 15 à 25 °C, par exemple — engendre une diminution de la masse volumique d'environ 1 % [2][B1, §3.1.1]. La non-constance de β , qui croît avec la température pour les produits légers, limite toutefois la validité de cette linéarisation aux faibles écarts ; au-delà, le recours aux tables de correction normalisées s'impose, comme exposé ci-après.

I.1.3 — Facteur de correction volumétrique (CTL/VCF) et passage aux conditions de référence

La conséquence métrologique de la dilatation thermique se formalise par le facteur de correction volumétrique (VCF), ou facteur de correction en température du liquide (CTL) au sens des tables pétrolières. La conservation de la masse impose $\rho_T V_T = \rho_{15} V_{15}$ entre la température de délivrance t et la température de référence ; il en résulte [6,8][C7 ; C8] :

$$CTL = \frac{V_{15}}{V_T} = \frac{\rho_T}{\rho_{15}} \approx 1 - \beta (T - 15) \quad (I.4)$$

où V_T est le volume mesuré à la température t et V_{15} le volume équivalent ramené à 15 °C. Pour $T > 15$ °C, le carburant étant dilaté, $CTL < 1$: un litre délivré à chaud représente moins d'un litre — et donc une masse et un contenu énergétique moindres — aux conditions de référence. La détermination numérique du CTL s'effectue à partir des tables de correction normalisées (Figure I.1) [6][C7], dont l'application quantifiée au cas d'étude est développée au Chapitre III. La correction de pression associée (CPL) demeure quant à elle métrologiquement négligeable aux pressions de refoulement des circuits de distribution [8][C8], de sorte que la température constitue, et de loin, le facteur d'influence dominant.

L'implication est fondamentale pour la suite du mémoire. En l'absence de dispositif de compensation automatique de température (ATC) — non généralisé dans les stations-service conventionnelles considérées — le volucompteur facture le volume brut V_T et non le volume corrigé V_{15} . L'exactitude énergétique de la transaction devient alors entièrement tributaire du

gradient thermique subi par le carburant entre la cuve et le pistolet, dont la caractérisation expérimentale fait l'objet du Chapitre IV.

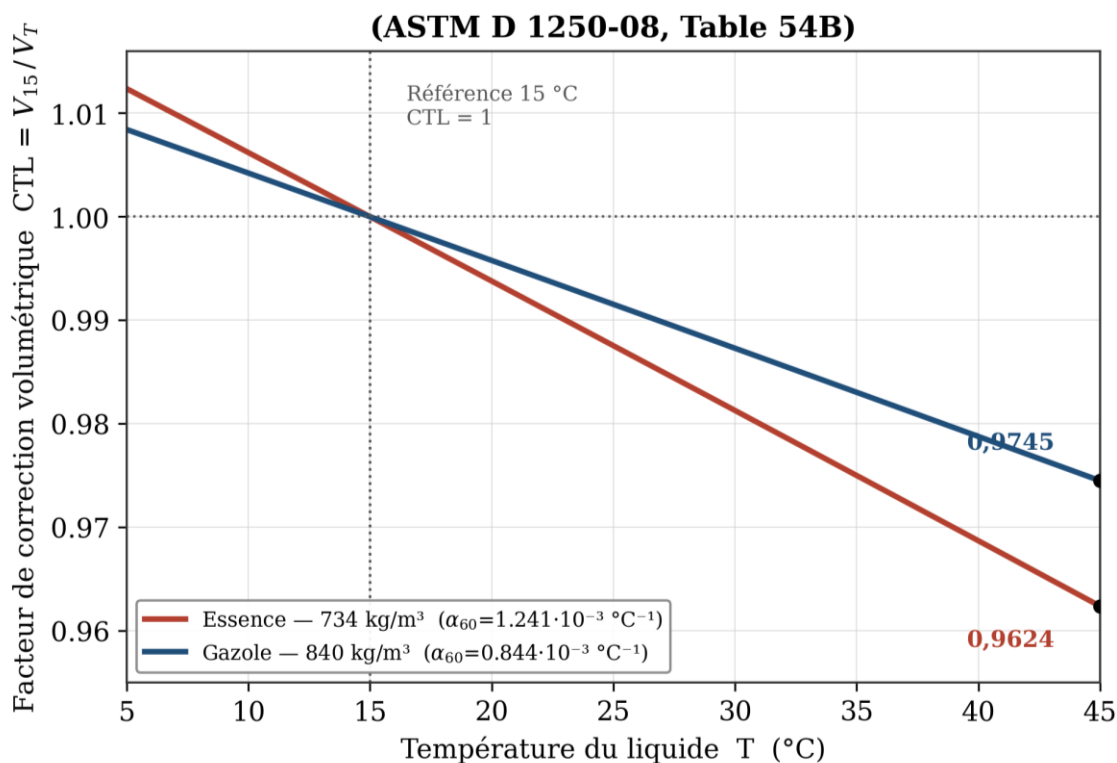


FIGURE I.1 : Évolution du facteur CTL en fonction de la température (essence / gazole, Table 54B ASTM D 1250-08).

I.2 — Sensibilité thermique de la viscosité

I.2.1 — Comportement newtonien et grandeurs de viscosité

La dynamique de l'écoulement au sein de l'organe mesureur — pertes de charge, glissement aux interfaces des pistons rotatifs, fuites internes — est directement gouvernée par la rhéologie du fluide. Les carburants pétroliers appartiennent à la classe des liquides purs micromoléculaires, strictement newtoniens [9,1][B3, §3.1 ; A1, §6.1]. Ce comportement se caractérise par une proportionnalité linéaire entre la contrainte de cisaillement τ et le gradient transversal de vitesse, exprimée par la loi de Newton[1, 9, 10][A1, §1.4 ; B3, §1.1 ; B4, §2.3] :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (I.5)$$

où τ [Pa] est la contrainte de cisaillement visqueux et μ [Pa·s] la viscosité dynamique, dont l'unité légale est le pascal-seconde, l'unité CGS étant le poise (1 P = 10⁻¹ Pa·s) [9][B3,

§1.2]. En ingénierie de la mesure, il est d'usage de recourir à la viscosité cinématique ν , définie par le rapport :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (I.6)$$

dont l'unité légale est le $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, l'unité CGS étant le stokes ($1 \text{ St} = 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) [9][B3, §1.2]. Le caractère newtonien autorise l'emploi direct des corrélations classiques de pertes de charge et du nombre de Reynolds (Section I.3), μ et ν intervenant comme paramètres pleinement déterminés à température donnée.

I.2.2 — Sensibilité thermique : modèles d'Arrhenius et de Walther

La viscosité des carburants subit une décroissance exponentielle majeure sous l'effet de la température. Un premier modèle fondamental, dit d'Arrhenius, relie la viscosité à la température thermodynamique [9][B3, §1.5] :

$$\eta = A \exp(E_p/(k T)) \quad (I.7)$$

où A et E_p sont des constantes caractéristiques du liquide, k la constante de Boltzmann et T [K] la température thermodynamique. La formule empirique de Walther, d'usage plus répandu pour les produits pétroliers, généralise cette dépendance [10][B4, §2.5.2.2] :

$$\mu = \mu_0 \exp((T_0/T)^m) \quad (I.8)$$

où μ_0 et T_0 sont des paramètres de référence et m une constante propre au liquide. En ordre de grandeur, la sensibilité thermique de la viscosité dynamique d'un liquide s'établit entre 0,5 % et 10 % par degré Celsius [9][B3, §1.5] ; à titre d'illustration, la viscosité dynamique de l'eau est divisée par un facteur quatre entre 7 et 80 °C [7][A2, §5.5.1]. Pour les carburants, la viscosité cinématique de l'essence chute d'environ $0,8 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ à 0 °C à environ $0,4 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ à 100 °C [10][B4, Fig. 5] ; pour le gazole routier, la spécification normative impose une viscosité cinématique comprise entre 2,00 et 4,50 $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ à 40 °C [4][C10]. Cette dépendance thermique marquée est déterminante pour le mesurage : aux températures estivales élevées du climat semi-aride considéré, l'effondrement de la viscosité des essences modifie sensiblement les conditions d'écoulement interne du mesureur.

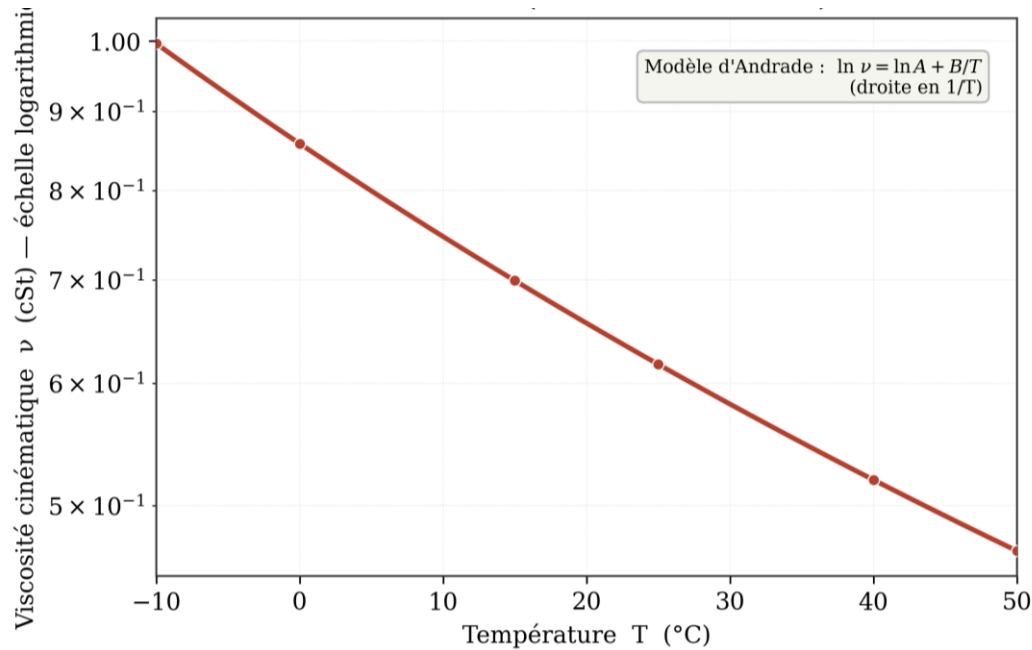


FIGURE I.2 : Sensibilité thermique de la viscosité cinématique de l'essence.

I.2.3 — Dépendance à la pression et incidence métrologique sur les fuites internes

La viscosité présente également une dépendance à la pression, d'amplitude bien moindre, modélisée par [1][A1, §1.4] :

$$\frac{\mu_p}{\mu_{p_0}} = \alpha^{p - p_0} \quad (\text{I.9})$$

où le coefficient $\alpha \approx 1,003$ pour les huiles minérales. Bien que physiquement réel — une augmentation de pression de l'ordre de 100 MPa est nécessaire pour accroître la viscosité de 50 % pour certains liquides[9][B3, §1.5] — cet effet demeure métrologiquement négligeable dans les gammes de pression des circuits de distribution de carburant.

L'incidence métrologique de la sensibilité thermique de la viscosité se manifeste au niveau des jeux fonctionnels de la chambre de mesure. Les interstices inévitables entre rotors, et entre rotors et carter, sont le siège de micro-écoulements de fuite — ou glissement (*slippage*) — dont le débit est, comme l'établira la Section I.3, inversement proportionnel à la viscosité dynamique. La chute drastique de μ lors des fortes chaleurs amplifie donc le débit de fuite non mesuré : une fraction du carburant traverse l'organe mesureur sans entraîner la rotation des pistons, générant une erreur métrologique systématique par défaut, au détriment du distributeur. La modélisation quantitative de ce phénomène par l'écoulement de Poiseuille fait l'objet de la Section I.3.

I.3 — Rappels de mécanique des fluides utiles au mesurage

Les propriétés thermophysiques établies aux Sections I.1 et I.2 n'acquièrent leur portée métrologique qu'à travers la dynamique de l'écoulement dans l'organe mesureur. La présente section rappelle l'ensemble minimal de relations reliant ces propriétés au mesurage volumétrique : la conservation de la masse, qui distingue le volume mesuré de la masse réellement délivrée ; le nombre de Reynolds, qui caractérise le régime d'écoulement et sa dépendance thermovisqueuse ; et l'écoulement de Poiseuille, qui modélise les fuites internes responsables d'une erreur systématique. Le dimensionnement énergétique complet du circuit (bilan de pompe, traitement détaillé des pertes de charge) est écarté par délimitation du champ d'étude, n'étant pas déterminant pour la question métrologique traitée.

I.3.1 — Conservation de la masse : du débit volumique mesuré à la masse délivrée

Le principe de conservation de la masse fonde toute modélisation hydraulique. Appliqué en régime permanent à une conduite reliant deux sections de passage (1) et (2), il impose l'égalité des débits massiques [5][A3, §5.1.3 ; A1, §5.2.1] :

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \Rightarrow \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (\text{I.10})$$

Pour un fluide assimilé à incompressible à température donnée ($\rho_1 = \rho_2$), cette relation se réduit à la conservation du débit volumique Q , grandeur directement mesurée par le volucompteur [1][A1, §4.1] :

$$Q = V_{\text{moy}} A_c \quad \text{et} \quad \dot{m} = \rho Q \quad (\text{I.11})$$

où V_{moy} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] est la vitesse débitante moyenne et A_c [m^2] la section transversale de passage. L'implication métrologique est fondamentale et referme la boucle ouverte en Section I.1 : le volucompteur mesure le débit volumique Q , mais la masse — et donc le contenu énergétique — réellement délivrée vaut $\dot{m} = \rho(T) Q$. Un même débit volumique mesuré à deux températures distinctes correspond ainsi à deux masses, et à deux valeurs énergétiques, différentes.

I.3.2 — Régime d'écoulement et nombre de Reynolds

La nature du régime d'écoulement — laminaire ou turbulent — conditionne le profil de vitesse et l'intensité des frottements. Elle est prédite par le nombre de Reynolds, rapport des forces d'inertie aux forces visqueuses [1][A1, §9.4.2 ; B3, §2.3.1] :

$$R_e = \frac{(\rho U D)}{\mu} \quad (\text{I.12})$$

où U [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] est la vitesse débitante, D [m] le diamètre de la conduite et μ [$\text{Pa} \cdot \text{s}$] la viscosité dynamique. Pour une conduite cylindrique, l'écoulement est laminaire pour $Re < 2300$ et turbulent établi pour $Re > 4000$. Le nombre de Reynolds réinvestit directement les propriétés thermodépendantes $\rho(T)$ et $\mu(T)$ établies en Section I.2 : une élévation de température provoque l'effondrement de μ et une légère décroissance de ρ , augmentant Re et pouvant déplacer le point de fonctionnement vers la turbulence.

La dissipation visqueuse le long des parois génère des pertes de charge régulières, gouvernées par l'équation de Darcy-Weisbach[1][A1, §9.4.1] :

$$h_r = \Lambda \frac{L}{D} \frac{U^2}{2g} \quad (\text{I.13})$$

où Λ est le coefficient de Darcy-Weisbach, fonction du nombre de Reynolds (et de la rugosité relative en régime turbulent) — d'où une dépendance thermique indirecte des pertes via Re . La détermination fine de Λ (corrélations de Colebrook-White, diagramme de Moody) et des coefficients de pertes singulières propres aux organes de la station n'est pas développée ici : ces termes, écartés par délimitation, ne conditionnent pas l'erreur de mesurage au premier ordre, et les coefficients spécifiques aux composants considérés ne sont pas disponibles dans le corpus mobilisé.

I.3.3 — Modélisation des fuites internes par l'écoulement de Poiseuille

Si l'écoulement principal peut atteindre la turbulence, les jeux fonctionnels de la chambre de mesure — interstices entre rotors, et entre rotors et carter — imposent des micro-écoulements strictement laminaires. Ce phénomène de fuite interne, ou glissement, est modélisé par l'écoulement de Poiseuille en conduite équivalente : le profil de vitesse y est parabolique, et son intégration sur la section détermine le débit de fuite non mesuré[1][A1, §5.7 ; B3, §4.2.1] :

$$Q_{\text{fuite}} = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 \mu L} \quad (\text{I.14})$$

où Δp [Pa] est la différence de pression aux bornes de l'interstice, R [m] le rayon équivalent, L [m] la longueur et μ [$\text{Pa} \cdot \text{s}$] la viscosité dynamique. L'implication métrologique est décisive : le débit de fuite est inversement proportionnel à la viscosité dynamique. Lors des fortes chaleurs estivales du climat semi-aride considéré, la chute de μ (Section I.2.2) amplifie le débit Q_{fuite} ; une fraction du carburant traverse alors l'organe mesureur sans

entraîner la rotation des pistons, générant une erreur métrologique systématique par défaut, au détriment du distributeur.

Ces trois relations referment la chaîne causale thermophysique du chapitre : les variations de température altèrent la masse volumique $\rho(T)$ (Section I.1) et la viscosité $\mu(T)$ (Section I.2), grandeurs qui gouvernent simultanément la masse délivrée à débit volumique mesuré donné (I.11) et le débit de fuite interne (I.14). La température s'établit ainsi comme le facteur d'influence dominant du mesurage volumétrique des carburants.

Chapitre II — Le volucompteur Wayne Global Star V : architecture et chaîne métrologique

II.1 — Architecture fluidique : du module hydraulique (GHM) à l'organe volumétrique de mesure (iMeter HELIX 6000)

L'analyse des perturbations thermodynamiques du comptage volumétrique — objet central de ce mémoire — exige au préalable une description rigoureuse de l'instrument lui-même. Cette section expose l'architecture fluidique du distributeur Wayne Global Star V en service sur les installations Naftal de la wilaya de Bouira : du conditionnement hydraulique du carburant (module GHM) jusqu'à l'organe volumétrique de mesure (iMeter HELIX 6000), puis les sources physiques de dérive mécanique — le *glissement (slippage)* — que la métrologie légale encadre par ses tolérances.

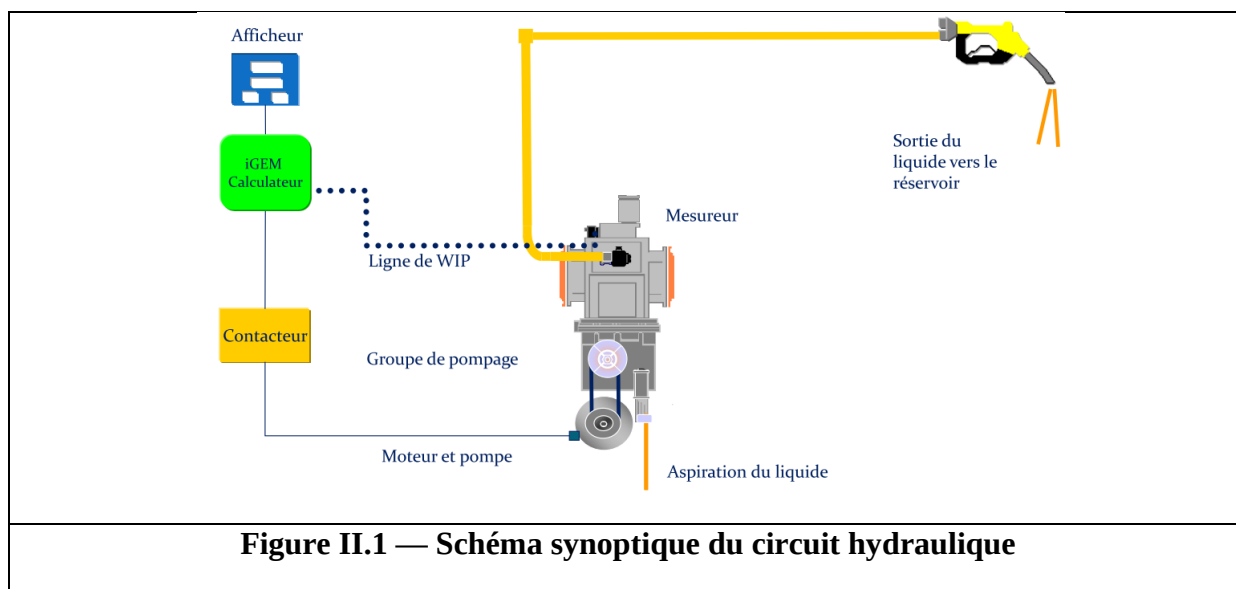


Figure II.1 — Schéma synoptique du circuit hydraulique

II.1.1. Définition fonctionnelle et structure physique du distributeur

Sur le plan de la métrologie légale, un distributeur de carburant n'est pas un simple dispositif de pompage : il constitue un *ensemble de mesurage*, c'est-à-dire un système comprenant un *compteur* — lequel intègre lui-même un dispositif mesureur, un calculateur et un dispositif indicateur — ainsi que ses dispositifs auxiliaires et additionnels [CAT-A.3]. Le cadre normatif détaillé de cet ensemble — classes d'exactitude, Erreurs Maximales Tolérées, confrontation des référentiels OIML et national — fait l'objet du **Chapitre III** ; le présent chapitre se concentre sur l'architecture physique et fonctionnelle de l'instrument.

La nomenclature constructeur (WM027790, Section 4.3) distingue huit éléments structurels : la *colonne*, l'*unité électronique*, le *support de pistolet*, le *pistolet*, le *tuyau*, la *porte du module hydraulique*, le *cadre de base* et la *colonne SAT* [CAT-B.2].

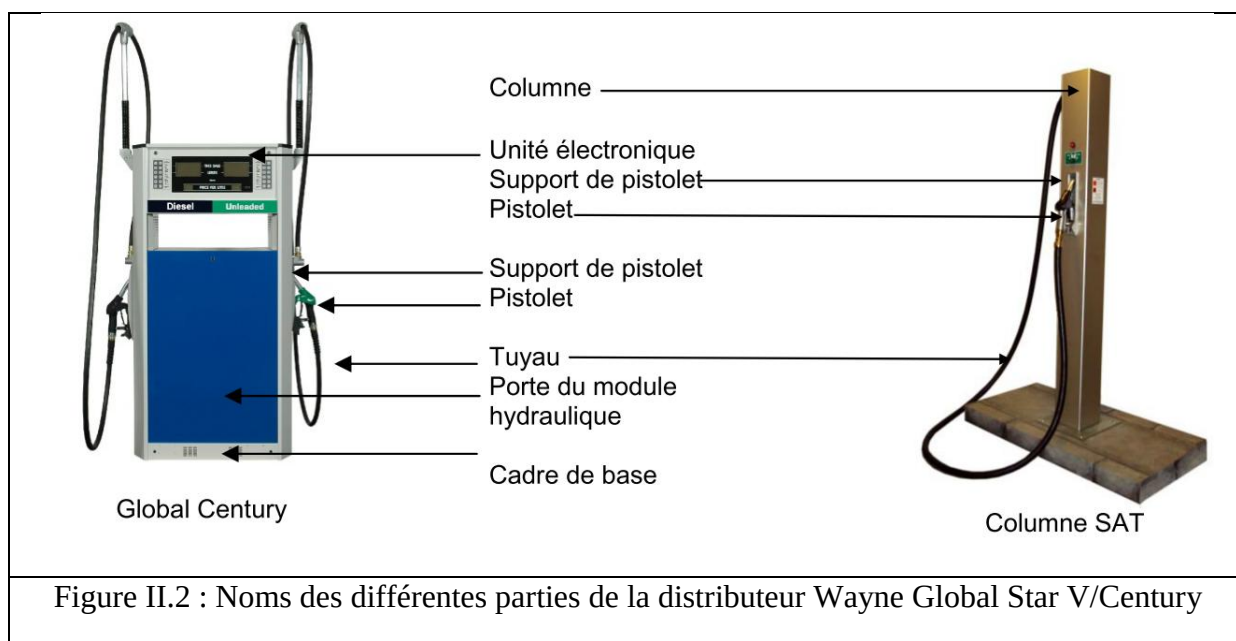


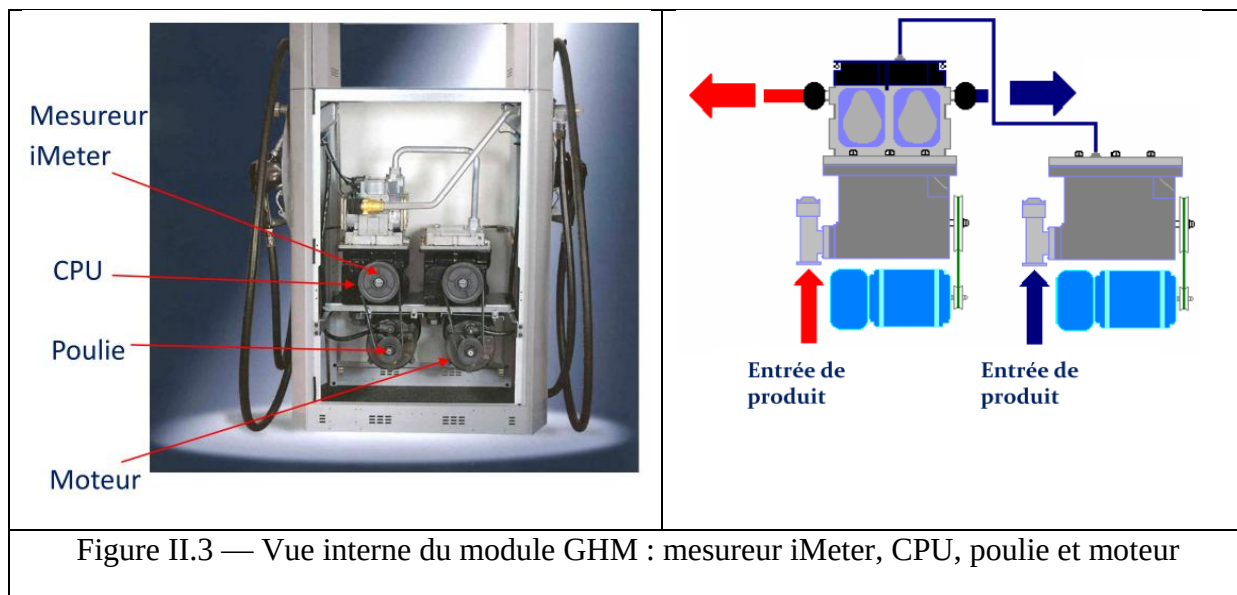
Figure II.2 : Noms des différentes parties de la distributeur Wayne Global Star V/Century

Du point de vue de la topologie de mesure, le Wayne Global Star V est un *système de mesurage à flexible plein (full hose)* : le point de transfert — frontière métrologique entre le volume mesuré et le volume livré — est matérialisé par le pistolet de distribution, situé en aval du compteur [CAT-A.3, CAT-A.5]. Le flexible demeurant constamment en charge liquide, **le volume déplacé dans l'iMeter correspond intégralement au volume livré au client** : c'est l'avantage métrologique décisif de cette configuration, qui n'impose aucune vidange du flexible après transaction. La désignation commerciale d'une buse Wayne encode son débit nominal — la désignation « 40 » correspond ainsi à 40 L/min [CAT-B.2]. En fonctionnement unitaire, la capacité maximale atteint 125 L/min ; en puisage simultané, elle est limitée à 60 L/min, et le système peut être couplé à une colonne satellite (SAT) déportée jusqu'à 7 m [CAT-B.2].

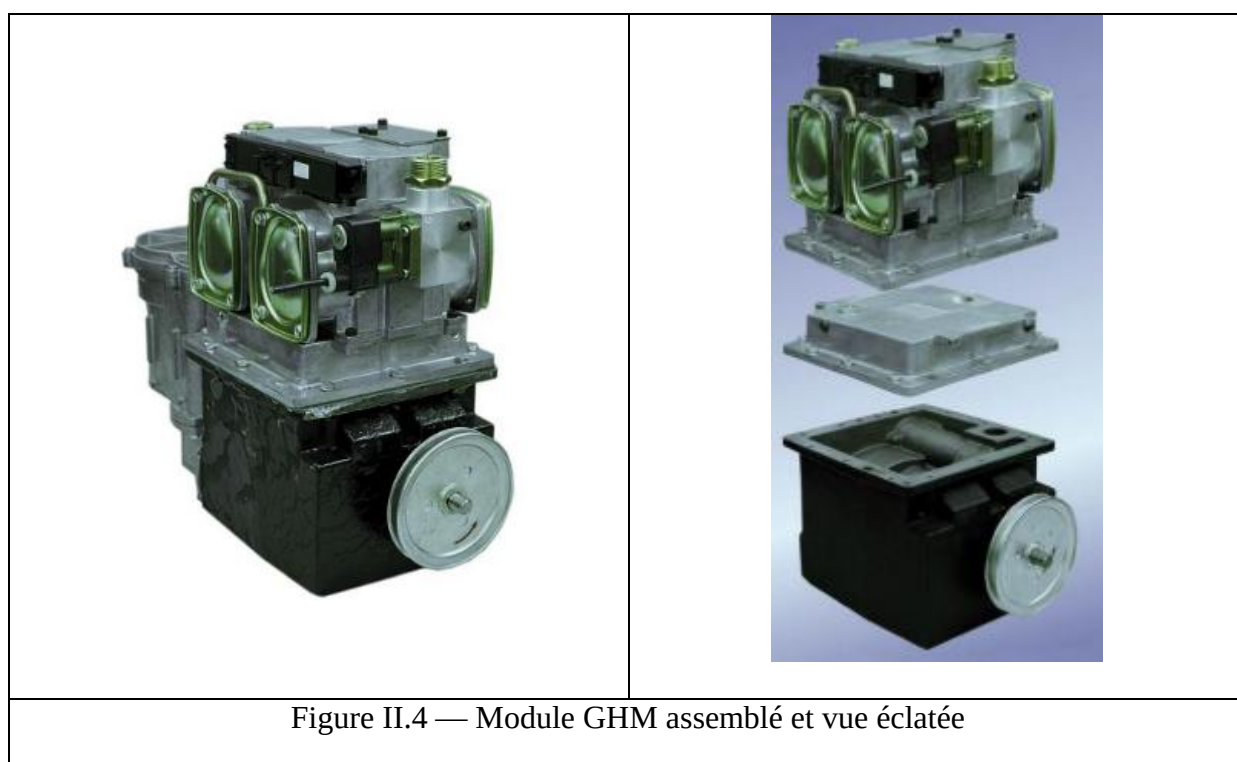
II.1.2. Le conditionnement hydraulique : le module GHM

Le circuit fluide débute par l'aspiration du carburant depuis les cuves de stockage souterraines, dont les conduites de raccordement sont enfouies entre 0,4 et 0,6 m selon les recommandations d'installation [CAT-B.3]. Le fluide est mis en mouvement par une pompe — dispositif provoquant l'écoulement du liquide par aspiration ou pression [CAT-A.3] —, en

amont de laquelle un filtre muni d'une soupape de retenue assure la rétention des impuretés du carburant [CAT-B.5].



L'ensemble de ce conditionnement est concentré dans le **GHM (*Global Hydraulic Module*)**, groupe compact de type duplex intégrant la pompe à palettes, le filtre, le dégazeur centrifuge, le mesureur à pistons et le module WIP (*Wireless Interface Pulser*) [CAT-B.3]. Cette intégration modulaire réduit les tuyauteries de liaison entre composants et, par là, les risques de fuite [CAT-B.3]. Depuis le dégazeur centrifuge, le carburant conditionné est acheminé par conduit vers une soupape de retenue, puis vers l'organe mesureur [CAT-B.5].



L'élimination des gaz mélangés au liquide constitue une exigence normative impérative : le séparateur de gaz doit assurer l'évacuation de l'air ou des gaz, et, pour les dispositifs dont le débit maximal n'excède pas $20 \text{ m}^3/\text{h}$, garantir l'élimination de toute proportion volumique d'air ou de gaz [CAT-A.5]. L'efficacité de cette séparation reste cependant gouvernée par le régime de pression à l'admission : ce point se révélera déterminant au Chapitre IV pour l'interprétation des **erreurs positives** observées aux pistolets à filtre colmaté — où la dépression d'admission favorise un dégazage résiduel —, phénomène **distinct du glissement**, lequel produit des **erreurs négatives**.

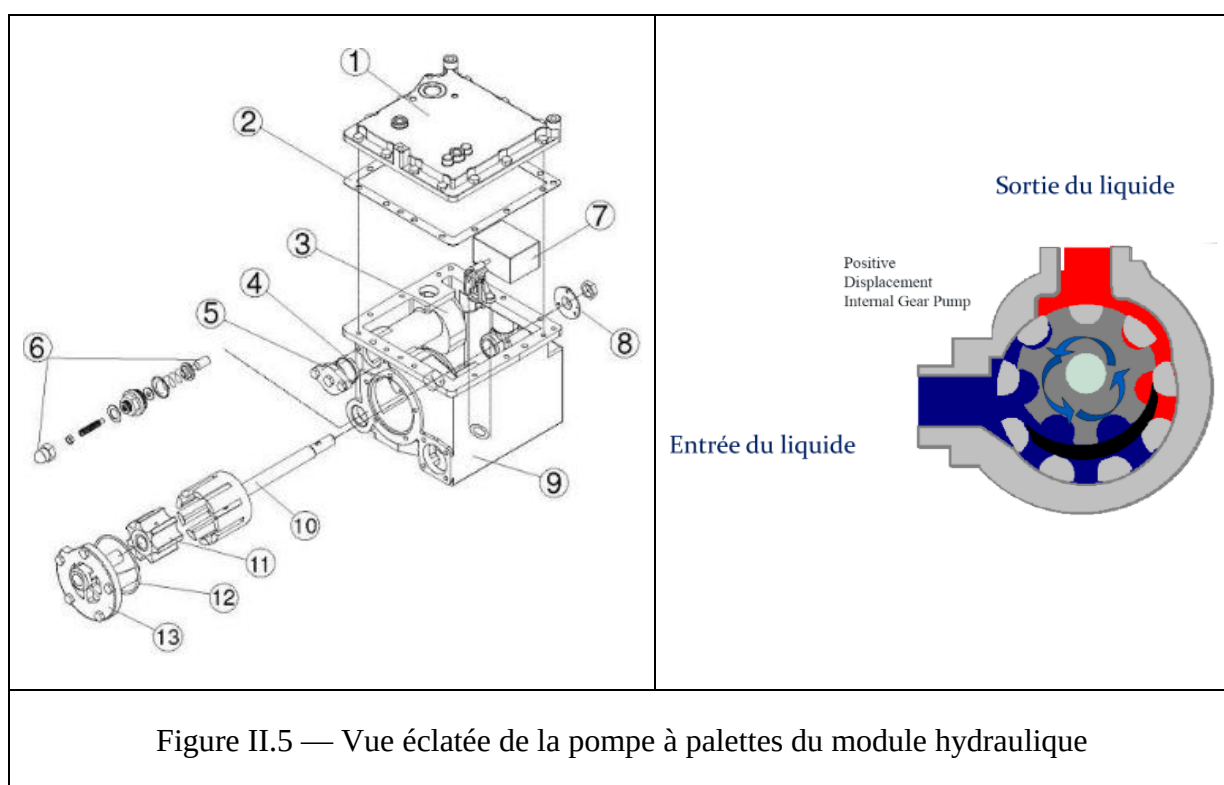


Figure II.5 — Vue éclatée de la pompe à palettes du module hydraulique

L'admission du carburant dans le circuit de mesurage est régie par une vanne électromagnétique qui s'ouvre dès la mise en rotation du moteur de pompe [CAT-B.2]. Pilotée par une carte électronique transmettant au calculateur central les informations de débit [CAT-B.3], cette vanne assure l'interface fonctionnelle directe entre le sous-système hydraulique et le sous-système de traitement du signal.

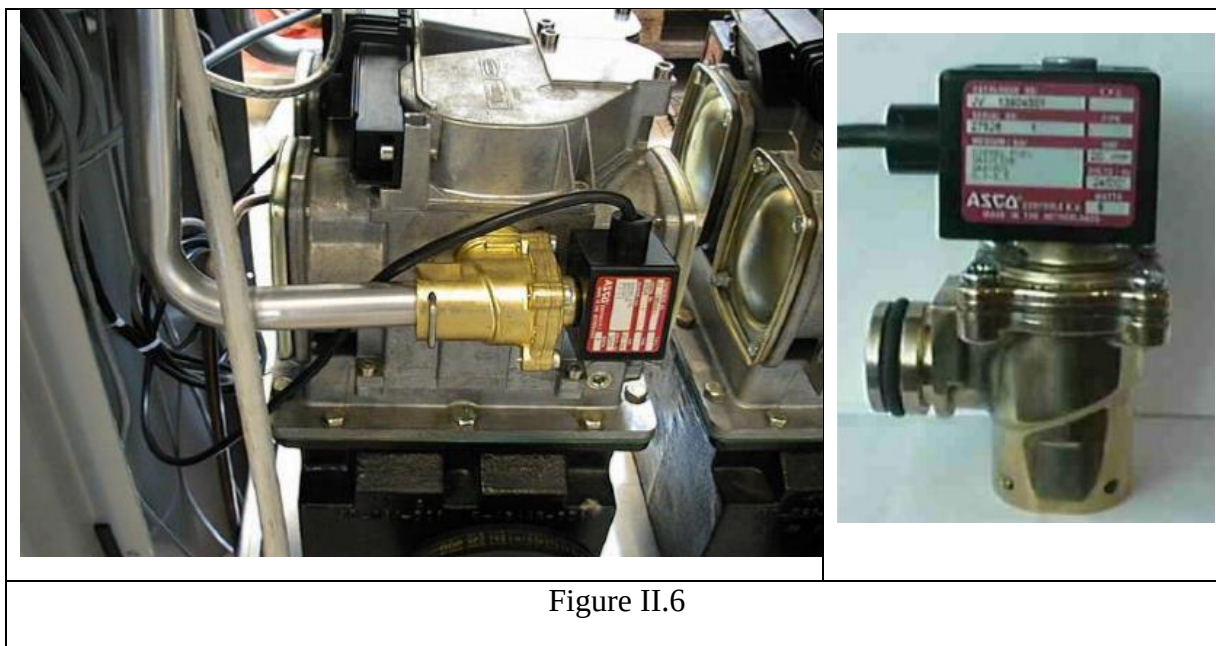


Figure II.6

II.1.3. L'organe volumétrique de mesure : l'iMeter HELIX 6000

Le fluide conditionné et dégazé est orienté vers le cœur métrologique de l'équipement : l'**iMeter**, compteur à haute performance équipé d'un pulseur intelligent à sécurité intrinsèque [CAT-B.3]. Cet organe appartient à la famille des *compteurs à déplacement positif* (*Positive Displacementmeters*), qui fonctionnent en piégeant un volume spécifique de fluide puis en le libérant en aval, le volume total résultant du comptage des cycles de piégeage et de libération [CAT-A.2]. Fonctionnellement, il se comporte comme un *moteur hydraulique actionné par l'effort du flux du carburant* [CAT-B.5].

Mécaniquement, le mesureur se compose de sept organes : le **corps** (carter stationnaire), le **piston**, le **cylindre**, le **vilebrequin**, la **bielle**, le **générateur d'impulsions** et le **tiroir de distribution** [CAT-B.5]. Ce dernier joue un rôle déterminant : il assure la distribution du liquide et l'étanchéité entre les phases d'aspiration et de refoulement, garantissant l'alternance ordonnée des cycles de remplissage et de vidange de chaque chambre [CAT-B.5].

La cinématique du modèle Wayne iMeter repose sur une architecture tricomposante : chaque côté est un moteur à trois cylindres — deux cylindres physiques et une chambre centrale faisant office de troisième [CAT-B.3]. La géométrie de distribution est conçue de telle sorte que les accès de remplissage et de vidange de la valve soient éloignés de 180° et que l'ouverture du siège de valve s'étende sur 120° [CAT-B.3] ; combinée au déphasage de 120° entre cylindres [CAT-B.5], cette disposition garantit qu'il **n'existe aucune position de point mort** dans le compteur [CAT-B.3]. Le mouvement alternatif des pistons est ainsi transformé, par la bielle et le vilebrequin, en un mouvement de rotation uniforme [CAT-B.5].

Pour l'iMeter HELIX 6000 — modèle spécifique au site d'étude —, le *volume cyclique* est de 0,5 L, le débit maximal de 40 L/min et le débit minimal de 4 L/min [CAT-B.5]. C'est ce mouvement rotatif uniforme du générateur d'impulsions qui constitue l'entrée mécanique directe de la chaîne de transduction analysée à la Section II.2.

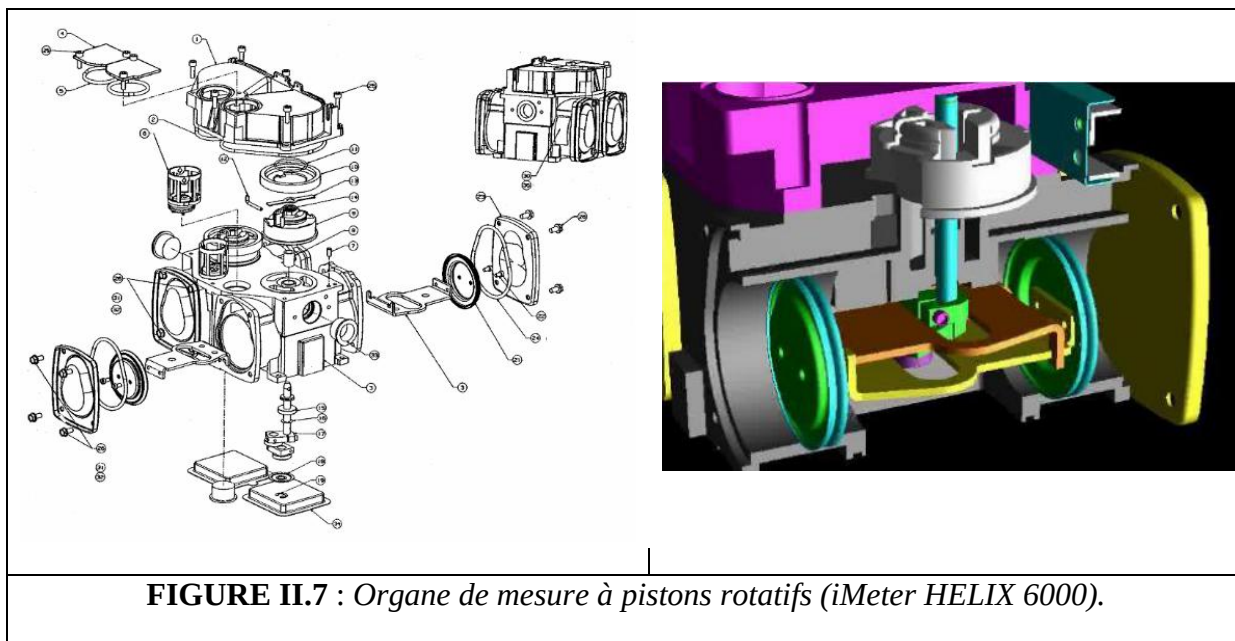


FIGURE II.7 : Organe de mesure à pistons rotatifs (iMeter HELIX 6000).

II.1.4. Jeux fonctionnels, glissement (slippage) et grandeurs d'influence

Si la description cinématique précédente dresse le portrait d'un mécanisme parfait, la physique des systèmes réels impose une limite fondamentale : le fonctionnement de pièces mobiles au sein d'un corps stationnaire requiert des **jeux fonctionnels** entre parties mobiles et paroi fixe [CAT-A.2]. Ces interstices permettent à une fraction du fluide de traverser l'appareil sans entraîner la rotation du mécanisme.

Ce phénomène est défini sous le terme de *slippage* : le volume de fluide qui traverse l'appareil sans être enregistré par le mécanisme de mesure [CAT-A.2]. Il modifie le *Meter Factor* (facteur de compteur), rapport du volume réel sur le volume enregistré ; tout écart de ce facteur par rapport à l'unité traduit une distorsion de la transaction commerciale [CAT-A.2]. L'impact du glissement n'est pas constant sur la plage de fonctionnement : il est *le plus significatif aux faibles débits*, où la vitesse du rotor est lente mais où le différentiel de pression aux bornes des jeux demeure suffisant pour forcer le passage du fluide [CAT-A.2]. La courbe d'erreur typique d'un compteur à déplacement positif débute ainsi à débit nul par une forte erreur négative, s'élève rapidement avec le débit, puis se stabilise sur la plage normale de fonctionnement où la linéarité est maximale — profil décrit comme un « *S étiré* » (*lazy S*) [CAT-A.2].

Trois grandeurs d'influence — au sens de G. Asch, grandeurs physiques parasites dont les variations entraînent un changement de la grandeur de sortie indissociable de l'action du mesurande [CAT-A.1] — gouvernent l'ampleur du glissement en conditions réelles :

- **Usure mécanique** (dérive systématique dans le temps). Le frottement des composants élargit progressivement les jeux fonctionnels ; cette usure entraîne une augmentation du *slippage* et une modification du facteur de compteur, se manifestant invariablement par un **sous-enregistrement** — le volume affiché devient systématiquement inférieur au volume délivré [CAT-A.2]. Lorsque les sollicitations dépassent les limites nominales, il s'agit d'une modification irréversible des caractéristiques du capteur [CAT-A.1].
- **Différentiel de pression transinterstitiel (ΔP)**. Le glissement est directement proportionnel au ΔP aux bornes des jeux mécaniques. À faible débit, la lenteur de rotation des pistons amplifie l'effet relatif de ce ΔP , rendant l'erreur relative maximale précisément dans la zone où l'appareil est censé respecter ses tolérances légales [CAT-A.2].
- **Viscosité dynamique (μ)**. La viscosité exerce un rôle d'étanchéité naturelle dans les organes à faibles interstices [CAT-A.1]. En application directe des conclusions thermodynamiques du Chapitre I, l'élévation de la température estivale à Bouira réduit la viscosité du carburant, facilitant le passage du fluide à travers les jeux du mesureur et **aggravant l'erreur volumétrique par défaut**. L'OIML formalise explicitement ce lien : « *the thermal contraction of the liquid or the presence of air or gas in the conduits may lead to measurement errors* » [CAT-A.3].

Dès lors que le volume physique cyclique du mesureur fluctue sous l'effet de ces grandeurs d'influence thermiques et mécaniques, la fidélité de la transaction commerciale repose intégralement sur la **transduction fidèle** de ce mouvement mécanique en un signal électrique numérique. Ce processus — assuré par le générateur d'impulsions en liaison avec le module WIP, jusqu'à l'affichage légal et son ajustage — constitue l'objet de la Section II.2.

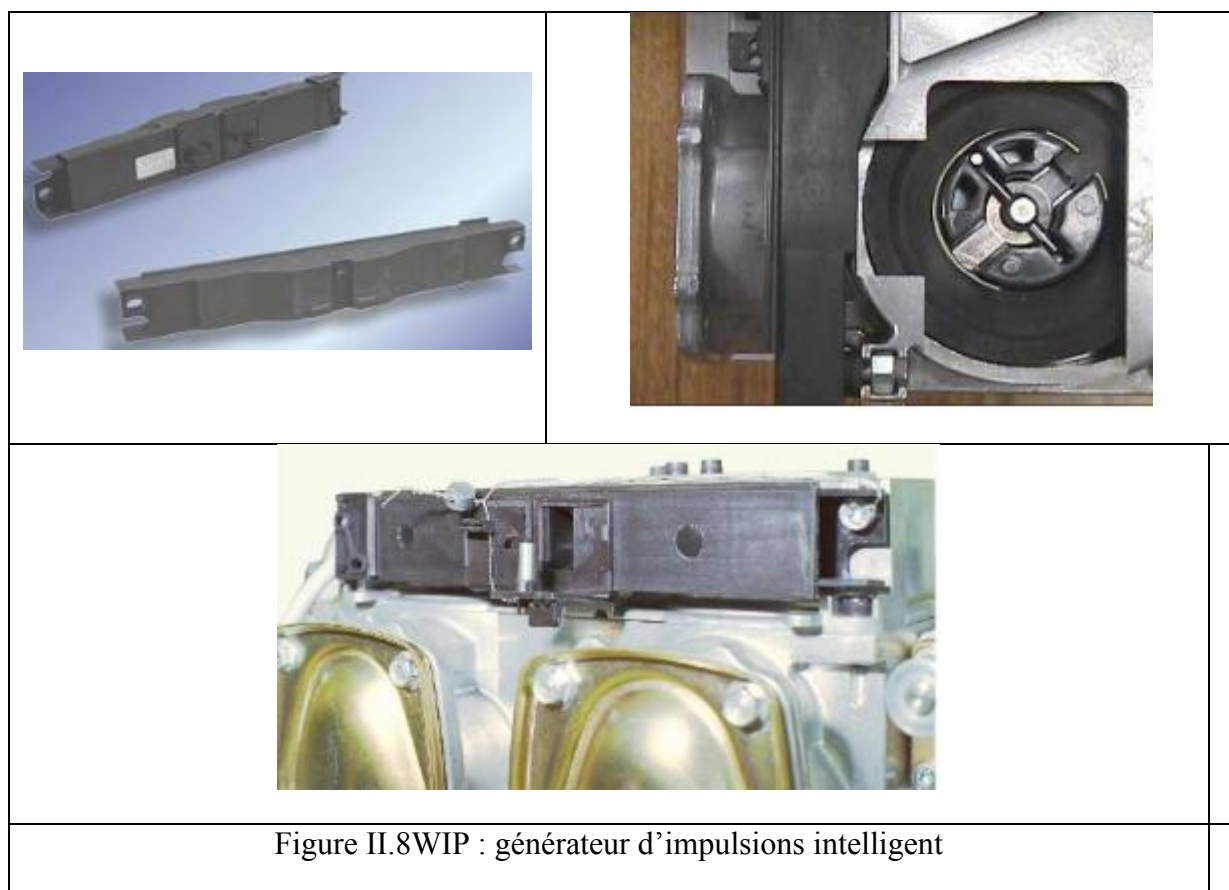
II.2 — Chaîne de transduction (WIP, effet Hall, k-factor) et ajustage électronique

La fidélité du comptage ne repose pas seulement sur la cinématique de l'organe à pistons décrit à la Section II.1 : le mouvement de rotation engendré par le flux de carburant doit être traduit en une grandeur numérique exploitable et juridiquement opposable, puis maintenu dans les tolérances légales par voie d'ajustage. Cette section décrit la chaîne de transduction — du disque ferromagnétique de l'émetteur d'impulsions jusqu'à l'affichage légal sur l'iGEM

— puis la procédure d'**ajustage électronique** qui redéfinit le facteur d'impulsion (*k-factor*) et les garanties d'inviolabilité qui en font un acte métrologique opposable.

II.2.1. L'émetteur d'impulsions : interface mécanique-magnétique

L'interface chargée d'extraire l'information cinématique de l'organe volumétrique est l'*émetteur d'impulsions*. Il se compose d'un disque en matériau ferromagnétique polarisé, accouplé à l'arbre de sortie du mesureur, et de deux capteurs distincts et indépendants qui produisent des impulsions en correspondance des polarités magnétiques du disque [CAT-B.5]. Son rôle premier est la *conversion du mode analogique au mode numérique* : la rotation continue de l'arbre entraîne le disque, et les capteurs délivrent un signal discret en stricte correspondance avec le passage alterné des pôles [CAT-B.5]. Ce couplage garantit que l'information cinématique — bien qu'affectée par le glissement caractérisé en II.1.4 — est fidèlement transmise à l'étage électronique sous la forme d'une grandeur électrique exploitable (courant, tension, charge ou impédance), selon la nature du capteur [CAT-A.1].



II.2.2. Fondation physique de la transduction : le capteur actif à effet Hall

Deux familles technologiques permettent la lecture des discontinuités magnétiques d'un corps tournant : le capteur à *réductance variable* et le capteur à *effet Hall* (ou à

magnétorésistance), qui requiert que la pièce tournante entraîne un ou plusieurs aimants ou fasse périodiquement écran magnétique entre un aimant fixe et le capteur [CAT-A.1]. C'est cette seconde famille qui est mise en œuvre dans les distributeurs Wayne.

La génération du signal repose sur l'*effet Hall* : lorsqu'une plaquette généralement semi-conductrice est parcourue par un courant I et soumise à une induction magnétique B faisant un angle θ avec ce courant, il apparaît, perpendiculairement à l'induction et au courant, une tension V_H — conséquence directe de la force de Laplace s'exerçant sur les charges en mouvement [CAT-A.1] :

$$V_H = K_H \cdot I \cdot B \cdot \sin\theta \quad (\text{II.1})$$

Symbole	Grandeur	Unité
V_H	Tension de Hall aux bornes de la plaquette	V
K_H	Constante de Hall (matériau et géométrie de la plaquette)	$V \cdot A^{-1} \cdot T^{-1}$
I	Courant d'excitation de la plaquette	A
B	Norme du champ d'induction magnétique	T
θ	Angle entre le vecteur courant et le vecteur induction	Rad

Lorsqu'un aimant est lié à l'objet dont on veut connaître la position, il détermine les valeurs de B et θ au niveau de la plaquette : la tension V_H , fonction de la position, en assure une traduction électrique [CAT-A.1]. La rotation du disque ferromagnétique polarisé est ainsi directement convertie en une variation de V_H . La sensibilité intrinsèque du capteur à la composante normale B_N de l'induction s'écrit [CAT-A.1] :

$$S_{BN} = (\Delta V_H) / (\Delta B_N) = (K_H \cdot I) / e \quad (\text{II.2})$$

où e désigne l'épaisseur de la plaquette Hall. Cette sensibilité est amplifiée par le conditionneur de gain A [CAT-A.1] :

$$S'_{BN} = A \cdot S_{BN} \quad (\text{II.3})$$

Sur le plan de la classification, les capteurs à effet Hall sont des **capteurs actifs**, puisque l'information est liée à une f.é.m. ; ce ne sont cependant pas des convertisseurs d'énergie, car c'est la source du courant I — et non le mesurande — qui délivre l'énergie liée au signal [CAT-A.1]. Cette nuance justifie la nécessité d'une **source d'alimentation extérieure** pour le module de transduction.

II.2.3. Numérisation et discrimination du sens de rotation

La fréquence f du signal impulsionnel est proportionnelle à la vitesse de rotation du disque [CAT-A.1] :

$$f = p \cdot N \quad (\text{II.4})$$

Symbole	Grandeur	Unité
F	Fréquence des impulsions	Hz
P	Nombre de repères magnétiques (polarités) du disque	—
N	Vitesse de rotation du disque	tr/s

Dans la configuration générique, le dispositif calculateur compte les fronts montants et descendants sur chaque canal — à titre d'exemple, 500 impulsions par tour de l'axe du mesureur [CAT-B.5].

Pour prévenir un retour de fluide et les tentatives de manipulation frauduleuse du comptage, le système détermine le sens de rotation à partir de deux signaux déphasés (S1 et S2). Un circuit discrimine les fronts montants ($\uparrow : dS1/dt > 0$) des fronts descendants ($\downarrow : dS1/dt < 0$) et les associe à l'état logique de la piste S2 selon les équations booléennes [CAT-A.1] :

$$D_d = (\uparrow \cdot \bar{S}_2) + (\downarrow \cdot S_2) \quad (\text{II.5})$$

$$D_i = (\uparrow \cdot S_2) + (\downarrow \cdot \bar{S}_2) \quad (\text{II.6})$$

Symbole	Signification
D_d, D_i	Variables booléennes : sens direct / sens inverse détecté
$\uparrow$	Front montant de la piste S1 : $dS1/dt > 0$

↓	Front descendant de la piste S1 : $dS1/dt < 0$
S2, $\bar{S}2$	État logique de la piste S2 et son complémentaire

La détection d'un état $D_i \neq 0$ déclenche une alarme et invalide l'incrément de volume correspondant, assurant la robustesse métrologique du comptage et sa protection contre la fraude [CAT-A.1].

II.2.4. Filtrage algorithmique et intégrité du transducteur WIP

Au sein des distributeurs Wayne, le transducteur WIP intègre une logique de filtrage embarquée destinée à neutraliser les perturbations physiques et les anomalies de comptage. Les codes d'erreur actifs identifient trois sources principales de perturbation [CAT-B.3] : la présence d'*air dans le système*, le *croisement de flux de produit* entre canaux, et la détection d'une *augmentation du WIP non égale à l'iGEM* — signature d'une intervention physique sur le transducteur. Le cas particulier de l'anomalie de sens est matérialisé par le **code 54** : impulsions contraires du WIP « inactif », c'est-à-dire du canal au repos non utilisé dans la transaction, révélant une perturbation du champ magnétique ou un retour de fluide parasite [CAT-B.4].

La paramétrisation de cette logique dans le calculateur iGEM repose sur trois seuils réglables [CAT-B.4] :

- **F16.01** — *Hystérèse de réversion d'impulsions WIP* : plage 1 à 64 impulsions;
- **F16.03** — *Limite de réversion d'impulsions (après hystérèse) sur un WIP inactif* : plage 1 à 255 impulsions;
- **F17.00** — *Nombre maximum d'erreurs d'impulsions sur un WIP actif au cours d'une transaction* : plage 1 à 99 impulsions.

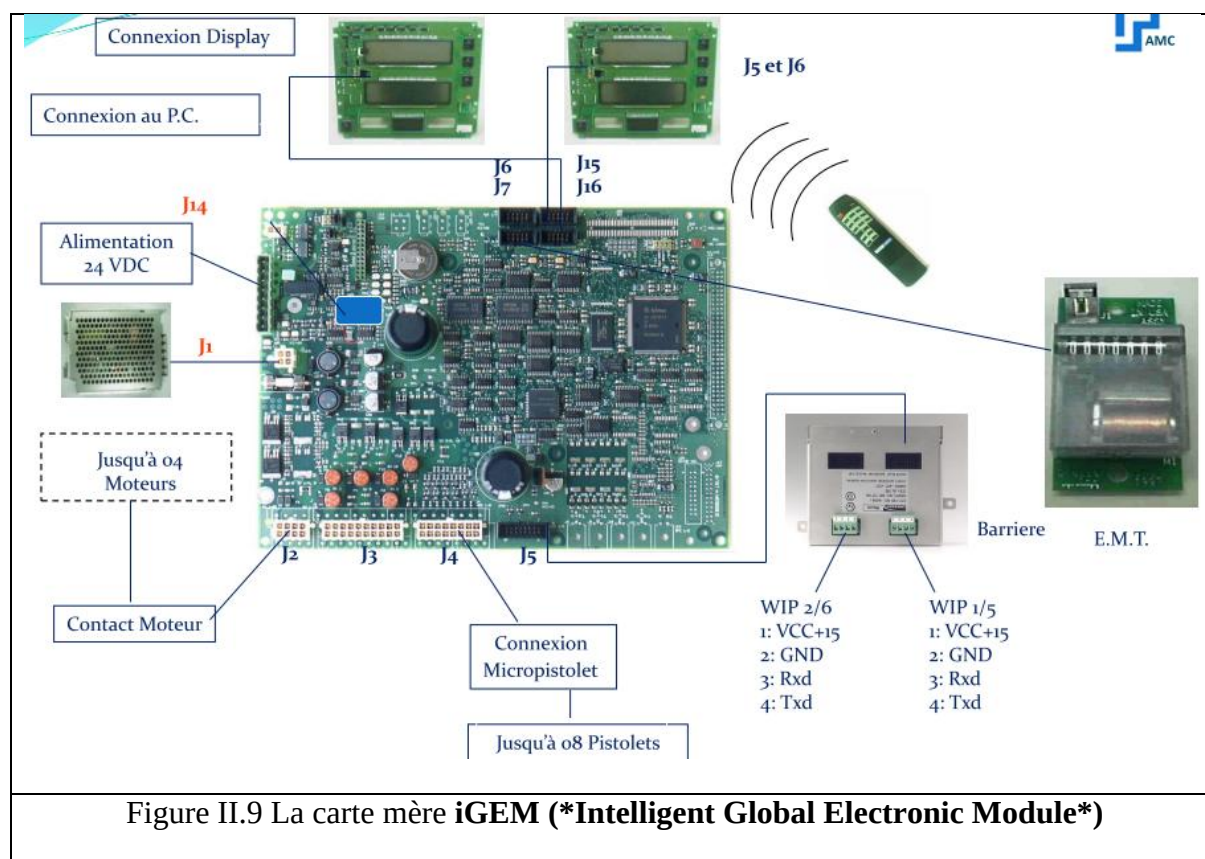
Au-delà du filtrage du signal, le système garantit l'intégrité de la chaîne par une vérification active du numéro de série du WIP : la fonction **F16.04** active le contrôle de changement de numéro de série (0 = inactif, 1 = actif) et **F16.02** impose la confirmation de ce changement après toute substitution physique du transducteur [CAT-B.4]. Cette procédure rend impossible le remplacement clandestin du WIP par un module non étalonné sans déclencher une alarme réglementaire. Enfin, la commande **S27** (*Statistiques des WIPs*) permet d'interroger, pour chaque WIP, son numéro de série, son totaliseur de volumes et le cumul de

ses erreurs de pulsation [CAT-B.4] — registre de traçabilité exploitable lors des vérifications périodiques.

II.2.5. Du facteur d'impulsion (*k-factor*) à l'affichage métrologique légal

Le train d'impulsions filtré et validé par le WIP constitue une grandeur numérique sans dimension. Sa conversion en volume physique commercialement opposable requiert le **facteur d'impulsion** (*k-factor*), coefficient qui établit la correspondance légale entre le nombre d'impulsions et le volume de carburant. C'est précisément cette variable qui sera modifiée lors de l'ajustage électronique analysé en II.2.6.

Le signal, une fois associé à la valeur du *k-factor*, est acheminé vers le calculateur central via les blocs de conversion analogique-numérique de la chaîne de mesure [CAT-A.1]. La carte mère **iGEM (*Intelligent Global Electronic Module*)** centralise cette conversion et assure l'affichage du volume au consommateur. Pour satisfaire la métrologie légale, l'iGEM dispose d'un mode opératoire sécurisé — le **Mode Poids & Mesures** — conçu pour faciliter l'exhibition des diagrammes d'occurrence d'altérations dans la mesure des volumes, requis par Poids et Mesures [CAT-B.4]. Activé via le paramètre **F01**, ce mode désactive certaines fonctions de maintenance courante, interdisant toute modification non supervisée des paramètres de calcul pendant une transaction [CAT-B.4]. La contribution propre du calculateur à l'erreur globale du système est elle-même bornée par la norme ; sa valeur réglementaire exacte (fraction de la Ligne A du Tableau des EMT) est traitée dans le cadre normatif du **Chapitre III**.



II.2.6. L'ajustage électronique : principe, procédure et garanties d'inviolabilité

Principe. Un *dispositif d'ajustage* est le dispositif intégré au volucompteur qui permet seulement un décalage de la courbe d'erreur, afin d'amener les erreurs à l'intérieur des Erreurs Maximales Tolérées ; il peut être mécanique ou électronique [CAT-B.5]. L'*ajustage* désigne l'opération destinée à amener l'instrument à un état de fonctionnement convenable, sa finalité étant de **ramener l'erreur au plus près de zéro** [CAT-B.5]. L'erreur relative de volume indiqué qui déclenche cette intervention s'écrit [CAT-B.5] :

$$E \% = (V_i - V_v) / V_v \times 100 \quad (\text{II.7})$$

Le volume vrai V_v étant obtenu par lecture de la jauge étalon, corrigé du pourcentage S indiqué par cet instrument [CAT-B.5] :

$$V_v = V_0 (1 + S/100) \quad (\text{II.8})$$

Symbole	Grandeur	Unité
$E \%$	Erreur relative de volume indiqué	%
V_i	Volume indiqué sur le	L

	volucompteur	
V_v	Volume vrai corrigé par lecture de jauge	L
V_0	Volume nominal de la jauge étalon	L
S	Pourcentage indiqué par la jauge	%

Séquencement normatif. L'ajustage est une opération distincte, **préalable et formellement séparée** de la phase de vérification par l'inspecteur : le droit métrologique proscriit toute intervention sur l'instrument en cours d'essai. Avant toute procédure, il est impératif de s'assurer que le dispositif calculateur-indicateur est configuré avec la version de son homologation [CAT-B.5]. L'instrument est en outre soumis à une **contrainte de durabilité** : il doit être conçu de façon à respecter, *sans ajustage*, deux fois l'erreur maximale tolérée pendant une période de fonctionnement normal d'un an [CAT-B.5].

Mise en œuvre sur l'iMeter HELIX 6000. L'ajustage électronique n'interagit pas avec la géométrie mécanique des pistons : il redéfinit par voie algorithmique la *constante d'origine du nombre d'impulsions/litre* [CAT-B.5] — le *k-factor* — reliant les signaux du WIP au volume calculé par l'iGEM.

- *Activation.* Le déclenchement est physique : quand un des aimants s'éloigne des capteurs de calibrage, le microprocesseur enregistre le mouvement et se remet en mode calibrage [CAT-B.3]. L'accès au mode de modification des paramètres métrologiques impose d'entrer dans le mode sécurisé de l'iGEM (touche **CLEAR** + mot de passe Poids & Mesures), puis d'activer la fonction **F40** (*Calibrage du VAP Manuel*) [CAT-B.4].
- *Jaugeage.* La procédure requiert le puisage d'un volume étalon de 20 litres « en mode continental, exactement jusqu'à la marque 0 » dans le récipient de contrôle [CAT-B.3]. L'écart est établi par comparaison entre le volume affiché (par exemple 19,00 L) et le volume réellement versé (20 L) [CAT-B.5].
- *Recalcul automatique.* Le processeur calcule le nombre de mouvements enregistrés, en déduit un facteur de calibrage stocké en mémoire, puis l'applique aux remplissages futurs afin que le volume correct soit fourni à l'ordinateur de la pompe [CAT-B.3]. Selon les procédures nationales OAM/ONDEFOC, le nouveau nombre d'impulsions est [CAT-B.5] :

$$K_{\text{nouveau}} = ((V_{\text{affiché}})/(V_{\text{réel}})) \times K_{\text{initial}} \quad (\text{II.9})$$

Symbole	Grandeur	Unité
K_{nouveau}	Nouveau nombre d'impulsions programmé	imp/L
$V_{\text{affiché}}$	Volume indiqué lors du jaugeage	L
$V_{\text{réel}}$	Volume réel versé dans la jauge étalon	L
K_{initial}	Nombre d'impulsions programmé initial	imp/L

- **Validation.** Après introduction du nouveau facteur, il est impératif de refaire les essais ; le résultat doit être à l'intérieur de l'intervalle des EMT et aussi proche de zéro que possible, afin que toute dérive ultérieure reste dans l'intervalle jusqu'à la prochaine vérification [CAT-B.5]. Le processus s'achève lorsque les volumes de l'afficheur et de la jauge sont conformes aux tolérances [CAT-B.3].

Garanties d'inviolabilité. L'ajustage ne constitue un acte métrologique légal que si son caractère définitif est garanti. La norme OIML R 117-3:2019 stipule que « *Seals are in place and prevent normal dismounting/opening of the associated components* » [CAT-A.5]. Il doit être impossible, sans bris de plombage, de procéder aux **six opérations** suivantes [CAT-B.5] :

1. le démontage de la liaison entre l'émetteur d'impulsions et le mesureur ;
2. le démontage du mesureur ;
3. le démontage de la plaque d'identification de l'ensemble de mesurage ;
4. l'accès au dispositif de réglage du mesureur ;
5. le démontage du dispositif calculateur-indicateur ;
6. le démontage de la liaison entre le calculateur et l'émetteur d'impulsions.

En parallèle, les aimants de calibrage sont scellés, seulement par des contrôleurs certifiés, afin qu'ils ne puissent être retirés des capteurs sans fracture des sceaux [CAT-B.3] ; la réinitialisation de certains paramètres de sécurité ne peut être effectuée que par l'ingénieur de maintenance, par pression sur le bouton CRC [CAT-B.2]. Sur le plan immatériel, la norme exige que l'instrument soit doté d'un dispositif enregistrant automatiquement et de manière

ineffaçable tout ajustage d'un paramètre — une piste d'audit (*Audit Trail*) [CAT-A.5] — qui transforme l'ajustage en un acte traçable et légalement opposable.

Enfin, la conformité opérationnelle est attestée par l'activation du Mode Poids & Mesures, dont le Mode 4 (indépendant) impose une résolution d'affichage à *trois décimales* pour les volumes, tandis que les Modes 5 et 6 intègrent l'*inspection de la compensation automatique de température* (ATC) [CAT-B.2]. La correction ATC, activée sous contrôle métrologique, traduit en volume net la variation volumique du carburant induite par les écarts de température entre stockage et distribution — phénomène dont la modélisation constitue précisément l'objet du **Chapitre III**.

Chapitre III — Modélisation de la dérive thermique et cadre normatif de la conformité

L'analyse de l'architecture fonctionnelle du distributeur Wayne Global Star V conduite au Chapitre II a établi le cadre instrumental dans lequel s'opère le mesurage volumétrique. Le présent chapitre construit le socle théorique reliant les mécanismes physiques de dérive au cadre légal qui en sanctionne la conformité. Il procède en quatre temps. La Section III.1 isole et quantifie la **dérive thermique**, identifiée comme le facteur d'influence hégémonique sous le climat semi-aride de la wilaya de Bouira. La Section III.2 écarte par délimitation explicite — au moyen d'une analyse qualitative compacte — les phénomènes hydrauliques et de dégazage, de second rang métrologique et non couverts par le protocole expérimental retenu. La Section III.3 dissout le cadre normatif algérien en une **confrontation biréférentielle synthétique** (OIML $\pm 0,50$ % contre national $\pm 0,20$ %). La Section III.4 propage enfin l'incertitude de mesure selon la méthode GUM, révélant la zone d'indétermination qui constitue la contribution originale de ce mémoire.

III.1 — Influence de la température sur le volume des hydrocarbures : modélisation thermophysique et quantification métrologique

La présente section engage l'analyse par le phénomène premier et déterminant : la dilatation volumique des hydrocarbures liquides sous l'effet de la température ambiante. Il est démontré que l'amplitude thermique propre au climat semi-aride de Bouira — pouvant excéder 40 °C entre les extrêmes saisonniers — engendre, en l'absence de correction métrologique, des erreurs volumétriques systématiques dont l'ampleur surpasse de plusieurs facteurs les tolérances de la métrologie légale, internationale comme nationale.

III.1.1. Modélisation thermophysique de la dilatation volumique des hydrocarbures

La masse volumique d'un hydrocarbure liquide, et par corollaire le volume qu'il occupe à masse donnée, est fondamentalement tributaire de la température d'exploitation. Cette sensibilité est formalisée par le coefficient de dilatation volumique isobare β , qui quantifie la variation relative du volume massique v résultant d'une variation de température à pression constante [A3, Chap. 12, Sec. 12.4.4, p. 585] :

$$\beta = 1/v \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \quad (\text{III.1})$$

où v désigne le volume massique [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$], T la température thermodynamique [K] et P la pression [Pa]. Par intégration de cette relation différentielle sur une plage de température où

β peut être approximativement considéré comme invariant, on obtient l'expression du volume du fluide à la température T en fonction de son volume à une température de référence T_{ref} :

$$V(T) = V_{\text{ref}} \cdot [1 + \beta \cdot (T - T_{\text{ref}})] \quad (\text{III.2})$$

La variation absolue de volume ΔV consécutive à un gradient thermique $\Delta T = T - T_{\text{ref}}$ s'en déduit sous la forme opérationnelle :

$$\Delta V = V_{\text{ref}} \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (\text{III.3})$$

Pour les essences de pétrole, la dépendance en température de la masse volumique est exprimée par la relation empirique de Guibet [B1, Sec. 3.1.1, p. 6] :

$$\rho_t = \rho_{15} - k \cdot (t - 15) \quad (\text{III.4})$$

où ρ_t et ρ_{15} désignent la masse volumique [$\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$] respectivement à t °C et à 15 °C, et $k = 0,00085 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ le facteur numérique d'expansion volumique de l'essence. La connexion entre ce paramètre empirique et la définition thermodynamique (III.1) s'établit en différenciant (III.4) : puisque $\beta = -(1/\rho)(\partial \rho / \partial T)_P$, on obtient $\beta = k / \rho_{15}$. Pour une essence de masse volumique de référence $\rho_{15} = 734 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} = 0,734 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$:

$$\beta_{\text{essence}} \approx (0,00085)/(0,734) \approx 1,16 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Ce résultat confirme que, pour une élévation de 15 °C à 25 °C ($\Delta T = 10$ °C), la masse volumique de l'essence diminue d'environ 1 % de la valeur de référence [B1]. Modeste en valeur absolue, cette variation est néanmoins déterminante pour l'équité des transactions à grand volume. Le gazole routier, de masse volumique intrinsèquement plus élevée ($\rho_{15} = 840 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), présente un coefficient β d'amplitude moindre, quantifié directement par lecture de la Table 54B en sous-section III.1.3.

III.1.2. Cadre métrologique légal : la référence universelle à 15 °C

Afin d'harmoniser les transactions pétrolières en dépit de cette sensibilité thermique, l'OIML a fixé une référence thermométrique universelle : la température standard de référence pour l'indication du volume d'un liquide est établie à $T_{\text{ref}} = 15$ °C [C1, Clause 2.7].

Pour convertir un volume observé V_{obs} , mesuré à la température ambiante T_{obs} , vers ce volume de référence légal, les systèmes de mesurage dynamiques s'appuient sur le Facteur de Correction de Volume (CTL, *Correction for the effect of Temperature on Liquid*) [C2 ; C3, Clause F.2.3] :

$$V_{\text{ref}} = V_{\text{obs}} \times \text{CTL} \quad (\text{III.5})$$

où CTL est le facteur de correction thermique adimensionnel, déterminé par voie tabulaire au moyen de la norme ASTM D 1250-08 [B10]. L'implémentation instrumentale de cette correction s'effectue par un dispositif de Compensation Automatique de Température (ATC) intégré au calculateur du distributeur.

La norme exige la conformité métrologique sur l'ensemble de la plage de température opératoire [$T_{\min}$, $T_{\max}$] [C1, Clause 3.1.1]. Le seuil de conformité légale internationale pour un système de classe 0,5 est une Erreur Maximale Tolérée (EMT) de $\pm 0,50$ % en vérification initiale (Tableau 3, Ligne A) [C1, Sec. 3.1.2], portée au double, $\pm 1,0$ %, en contrôle périodique [C1, Clause 5.1.2]. Toute dérive thermique non compensée excédant ces seuils rend la délivrance non conforme.

III.1.3. Application de la Table 54B de l'ASTM D 1250-08 au gradient climatique de Bouira

Le calcul rigoureux du facteur CTL pour les produits raffinés s'effectue au moyen de la Table 54B (*Generalized Products*) de l'ASTM D 1250-08 [B10], qui fournit les facteurs correctifs avec une résolution nominale de $0,25$ °C en température et de $2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ en masse volumique [B10, Sec. 11.1.54.4, p. VIII-6]. La norme précise qu'aucune interpolation pratique ne saurait atteindre la précision intrinsèque de la table, et que l'interpolation entre valeurs tabulées est en conséquence déconseillée [B10].

Les facteurs CTL ont été extraits pour deux produits représentatifs des carburants distribués dans les stations NAFTAL de Bouira — une essence sans plomb ($\rho_{15} = 734 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) et un gazole routier ($\rho_{15} = 840 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) — sur la plage couvrant intégralement l'amplitude thermique saisonnière régionale.

Tableau III.1 — Évolution du facteur de correction de volume (CTL) en fonction de la température observée — Extraction de la Table 54B [B10]

T_{obs} (°C)	CTL _{essence} ($\rho_{15}=734$)	CTL _{gazole} ($\rho_{15}=840$)	Régime thermodynamique
5	1,0124	1,0084	Contraction — hiver
10	1,0062	1,0042	Contraction modérée
15	1,0000	1,0000	Condition de référence OIML [C1, Cl. 2.7]

20	0,9938	0,9958	Dilatation modérée
25	0,9875	0,9915	Dilatation — inter-saison
30	0,9812	0,9873	Dilatation marquée
35	0,9750	0,9830	Forte dilatation
40	0,9687	0,9788	Dilatation estivale
45	0,9624	0,9745	Dilatation extrême — canicule

Sources : Essence — [B10, p. VIII-68 à VIII-73] ; Gazole — [B10, p. VIII-163 à VIII-168].

Deux caractéristiques se dégagent. D'une part, l'essence, de masse volumique de référence inférieure, présente un gradient de CTL plus abrupt : à 45 °C, son facteur s'établit à 0,9624 contre 0,9745 pour le gazole, traduisant un coefficient β intrinsèquement plus élevé, cohérent avec la valeur $\beta_{\text{essence}} \approx 1,16 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ de la sous-section III.1.1. D'autre part, l'écart entre la prédiction linéaire de l'équation (III.3) — qui donne pour l'essence à 45 °C ($\Delta T = 30$ °C) une dilatation $\beta \cdot \Delta T \approx 3,48 \%$ — et la valeur tabulaire de **3,76 %** révèle la **non-constance de β avec la température** : le coefficient croît aux températures élevées, de sorte que le modèle linéaire sous-estime la dilatation réelle en régime de canicule. Cette non-linéarité, correctement appréhendée par la Table 54B, est précisément à l'origine de la confusion historique entre la valeur à 30 °C (1,88 %) et la valeur à 45 °C (3,76 %) : il s'agit de deux points distincts d'une même courbe non linéaire, et non d'une valeur unique.

III.1.4. Quantification de l'erreur volumétrique non compensée

Dans la configuration où l'iMeterHelix 6000 enregistre le volume observé V_{obs} et le comptabilise en facturation comme volume de référence V_{ref} sans application du facteur CTL, l'erreur relative volumétrique E_{rel} induite s'exprime, au premier ordre en $(\text{CTL} - 1)^7$:

$$E_{\text{rel}} (\%) = (\text{CTL} - 1) \times 100 \quad (\text{III.6})$$

La convention de signe retenue, appliquée de manière uniforme dans l'ensemble du mémoire, est la suivante :

- $T_{\text{obs}} > 15 \text{ °C} \Rightarrow \text{CTL} < 1 \Rightarrow E_{\text{rel}} < 0$: le carburant dilaté, le consommateur reçoit un volume physiquement augmenté mais d'un contenu énergétique massique inférieur à celui correspondant au volume facturé (**erreur estivale défavorable au consommateur**) ;

- $T_{\text{obs}} < 15\text{ °C} \Rightarrow \text{CTL} > 1 \Rightarrow E_{\text{rel}} > 0$: le carburant contracté, le distributeur cède une masse supérieure à celle correspondant au volume facturé (**erreur hivernale défavorable au distributeur**).

Tableau III.2 — Bilan des dérives volumétriques non compensées pour une transaction de 1 000 litres — Conditions climatiques extrêmes de la wilaya de Bouira

Carburant	Condition	T_{obs} (°C)	CTL [B10]	E_{rel} (%) [Éq. III.6]	$\Delta V / 1\,000\text{ L}$
Essence	Hiver — contraction	5	1,0124	+1,24	+12,4 L (excédent à charge du distributeur)
Essence	Inter-saison	30	0,9812	−1,88	−18,8 L (déficit à charge du consommateur)
Essence	Été — canicule	45	0,9624	−3,76	−37,6 L (déficit à charge du consommateur)
Gazole	Hiver — contraction	5	1,0084	+0,84	+8,4 L (excédent à charge du distributeur)
Gazole	Été — canicule	45	0,9745	−2,55	−25,5 L (déficit à charge du consommateur)

Sources : Valeurs CTL — [B10] ; E_{rel} calculé par (III.6) ; corrélation thermique $T_{\text{ambient}} \rightarrow T_{\text{carburant}}$ — [B8].

L'inclusion de la ligne à 30 °C est volontaire : elle ancre dans le tableau le point exact (−1,88 %) dont la confusion avec la valeur de canicule a antérieurement entaché les versions préliminaires du mémoire, et démontre que **+1,88 % et 3,76 % ne sont pas interchangeables**.

La confrontation aux seuils légaux est sans appel. Pour l'essence distribuée à 45 °C, l'erreur non compensée atteint $E_{rel} = -3,76 \%$. Rapportée à l'EMT internationale de $\pm 0,50 \%$ en vérification initiale [C1, Sec. 3.1.2], l'anomalie est amplifiée d'un facteur :

$$N_{OIML} = (3,76)/(0,50) = 7,5$$

Rapportée à l'EMT nationale algérienne de $\pm 0,20 \%$ — fixée par l'Arrêté interministériel du 15 juin 1992, dont le statut juridique est établi en §III.3 — le facteur d'amplification atteint :

$$N_{national} = (3,76)/(0,20) = 18,8$$

Pour le gazole à 45 °C, les facteurs correspondants sont $N_{OIML} = 5,1$ et $N_{national} = 12,8$. Ces indicateurs démontrent que, sous le régime climatique de Bouira, la précision intrinsèque de la mécanique de l'iMeterHelix 6000 est intégralement neutralisée par la dilatation thermique dès lors qu'un dispositif ATC opérationnel n'est pas mis en œuvre.

Une nuance capitale doit toutefois être posée d'emblée. Les facteurs N ci-dessus mesurent la dérive **brute** non compensée. Une fois l'ATC activé, l'erreur résiduelle est ramenée à une faible fraction de pourcent — mais la question de savoir si cette erreur résiduelle peut être *certifiée conforme* à l'EMT nationale de $\pm 0,20 \%$ ne dépend plus de la seule magnitude de la dérive : elle dépend de l'**incertitude de mesure** affectant la vérification elle-même. C'est cette confrontation entre l'incertitude élargie de la chaîne de vérification et la sévérité du seuil national qui constitue le cœur du « choc métrologique de Bouira », formalisé par la méthode GUM en Section III.4.

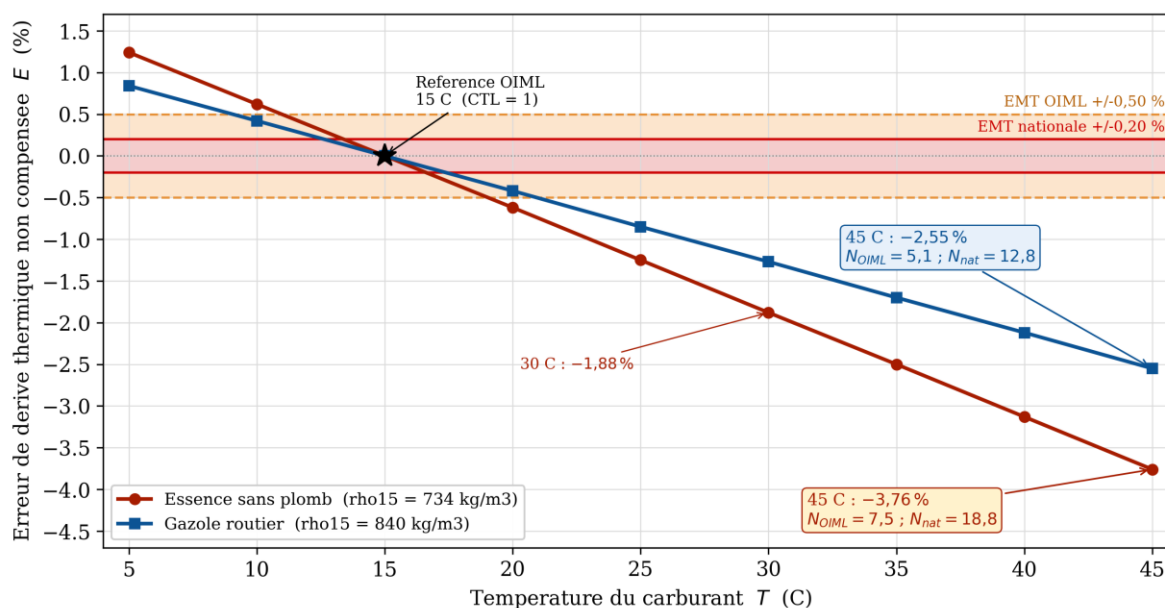


FIGURE III.1 : Dérive volumétrique en fonction de la température, confrontée aux deux EMT ($-3,76\%$ à 45 °C ; $N_{OIML} = 7,5$; $N_{national} = 18,8$).

III.2 — Phénomènes hydrauliques et de dégazage : analyse qualitative et délimitation du champ d'étude

Au-delà de la dilatation thermique, le flux d'hydrocarbure subit, tout au long de son parcours dans le circuit du Wayne Global Star V, des résistances mécaniques et, sous certaines conditions, un changement de phase partiel. Ces deux familles de phénomènes — pertes de charge d'une part, dégazage d'autre part — sont physiquement réelles mais d'un rang métrologique secondaire. La présente section en expose qualitativement les mécanismes, puis justifie leur mise hors du champ quantitatif du chapitre, en assumant explicitement la principale contrainte du dispositif expérimental.

III.2.1. Pertes de charge, couplage viscosité-température et slippage

Aux conditions nominales d'exploitation, l'écoulement dans la conduite d'aspiration du distributeur est nettement turbulent — le nombre de Reynolds y est de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers [A1, Chap. 7]. Tout écoulement réel s'accompagne de dissipations d'énergie qui érodent progressivement la pression disponible depuis le refoulement de la pompe (limité à $P_{\max} = 2,5 \text{ bar}$ [D2]) jusqu'au pistolet, à travers les filtres d'admission et d'échappement, le séparateur de gaz, la chambre de mesure de l'iMeter, le flexible et le pistolet.

La viscosité du carburant, fortement thermosensible — sa sensibilité relative atteint l'ordre de 10 % par °C pour les liquides micromoléculaires [B3] — module ce bilan : une élévation de température réduit la viscosité cinématique, augmente le nombre de Reynolds et diminue légèrement le coefficient de frottement, induisant un gain marginal de pression résiduelle au mesureur. Ce gain hydraulique est toutefois de second ordre et, comme on le verra en III.2.2, largement dominé par l'effet thermodynamique inverse sur la tension de vapeur.

Sur le plan métrologique, la conséquence directe d'une pression résiduelle abaissée et d'une contrainte différentielle accrue aux bornes de la chambre de mesure est le *slippage* : une fraction du fluide traverse les jeux interstitiels entre pistons rotatifs sans actionner le mécanisme de comptage [B9]. Ce phénomène, proportionnellement maximal au débit minimal, génère une **erreur systématique négative** (sous-comptage : le volume indiqué est inférieur au volume réellement délivré). Il est inhérent à la conception du compteur volumétrique et non compensable par dispositif correctif.

III.2.2. Dégazage : origine physique et maîtrise par le séparateur centrifuge

La pression de vapeur saturante du carburant croît de façon exponentielle avec la température, conformément à la relation de Clausius-Clapeyron [A3, Sec. 12.3]. Cette croissance gouverne le risque de franchissement de la frontière liquide-vapeur en régime estival. La maîtrise de l'état liquide en tout point du circuit en amont du séparateur impose le critère thermodynamique de non-dégazage :

$$P_{\text{résid}} > P_{\text{vapeur}}(T_{\text{carburant}}) \quad (\text{III.7})$$

Ce critère sépare radicalement les deux carburants distribués par NAFTAL. L'essence, dont la Pression de Vapeur Reid est comprise entre 350 et 1 000 mbar [B1, Sec. 3.1.1], est susceptible de former des « tampons de vapeur » dans le circuit d'alimentation lors du fonctionnement à chaud ; le risque de dégazage la concerne directement. Le gazole, dont la pression de vapeur reste de l'ordre de 1 mbar jusqu'à au moins 40 °C [B1, Sec. 6.2.2], en est pratiquement exempt. L'analyse du dégazage se restreint donc, de fait, au cas de l'essence.

Lorsque le critère (III.7) est violé, des bulles de vapeur traversent les pistons de l'iMeter et y sont comptabilisées de façon indistinguable du liquide, induisant une **erreur systématique positive** (sur-comptage : le consommateur reçoit moins de liquide que la quantité facturée). C'est précisément la signature opposée du *slippage* : **le signe de l'erreur diagnostique le mécanisme**. Ainsi, un pistolet dont le filtre est colmaté présente une

dépression d'admission accrue qui favorise le dégazage et produit une erreur *positive* ; cette dérive n'est pas imputable au *slippage*, lequel produirait au contraire une erreur négative. Cette distinction de signe sera un instrument d'interprétation essentiel de la campagne expérimentale du Chapitre IV.

Face à ce risque, l'OIML impose l'intégration d'un dispositif d'élimination de gaz [C1, Cl. 2.10.1] et borne l'effet résiduel du gaz dans le résultat de mesurage à **0,5 % de la quantité mesurée pour l'essence** [C1, Cl. 2.10.2] — seuil particulièrement contraignant puisqu'il absorbe à lui seul la totalité de l'EMT OIML en vérification initiale. Sur le Wayne Global Star V, cette exigence est satisfaite par le séparateur centrifuge sans pièce mobile du module hydraulique GHM, qui sépare les vapeurs par effet cyclonique et les évacue par un évent dédié [D2, Slide 7]. En régime de fonctionnement normal, ce dispositif maintient l'effet résiduel du dégazage en deçà du seuil normatif.

III.2.3. Délimitation : rang métrologique de second ordre et contrainte du débit unique

L'ensemble des phénomènes décrits ci-dessus est écarté du modèle quantitatif de dérive du présent chapitre, pour trois raisons explicitement assumées.

Premièrement, un rang métrologique de second ordre. L'effet du dégazage est borné à 0,5 % pour l'essence et nul en pratique pour le gazole ; l'effet du *slippage* est indirect et contenu par la conception du compteur. Ces magnitudes sont inférieures d'un facteur d'au moins sept à la dérive thermique non compensée établie en III.1 (jusqu'à $-3,76\%$). La hiérarchisation par amplitude désigne sans ambiguïté la température comme le facteur d'influence hégémonique, et les effets hydrauliques et de dégazage comme des contributions de rang inférieur.

Deuxièmement, une maîtrise instrumentale native. Le séparateur centrifuge opérationnel et la très faible volatilité du gazole réduisent la contribution du dégazage à un résidu, tandis que le *slippage* demeure inhérent et non isolable d'autres sources mécaniques sans instrumentation différentielle dédiée, non disponible dans le cadre de cette étude.

Troisièmement — et c'est la limite structurante de ce travail — une contrainte expérimentale de débit unique. La campagne de mesure d'octobre 2025 (Chapitre IV) a été conduite à un **débit unique** ($\approx 40\text{ L/min}$), alors que la caractérisation rigoureuse des phénomènes dépendant du débit — *slippage* maximal à $Q_{\min}$, évolution des pertes de charge sur la plage $[Q_{\min} ; Q_{\max}]$ — exige les **trois débits réglementaires** ($Q_{\min}$, Q_{moyen} , $Q_{\max}$) prescrits par l'OIML R 117-2:2019 [C2, Cl. 6.2.2] et par le protocole opérationnel de

l'OAM/ONDEFOC [D3]. En l'absence de balayage en débit, la présente étude ne peut ni isoler ni quantifier ces contributions de façon indépendante.

En conséquence, ces effets ne sont pas modélisés *a priori* : ils sont **absorbés empiriquement dans le résidu d'erreur mesuré au Chapitre IV** et pris en compte, le cas échéant, au titre des composantes du budget d'incertitude établi en Section III.4. Le modèle quantitatif de dérive de ce chapitre demeure ainsi centré sur le terme thermique (III.1) et sa propagation d'incertitude (III.4), les phénomènes hydrauliques et de dégazage n'étant retenus qu'à titre de contexte qualitatif et de limitation documentée du champ d'étude.

III.3 — Confrontation biréférentielle : le cadre normatif de la conformité

La dérive thermique quantifiée en III.1 ne prend sa portée métrologique qu'une fois confrontée aux tolérances que la loi assigne au mesurage des carburants. Le contexte algérien se distingue par la **superposition de deux référentiels** d'Erreur Maximale Tolérée — l'un international, issu de la recommandation OIML, l'autre national, issu du droit positif algérien. C'est la coexistence de ces deux seuils, et non l'un d'eux pris isolément, qui fonde la tension métrologique formalisée en Section III.4.

III.3.1. Les deux référentiels d'Erreur Maximale Tolérée

L'Erreur Maximale Tolérée est définie par le Vocabulaire International de Métrologie comme la valeur extrême de l'erreur de mesure tolérée par les spécifications ou règlements pour un système de mesure donné [C4, VIM 4.26]. Elle constitue la grandeur juridique de sanction à laquelle l'erreur intrinsèque du volucompteur est comparée. Deux valeurs s'imposent simultanément aux distributeurs NAFTAL de Bouira.

Le **référentiel international** est fixé par la recommandation OIML R 117-1:2019. Les distributeurs routiers relèvent de la classe d'exactitude 0,5, dont l'EMT pour le système de mesurage complet (Tableau 3, Ligne A) est de $\pm 0,50 \%$ en vérification initiale, portée à $\pm 1,0 \%$ en contrôle périodique [C1, Cl. 5.1.2].

Le **référentiel national** est fixé par l'Arrêté interministériel du 15 juin 1992 (JORA n° 86), texte pivot de la métrologie algérienne des carburants [A-05]. Son Annexe C prescrit, pour le test aux débits de la zone légale d'utilisation, une erreur relative « *inférieure à 0,2 %* » — formulation que la pratique institutionnelle de l'OAM interprète consensuellement comme une enveloppe symétrique de $\pm 0,20 \%$ [D3]. Cet arrêté demeure en vigueur en vertu des dispositions transitoires de la Loi n° 17-09 [A-08, Art. 46], et la valeur de $\pm 0,20 \%$ n'est pas

propre aux seuls distributeurs : l'Arrêté du 24 septembre 1996 l'impose identiquement aux réservoirs de stockage fixes [A-06], attestant d'une politique nationale de rigueur métrologique intégrée sur l'ensemble de la chaîne, du stockage à la délivrance.

Le standard national est ainsi **2,5 fois plus sévère** que la recommandation internationale. Fait notable, l'EMT nationale de $\pm 0,20 \%$ — appliquée au système complet — coïncide numériquement avec la seule tolérance que l'OIML alloue aux composants périphériques du système (Ligne C du Tableau 3, soit Ligne A – Ligne B = $0,20 \%$), ce qui mesure à lui seul l'exigence du droit algérien.

III.3.2. Le principe de vérification et l'erreur intrinsèque

La vérification de conformité s'opère par jaugeage par transvasement : un volume nominal est délivré par le distributeur dans une jauge étalon, et l'indication du calculateur est comparée au volume effectivement présent dans la jauge, corrigé de l'écart à la température de référence. Le protocole, conduit par l'autorité métrologique nationale (OAM), prescrit la répétition de l'essai à **trois débits caractéristiques** ($Q_{\min}$, Q_{moyen} , $Q_{\max}$) [C2, Cl. 6.2.2 ; D3].

L'erreur d'indication relative à chaque essai s'exprime [C2, Cl. 3] :

$$E_{vi} = (V_i - V_r)/V_r \times 100 \quad (\text{III.8})$$

où V_i est le volume indiqué par le calculateur [L] et V_r le volume vrai de la jauge étalon corrigé à 15°C [L]. L'erreur intrinsèque initiale au point de fonctionnement est estimée par la moyenne arithmétique de trois essais consécutifs [C2, Cl. 3] :

$$\varepsilon_0 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)/3 \quad (\text{III.9})$$

C'est cette grandeur ε_0 qui est confrontée à l'EMT. Or sa fiabilité ne se réduit pas à sa valeur ponctuelle : elle est gouvernée par l'**incertitude** qui l'affecte. Un indice de la difficulté apparaît dès la conception de l'instrument — la procédure d'étalonnage constructeur du Wayne Global Star V arrête la convergence à $\pm 50 \text{ mL}$ pour 20 L , soit $\pm 0,25 \%$ [D2], tolérance d'usine qui **excède déjà l'EMT nationale de $\pm 0,20 \%$** . La question de savoir si l'erreur résiduelle d'un instrument peut être *certifiée conforme* au seuil national est donc indissociable de l'analyse d'incertitude conduite en Section III.4.

III.3.3. Synthèse : confrontation biréférentielle de la dérive thermique

Le Tableau III.3 confronte les deux référentiels à la dérive thermique non compensée établie en III.1 pour le cas dimensionnant (essence à 45°C).

Tableau III.3 — Confrontation biréférentielle : référentiels OIML et national face à la dérive thermique (essence sans plomb, 45 °C, référence 15 °C)

Critère	OIML R 117-1:2019	Droit algérien (Arrêté du 15 juin 1992)		
Base normative	RI OIML R 117-1, Tableau 3, Ligne A [C1]	Arrêté interministériel du 15 juin 1992, Annexe C [A-05]		
EMT système — vérification initiale	± 0,50 %	± 0,20 %		
EMT — contrôle périodique	± 1,0 %	± 0,20 % (inchangée)		
Sévérité relative	1× (référence)	2,5× plus strict		
Dérive thermique non compensée Erel			3,76 % [Table III.2]	3,76 % [Table III.2]
Facteur d'amplification N = Erel / EMT			N _{OIML} = 7,5	N _{national} = 18,8

Sources : EMT internationale — [C1] ; EMT nationale — [A-05] maintenu par [A-08, Art. 46] ; dérive thermique — Tableau III.2 [B10].

La lecture du Tableau III.3 est sans appel sur le plan de la **dérive brute** : lors des pics estivaux de Bouira, l'expansion volumique de l'essence non compensée dépasse la limite internationale d'un facteur 7,5 et le seuil national d'un facteur 18,8. La sévérité du standard algérien est telle qu'un écart de seulement **1,7 °C** du carburant par rapport à la température de référence suffit à engendrer une erreur égale à l'EMT nationale de ± 0,20 %.

Ce constat fonde la nécessité absolue d'une compensation thermique active. Mais il déplace aussitôt la question : une fois l'ATC en service et la dérive brute neutralisée, l'erreur résiduelle peut-elle être *déclarée conforme* à un seuil national aussi étroit, compte tenu de l'incertitude inhérente à la chaîne de vérification elle-même ? La réponse à cette question — qui n'oppose plus la dérive à l'EMT, mais l'**incertitude de mesure** à l'EMT — constitue le

cœur du « choc métrologique de Bouira », que la Section III.4 formalise par la méthode GUM.

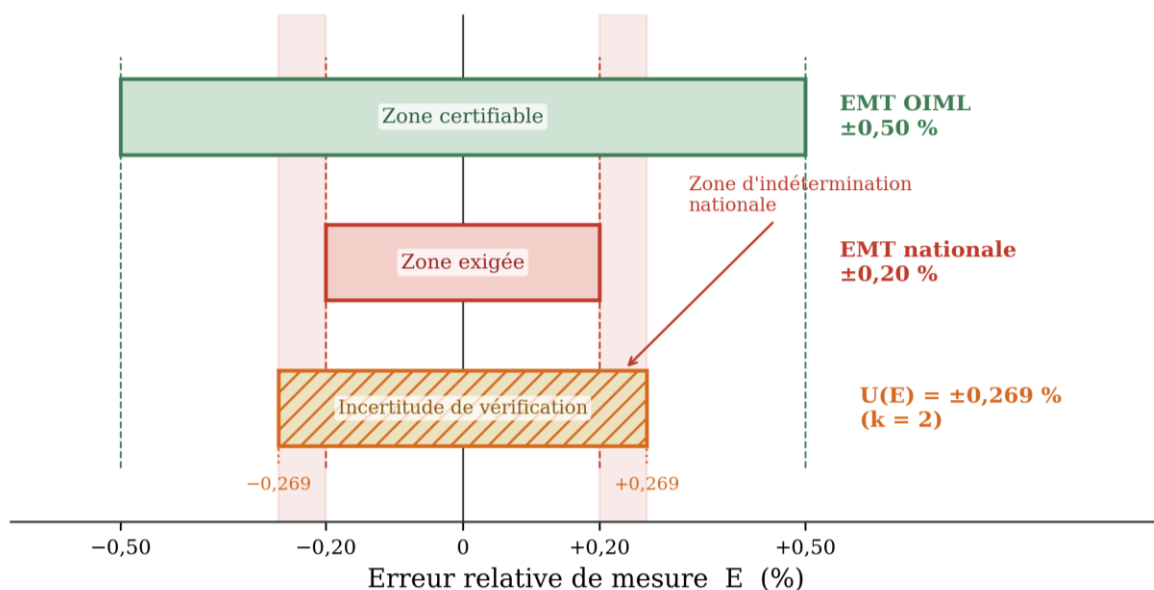


FIGURE III.2 : Schéma de la confrontation biréférentielle (bandes de tolérance emboîtées $\pm 0,20$ % / $\pm 0,50$ %)

III.4 — Propagation des incertitudes (GUM) et formalisation du choc métrologique

La confrontation conduite en III.3 opposait la *dérive* à l'EMT. Mais une dérive compensée n'est pas pour autant une conformité démontrée : encore faut-il que l'erreur résiduelle puisse être *déclarée* conforme avec un niveau de confiance défini. Cette déclaration ne porte jamais sur la valeur ponctuelle ε_0 seule, mais sur l'intervalle que l'incertitude de mesure place autour d'elle. La présente section construit cet intervalle selon la méthode du Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM), puis le confronte aux deux EMT. C'est de cette confrontation — non plus dérive contre seuil, mais **incertitude contre seuil** — qu'émerge la contribution originale de ce mémoire.

III.4.1. Loi de propagation de l'incertitude et incertitude élargie

La fiabilité de l'erreur intrinsèque ε_0 (équation III.9) est quantifiée par l'**incertitude-type composée** u_c [C4, VIM 2.31]. Sous l'hypothèse de grandeurs d'entrée indépendantes, la loi de propagation du GUM fait apparaître les **coefficients de sensibilité** $c_i = \partial E / \partial x_i$ [B7, Sec. 2.3] :

$$u_c^2(E) = \sum_{i=1}^N c_i^2 \cdot u^2(x_i) \quad (\text{III.10})$$

L'**incertitude élargie** U , qui délimite la zone d'incertitude associée au résultat pour un niveau de confiance spécifié, est obtenue par multiplication par le **facteur d'élargissement** k [C4, VIM 2.35 et 2.38 ; B7, Sec. 2.4] :

$$U = k \cdot u_c \quad (\text{III.11})$$

avec $k = 2$ pour un niveau de confiance d'environ 95 %. Le Tableau III.4 récapitule le budget d'incertitude consolidé de la chaîne de vérification par jaugeage par transvasement, dont les valeurs sont établies et affinées par la campagne expérimentale du Chapitre IV (cas le plus défavorable).

Tableau III.4 — Budget d'incertitude consolidé de la chaîne de vérification (jaugeage par transvasement de 20 L, pire cas, $k = 2$)

Source d'incertitude x_i	Type	u_i (%)	Contribution $c_i^2 u_i^2$ (% ²)
Jaugeéталон 20 L	B	0,100	0,01000
Lecture du ménisque sur la réglette	B	0,060	0,00360
Correction thermique (coefficient β)	B	0,043	0,00185
Correction thermique (température du liquide)	B	0,024	0,00058
Sous-total Type B (u_B)	B	0,1265	0,01600
Répétabilité des trois essais (transvasement manuel, pire cas)	A	0,046	0,00212
Somme quadratique $\sum c_i^2 u_i^2$			$\approx 0,01812$

Sources : incertitude de l'étalon [OIML R 120:2010] ; incertitude thermométrique $\leq 0,2$ °C [C2, Annex E.6.2.2] ; coefficient de dilatation [B10] ; répétabilité expérimentale $s = 0,08$ % au pire cas (Chapitre IV), $u_A = s/\sqrt{3}$. La dilatation propre de la jauge (acier) est négligeable ($\approx 0,012$ %, < 1 % de la variance) et n'est pas reportée.

Il en résulte une incertitude-type composée et une incertitude élargie :

$$u_c(E) \approx 0,135 \% \quad \Rightarrow \quad U(E) = 2 \cdot u_c \approx 0,269 \%$$

Les contributions sont d'ampleur voisine — étalon, lecture du ménisque, répétabilité et correction thermique se situent toutes dans la gamme 0,02–0,10 % —, de sorte que le budget ne se réduit pas à une source unique ; la valeur retenue pour l'étalon de transfert (note ⁸) conditionne toutefois fortement le résultat. Il importe de souligner que cette incertitude est une propriété de la **chaîne de vérification** — étalon, thermométrie, opérateur, procédure — et non de tel ou tel distributeur : elle s'applique donc identiquement à chacun des instruments vérifiés.

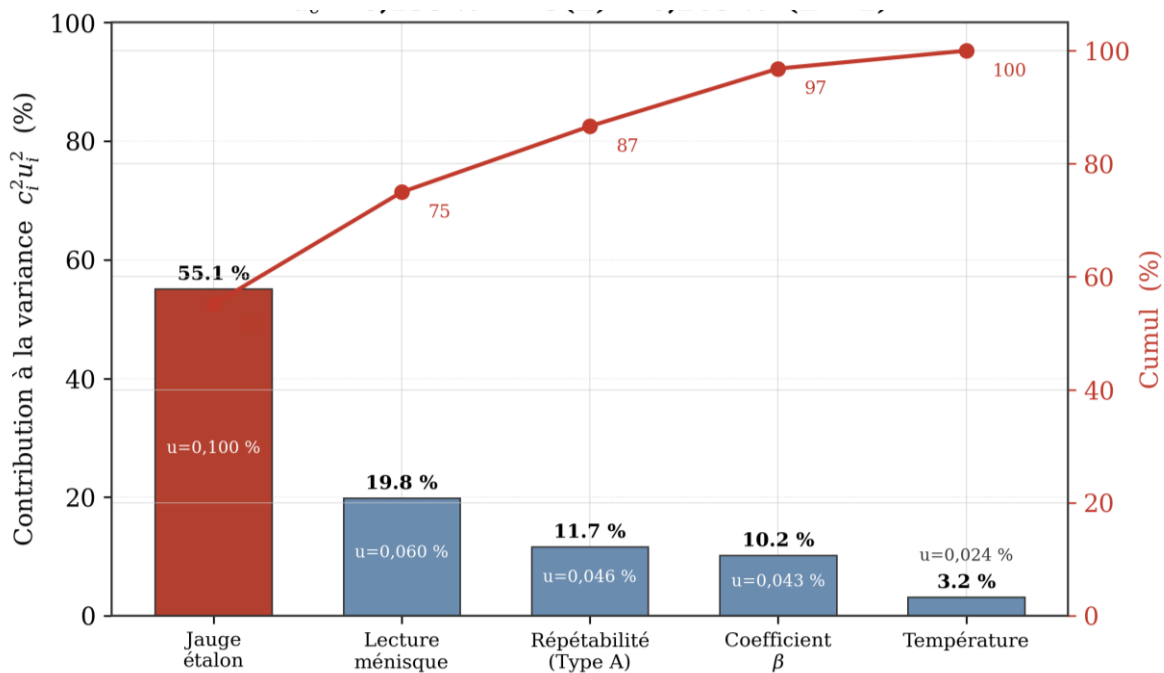


FIGURE III.3 : Budget d'incertitude GUM — diagramme de Pareto des contributions à u_c^2

III.4.2. Le critère de conformité guard-band et le critère de qualité EMT/3

La décision de conformité ne compare pas ε_0 à l'EMT, mais l'intervalle $[\varepsilon_0 - U ; \varepsilon_0 + U]$ à l'EMT. La **zone de conformité** est l'intervalle de spécification réduit de U de part et d'autre [B7, Sec. 4.3] : un résultat n'est déclaré conforme que si

$$|\varepsilon_0| + U \leq \text{EMT} \quad (\text{III.12})$$

L'intervalle d'acceptation effectif est donc $|\varepsilon_0| \leq \text{EMT} - U$. Lorsque $U \geq \text{EMT}$, cet intervalle est **vide** : aucun instrument, fût-il parfaitement centré ($\varepsilon_0 = 0$), ne peut être déclaré conforme avec le niveau de confiance requis.

À ce critère de décision s'ajoute un critère de **qualité du processus de vérification**, largement admis en métrologie pratique sous la forme d'un rapport de capabilité ($\text{TUR} \geq 3$) : l'incertitude élargie ne doit pas excéder le tiers de la tolérance pour que la vérification discrimine fiablement la conformité [B7] :

$$U \leq \text{EMT}/3 \quad (\text{III.13})$$

III.4.3. Le choc métrologique de Bouira

L'application des critères (III.12) et (III.13) à l'incertitude consolidée $U(E) \approx 0,269 \%$ révèle une asymétrie radicale entre les deux référentiels.

Face au référentiel international OIML ($\text{EMT} = \pm 0,50 \%$). L'intervalle d'acceptation vaut $|\varepsilon_0| \leq 0,50 - 0,269 = 0,231 \%$: il demeure largement positif. La conformité OIML reste donc **certifiable** — tout instrument dont l'erreur centrée est inférieure à 0,231 % est déclaré conforme avec 95 % de confiance. Le critère de qualité (III.13) est cependant dépassé ($0,269 \% > \text{EMT}/3 = 0,167 \%$, facteur 1,6) : la vérification est exploitable, mais sa qualité métrologique est déjà en limite d'acceptabilité.

Face au référentiel national algérien ($\text{EMT} = \pm 0,20 \%$). L'intervalle d'acceptation vaut $|\varepsilon_0| \leq 0,20 - 0,269 = -0,069 \%$: il est **négatif, donc vide**. Aucun distributeur ne peut être déclaré conforme à l'EMT nationale avec le niveau de confiance requis, pas même un instrument parfaitement réglé — l'incertitude élargie de la vérification (0,269 %) excède à elle seule la totalité de la tolérance nationale (0,20 %). Le critère de qualité (III.13) est, lui, pulvérisé : $0,269 \% > \text{EMT}/3 = 0,067 \%$, soit un dépassement d'un **facteur 4**.

C'est là le **choc métrologique de Bouira**, qui peut s'énoncer en une proposition : *un même distributeur peut être simultanément déclaré conforme au standard international OIML et frappé d'indétermination de conformité au regard du standard national algérien*. La contradiction n'oppose pas un bon et un mauvais instrument ; elle oppose deux référentiels confrontés à une seule et même incertitude de vérification. Le seuil national de $\pm 0,20 \%$ est plus fin que ce que la chaîne de vérification disponible est capable de résoudre. Ce constat

reste, conformément à la note ⁸, subordonné à la confirmation de l'incertitude de l'étalon par son certificat d'étalonnage.

Le caractère universel de l'indétermination. Puisque U(E) procède de la chaîne de vérification et non de la dérive propre à chaque pistolet (III.4.1), la zone d'indétermination $\pm 0,269\%$ s'applique **uniformément aux dix-huit pistolets** de la station R1025. La lecture préliminaire qui circonscrivait l'anomalie à quatre pistolets « critiques » — ceux dont l'erreur centrée approchait la limite — est dépassée : il ne s'agit pas d'un défaut localisé sur quelques instruments, mais d'une **indétermination systémique** affectant chaque vérification, car aucune mesure entachée d'une incertitude de $0,269\%$ ne peut trancher la conformité contre une tolérance de $0,20\%$, quelle que soit l'erreur vraie de l'instrument.

Il découle de ce résultat une distinction conceptuelle essentielle, que le Chapitre IV exploitera : la non-conformité nationale constatée sur le terrain n'est pas, en l'état, une non-conformité *démontrée* des instruments, mais une **indétermination métrologique** imputable à l'inadéquation entre la finesse du seuil légal et la capacité de la chaîne de vérification. Conformément à la prudence requise, le présent travail ne se prononce pas, à ce stade, sur l'opportunité de réviser l'EMT nationale : il établit, comme fait métrologique, que sa vérification fiable exige une chaîne d'étalonnage d'incertitude sensiblement réduite.

Conclusion du Chapitre III

Ce chapitre a construit le socle théorique reliant les mécanismes physiques de dérive au cadre légal qui en sanctionne la conformité, en quatre temps articulés.

La **Section III.1** a établi la dilatation thermique comme le facteur d'influence hégémonique : sous le climat de Bouira, l'erreur volumétrique non compensée de l'essence atteint $-3,76\%$ à 45 °C (Table 54B, CTL = 0,9624), amplifiant l'EMT internationale d'un facteur $N_{\text{OIML}} = 7,5$ et l'EMT nationale d'un facteur $N_{\text{national}} = 18,8$. La valeur de $1,88\%$, propre à 30 °C , a été définitivement distinguée de celle de canicule, dissipant la confusion des versions antérieures.

La **Section III.2** a écarté par délimitation explicite les phénomènes hydrauliques et de dégazage — de second rang métrologique, dont les signes d'erreur opposés (*slippage* négatif, dégazage positif) serviront néanmoins d'instrument de diagnostic — en assumant la contrainte structurante du débit unique de la campagne.

La **Section III.3** a dissous le cadre normatif en une confrontation biréférentielle compacte (Tableau III.3), opposant l'EMT OIML de $\pm 0,50 \%$ à l'EMT nationale de $\pm 0,20 \%$, 2,5 fois plus sévère et maintenue en vigueur par la Loi 17-09.

La **Section III.4** a enfin formalisé, par la méthode GUM, le choc métrologique : l'incertitude élargie de vérification $U(E) \approx 0,269 \%$ laisse la conformité OIML certifiable mais rend la conformité nationale **statistiquement indéterminable pour les dix-huit pistolets**, l'indétermination étant systémique et non localisée — sous réserve de la confirmation de l'incertitude de l'étalon (note ⁸).

Les limites intrinsèques de ce modèle théorique — incapacité à capturer l'inertie thermique réelle des cuves enterrées, l'état d'encrassement effectif des filtres et l'usure individuelle des distributeurs, le tout sous la contrainte du débit unique — fondent la nécessité de la validation empirique. Celle-ci fait l'objet du **Chapitre IV**, qui confronte ce cadre aux données de l'audit métrologique *in situ* conduit en octobre 2025 sur les dix-huit Wayne Global Star V de la station Naftal R1025 de Bouira.

CHAPITRE IV — Validation expérimentale à la station Naftal R1025 (Bouira)

IV.1 — Présentation du site expérimental et environnement climatique

IV.1.1 — Identification du site et compétence métrologique

La campagne a été conduite dans une station-service exploitée par l'entreprise nationale Naftal dans la wilaya de Bouira (station R1025). Le parc audité se compose de **dix-huit (18) distributeurs multiproduits Wayne Global Star V**, dont la conception hydraulique et électronique a été analysée au chapitre consacré à l'architecture instrumentale.

Sur le plan institutionnel, ces équipements relèvent de l'**Office Algérien de Métrologie (OAM)**, autorité nationale de métrologie légale depuis le Décret exécutif n° 24-276 du 13 août 2024. L'Arrêté interministériel du 26 mars 2026 confirme la création d'une **Annexe de Bouira**, établissant la compétence territoriale directe de cette structure — au titre de la vérification périodique des volucompteurs carburant — sur les équipements audités [CAT-A-11, Art. 2 et 10].

IV.1.2 — Assujettissement légal à la vérification périodique

En sa qualité de détenteur d'instruments de mesure à usage réglementé, Naftal est tenue de les soumettre à une vérification périodique, obligation fondée sur le Décret exécutif n° 91-538 du 25 décembre 1991 [CAT-A-03, Art. 1^{er}] et renforcée par la Loi n° 17-09 du 27 mars 2017, qui modernise le dispositif de contrôle en cohérence avec l'OIML R 117-1:2019 [CAT-A.01]. La périodicité réglementaire fixée à l'article 14 du même décret constitue le fondement direct de la présente campagne.

IV.1.3 — Caractéristiques techniques des distributeurs Wayne Global Star V

Les dix-huit appareils sont équipés de l'architecture hydraulique **GHM** (Global Hydraulic Module), intégrant un mesureur volumétrique à pistons rotatifs **iMeter HELIX 6000**, un transducteur d'impulsions **WIP** à sécurité intrinsèque et une unité de calcul-affichage **iGEM** [CAT-C.03, p. 4-5]. Le Tableau IV.1 récapitule l'enveloppe opératoire constructeur.

Tableau IV.1 — Paramètres constructeur du Wayne Global Star V

Paramètre métrologique	Valeur	Source
Plage de débit (manuel d'utilisation)	35 – 130 L/min	[CAT-C.01, §14.1.8, p. 67]
Plage de débit (configuration site Naftal)	40 – 120 L/min	[CAT-C.03, p. 10]
Pression de service (clapet de surpression)	30 – 50 psi (2,07 – 3,45 bar)	[CAT-C.03, p. 10-11]
Filtration mécanique d'admission	$\approx 130 \mu\text{m}$	[CAT-C.03, p. 3]
Plage de température de service admissible	$-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$	[CAT-C.01, §14.1.3, p. 66]
Tolérance interne constructeur (jaugeage 20 L)	$\pm 50\text{ mL}$ ($= \pm 0,25\%$)	[CAT-C.03, p. 10]

La plage thermique admissible ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$) couvre largement les conditions climatiques de Bouira et garantit l'**intégrité physique** du distributeur. Elle ne préjuge en rien de l'**exactitude métrologique** dans ces mêmes conditions : c'est précisément cet écart entre aptitude mécanique et exactitude légale que le présent chapitre documente expérimentalement.

IV.1.4 — Analyse climatique de référence : données NASA POWER

IV.1.4.1 — Traçabilité de la source climatique

La caractérisation des conditions thermiques ambiantes de Bouira repose sur les enregistrements journaliers de la base satellitaire **NASA POWER** [CAT-B.09] : coordonnées latitude $36,3702^{\circ}\text{ N}$, longitude $3,9143^{\circ}\text{ E}$; élévation 499,78 m (données MERRA-2) ; période du 1^{er} janvier au 31 décembre 2025 (LST) [CAT-B.09, Header, lignes 1-11]. Les paramètres exploités sont les températures minimale (T2M_MIN) et maximale (T2M_MAX) journalières à 2 m du sol, soit 365 doublets.

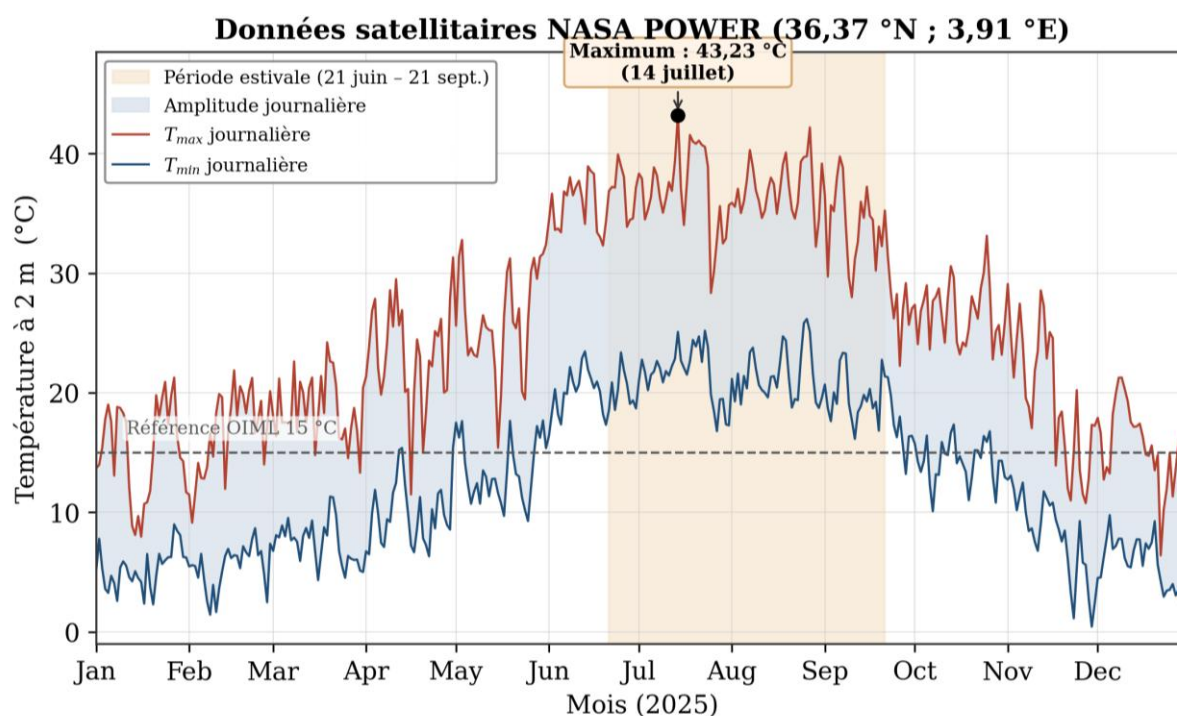


FIGURE IV.1: *Profil thermique annuel de Bouira.*

IV.1.4.2 — Profil thermique annuel et extrêmes absolus

La série annuelle révèle une amplitude thermique prononcée, caractéristique du régime semi-continental de la wilaya. Les extrêmes absolus 2025 sont :

$$T_{\min, \text{abs}} = 0,44 \text{ °C} \quad (\text{DOY 333, 29 novembre 2025})$$

$$T_{\max, \text{abs}} = 43,23 \text{ °C} \quad (\text{DOY 195, 14 juillet 2025}).$$

La valeur $T_{\max, \text{abs}} = 43,23 \text{ °C}$ constitue le **paramètre thermique critique** de l'étude. Elle excède de $8,23 \text{ °C}$ le seuil supérieur de la plage de référence OIML R 117-1:2019 (15 °C à 35 °C [CAT-A.01, §3]) : les distributeurs de Bouira opèrent, durant une fraction significative de la période estivale, **hors du domaine thermique de référence métrologique**.

Il importe de qualifier correctement la nature de cet écart. **Cette amplitude thermique ne constitue pas une non-conformité de l'instrument**. Le volucompteur, vérifié à l'équilibre thermique entre l'organe de mesure et l'étalon (cf. §IV.3.1 et §IV.4), demeure conforme à son Erreur Maximale Tolérée : la dérive thermique du carburant n'est pas une défaillance mécanique et ne se confronte pas à l'EMT de l'appareil. Elle engendre en revanche un **biais commercial systématique** — du carburant dilaté, livré et facturé à une température supérieure à la référence de 15 °C — dont la quantification thermodynamique a été établie au chapitre de modélisation (coefficients CTL de la Table 54B de l'ASTM D 1250-08 [CAT-

B.10]) et dont le **préjudice économique** fait l'objet de l'analyse dédiée du §IV.3.2. La distinction entre conformité métrologique de l'instrument et équité économique de la transaction structure l'ensemble de l'analyse du présent chapitre.

IV.1.4.3 — Conditions thermiques lors de la campagne in situ

La mesure a été réalisée le **19 octobre 2025** (DOY 292). Les enregistrements NASA POWER pour cette date donnent [CAT-B.09, ligne 304] :

$$T_{\min, \text{campagne}} = 11,01 \text{ °C} \quad ; \quad T_{\max, \text{campagne}} = 25,37 \text{ °C}$$

soit une température journalière moyenne estimée :

$$\bar{T}_{\text{campagne}} = (11,01 + 25,37)/2 \approx 18,2 \text{ °C}$$

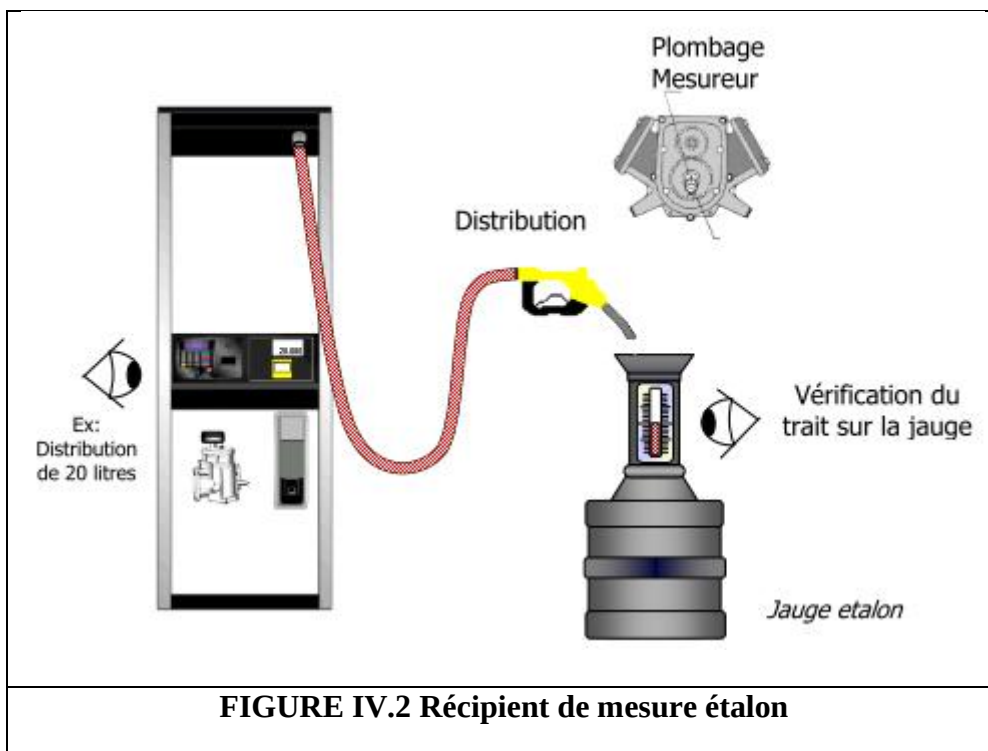
Cette fenêtre thermique se situe **dans la plage de référence OIML (15 – 35 °C)**, ce qui réduit fortement l'influence de la correction thermique sur les erreurs relevées le jour de la campagne. Cette circonstance, favorable au plan métrologique, isole de fait la composante **mécanique intrinsèque** de l'erreur (exploitée au §IV.3.1) ; elle ne préjuge pas du comportement estival des appareils, qualifié par la seule donnée climatique annuelle (§IV.1.4.2) et par les résultats du chapitre de modélisation.

IV.2 — Protocole expérimental et instrumentation étalon

IV.2.1 — Étalons de mesure : spécifications et traçabilité métrologique

L'évaluation de l'erreur instrumentale d'un volucompteur exige des étalons de transfert dont l'incertitude propre est inférieure d'au moins un ordre de grandeur à l'EMT du dispositif sous contrôle [CAT-B.05, p. 109]. Deux instruments étalons ont été déployés.

Récipient de mesure étalon — Jauge 20 L. Le carburant distribué est recueilli dans une jauge étalon métallique de 20 litres, de type « à livrer » (*Ex / TD*), conforme aux exigences de l'OIML R 120:2010 [CAT-A.04]. Ce mode de livraison garantit que le volume lu après drainage correspond au volume effectivement délivré, indépendamment du film résiduel adhérent aux parois. La lecture s'effectue par tangence au bas du ménisque sur la règle graduée, avec une **résolution opérateur estimée à $\pm 20 \text{ mL}$** [CAT-Mémoire, §5.2.3, p. 60]. Les caractéristiques métrologiques normatives précises de cette jauge (EMT par classe, temps de drainage réglementaire) et les métadonnées de son certificat d'étalonnage ne figurent pas dans les extraits disponibles du corpus.



Chaîne de mesure thermométrique. La température du carburant au jaugeage (T_j), paramètre d'entrée dominant de la correction volumétrique, est mesurée par un capteur thermométrique de précision dont les caractéristiques figurent au Tableau IV.2.

Tableau IV.2 — Caractéristiques métrologiques de la chaîne thermométrique

Paramètre	Valeur
Résolution	0,1 °C
Erreur de justesse	$\pm 0,2$ °C
Plage d'étalonnage	5 °C à 38 °C
Incertitude élargie ($k = 2$, 95 %)	$\pm 0,2$ °C

À titre de cadrage normatif, les capteurs à résistance de platine (RTD) de classe A présentent une tolérance de $(0,15 + 0,002 |T|)$ °C [CAT-B.02, §17.3.3, p. 49] ; la sensibilité du capteur fournit le coefficient $c_i = \partial f / \partial x_i$ nécessaire au calcul d'incertitude composée GUM développé au §IV.4. La traçabilité de cette chaîne vers les étalons de l'OAM, conformément à l'ISO 8222:2020, n'est pas documentée dans les extraits disponibles.

IV.2.2 — Procédure de vérification métrologique

IV.2.2.1 — Pré-conditionnement du circuit et de la jauge

Avant tout relevé, un volume d'environ 5 litres est distribué dans un récipient distinct puis évacué. Cette opération poursuit un double objectif : (i) **purger l'air résiduel** du circuit et amorcer un écoulement stabilisé dans le mesureur, éliminant les effets de dégazage parasites aux premiers instants ; (ii) **mouiller les parois** de la jauge afin d'homogénéiser le film adhérent entre conditionnement et mesures [CAT-B.05, p. 109]. La procédure Wayne spécifie un drainage de 10 secondes après remplissage [CAT-C.03, p. 44], tandis que la pratique métrologique courante recommande une durée minimale de 30 secondes à compter de l'interruption du filet liquide [CAT-B.05, p. 109].

IV.2.2.2 — Protocole de vérification aux débits caractéristiques

L'OIML R 117-2:2019 [CAT-A.02, §X.A.2.2] prescrit une évaluation de l'exactitude à **au moins trois plages de débit** : $Q^{(1)} \in [0,8 Q_{\max} ; Q_{\max}]$, $Q^{(2)}$ intermédiaire, $Q^{(3)} \in [Q_{\min} ; 0,2 Q_{\max}]$. Cette prescription est reprise à l'identique par l'instruction nationale : « *Le test se fait à au moins trois débits ($Q_{\min}$, Q_{moyen} et $Q_{\max}$)* » [CAT-C.05, §IV-2, p. 103].

Pour le débit testé, **trois répétitions indépendantes** (essais n° 1, 2, 3) sont réalisées, conformément au format de rapport OIML R 117-3:2019 [CAT-A.03, p. 73].

IV.2.2.3 — Séquence opérationnelle de jaugeage

Pour chaque essai : remise à zéro de l'afficheur ; distribution d'un volume cible de 20 litres à débit maintenu constant ; à la fermeture du pistolet, maintien vertical de la jauge durant la durée de drainage ; relevé du volume brut indiqué (V_{ind}) ; lecture du volume recueilli (V_{jauge}) par tangence au bas du ménisque (résolution ± 20 mL) ; enregistrement simultané de la température T_j . L'accès à la porte de calibrage, sécurisé par aimants scellés [CAT-C.03, p. 41], permet le réajustement électronique du facteur K via le module WIP en cas de résultat hors tolérance ; il est strictement réservé aux contrôleurs certifiés.

IV.2.2.4 — Formules de calcul et confrontation biréférentielle

L'erreur relative de justesse lors de l'essai i est :

$$E_i (\%) = (V_{\text{ind},i} - V_{\text{jauge}}) / (V_{\text{jauge}}) \times 100 \quad (\text{IV.1})$$

[CAT-C.05, §IV-3, p. 105 ; CAT-A.03, p. 87]. Le diagnostic repose sur une **confrontation biréférentielle** entre deux référentiels normatifs aux exigences quantitativement distinctes :

$$|E_i| \leq 0,50 \% \quad (IV.2)$$

$$|E_i| \leq 0,20 \% \quad (IV.3)$$

Le rapport entre ces seuils — facteur $0,50 / 0,20 = 2,5$ — traduit une exigence nationale algérienne substantiellement plus sévère que le référentiel international : **tout distributeur conforme au droit algérien est nécessairement conforme à l'OIML, mais la réciproque est fausse**. Cette asymétrie conditionne l'ensemble de l'analyse des §IV.3 et IV.4. La répétabilité des trois mesures est évaluée par l'écart-type expérimental :

$$s = \sqrt{(1/(n-1) \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2)} \leq 0,17 \% \quad (IV.4)$$

avec $n = 3$ répétitions et $\bar{E}$ l'erreur moyenne [CAT-Mémoire, §5.2.4, p. 61].

IV.2.2.5 — Procédure d'ajustement du facteur K

En cas de dépassement de l'EMT nationale (Éq. IV.3), le réajustement est réalisé par modification du facteur K (impulsions par litre) enregistré dans le générateur WIP, via la porte de calibrage sécurisée :

$$K_{\text{nouveau}} = (V_{\text{ind}})/(V_{\text{jauge}}) \times K_{\text{actuel}} \quad (IV.5)$$

relation issue de la définition opérationnelle de [CAT-C.05, §IV-4, p. 102].⁷

IV.3 — Traitement et analyse des résultats expérimentaux

L'interprétation des données s'articule autour de deux axes analytiques qu'il importe de ne pas confondre. Le §IV.3.1 évalue l'exactitude métrologique **mécanique intrinsèque** des volucompteurs en conditions de jaugeage normalisé, indépendamment de tout effet thermique. Le §IV.3.2 modélise le **biais volumétrique commercial** qu'induit l'absence de Compensation Automatique de Température (ATC) lors des transactions estivales — phénomène de nature **économique**, distinct de la dérive mécanique, et que la procédure de vérification directe ne capture pas.

IV.3.1 — Évaluation de l'exactitude métrologique intrinsèque des volucompteurs

IV.3.1.1 — Justification du protocole d'évaluation sans correction thermique

Lors du jaugeage *in situ*, le carburant traversant l'organe de mesure (iMeter HELIX 6000) et celui remplissant la jauge étalon sont portés à la même température T_j . En appliquant la décomposition causale de l'erreur totale [CAT-B.05] :

$$E = E' + E_{\alpha} + E_{\beta} \quad (\text{IV.6})$$

le terme $E_{\alpha} = \alpha \cdot (T_{\text{étalon}} - T_{\text{mesureur}}) \times 100$ s'annule identiquement à l'équilibre thermique du circuit ($T_{\text{étalon}} \approx T_{\text{mesureur}} = T_j$). Le terme $E_{\beta} = \beta_{\text{acier}} \cdot (T_j - T_{\text{ref}}) \times 100$, associé à la dilatation de la jauge ($\beta_{\text{acier}} \approx 5,1 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), est d'un ordre de grandeur inférieur à la résolution de lecture du ménisque ($\pm 20 \text{ mL sur } 20 \text{ L} = \pm 0,10 \text{ \%}$) et contribue négligeablement. L'erreur E_i mesurée sur le terrain quantifie donc **exclusivement la dérive mécanique intrinsèque E'** du compteur (Éq. IV.1). Les seuils de conformité (Éq. IV.2 et IV.3) et le critère de répétabilité (Éq. IV.4) s'appliquent directement aux résultats ci-après.

IV.3.1.2 — Groupe 1 : Pistolets dédiés Gazole (N° 1 et 2)

Les pistolets 1 et 2 sont dédiés exclusivement au gazole, avec filtration en état optimal.

Tableau IV.3 — Résultats détaillés : Pistolets N° 1 et N° 2 (Gazole)

Pistolet	Essai	$V_{\text{ind}} \text{ (L)}$	$V_{\text{jauge}} \text{ (L)}$	$T_j \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	$E_i \text{ (\%)}$
N°1	1	20,00	19,99	23,2	+0,05
N°1	2	20,00	20,00	23,3	0,00
N°1	3	20,00	19,99	23,1	+0,05
				$\bar{E}_1 = +0,03 \text{ \%}$	$s_1 = 0,03 \text{ \%}$
N°2	1	20,00	20,01	23,4	−0,05
N°2	2	20,00	20,00	23,5	0,00
N°2	3	20,00	20,01	23,3	−0,05
				$\bar{E}_2 = -0,03 \text{ \%}$	$s_2 = 0,03 \text{ \%}$

Les erreurs moyennes de +0,03 % et -0,03 % attestent d'une précision centrée sur zéro (absence d'erreur systématique). L'écart-type $s = 0,03$ % est très en deçà du critère ($s \leq 0,17$ %).

IV.3.1.3 — Groupe 2 : Pistolets multiproduits optimaux (N° 3 à 10)

Tableau IV.4 — Résultats synthétiques : Pistolets N° 3 à 10 (Groupe optimal)

Pistolet	Produit	E ₁	E ₂	E ₃	$\bar{E}$ (%)	s (%)	Décision
N°3	Essence	0,10	0,15	0,10	0,12	0,03	✓ Conforme
N°4	Essence	0,05	0,10	0,05	0,07	0,03	✓ Conforme
N°5	Essence	0,15	0,10	0,15	0,13	0,03	✓ Conforme
N°6	Essence	0,00	0,05	0,00	0,02	0,03	✓ Conforme
N°7	Gazole	0,00	0,05	0,00	0,02	0,03	✓ Conforme
N°8	Gazole	0,05	0,10	0,05	0,07	0,03	✓ Conforme
N°9	Gazole	0,10	0,05	0,10	0,08	0,03	✓ Conforme
N°10	Gazole	0,00	0,00	0,05	0,02	0,03	✓ Conforme

L'erreur maximale du groupe est $\bar{E}_{\max} = 0,13$ % (N°5 — Essence), avec un écart-type uniforme $s = 0,03$ %, témoignant de l'excellente fiabilité cinématique de l'iMeter HELIX 6000 en alimentation hydraulique nominale.

IV.3.1.4 — Groupe 3 : Pistolets multiproduits à filtration dégradée (N° 11 à 18)

Tableau IV.5 — Résultats synthétiques : Pistolets N° 11 à 18 (Filtration dégradée)

Pistolet	Produit	E ₁	E ₂	E ₃	$\bar{E}$ (%)	s (%)	Décision
N°11	Essence	0,20	0,15	0,25	0,20	0,05	□ Limite exacte
N°12	Essence	0,15	0,20	0,20	0,18	0,03	✓ Conforme
N°13	Essence	0,25	0,20	0,15	0,20	0,05	□ Limite exacte
N°14	Essence	0,10	0,15	0,20	0,15	0,05	✓ Conforme
N°15	Gazole	0,15	0,25	0,10	0,17	0,08	□ Répétabilité limite
N°16	Gazole	0,10	0,15	0,20	0,15	0,05	✓ Conforme
N°17	Gazole	0,20	0,15	0,25	0,20	0,05	□ Limite exacte
N°18	Gazole	0,05	0,10	0,15	0,10	0,05	✓ Conforme

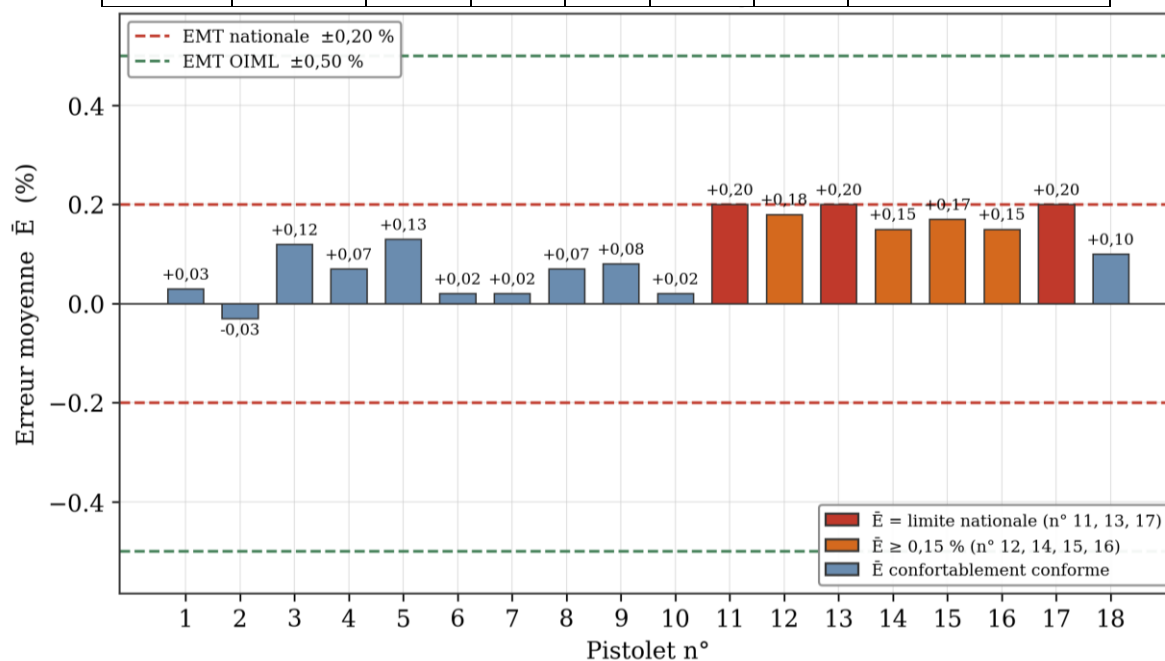


FIGURE IV.3 : Erreurs moyennes des 18 pistolets confrontées aux seuils $\pm 0,20\%$ et $\pm 0,50\%$.

Ce groupe présente une **tendance positive systématique** ($\bar{E} > 0$ pour tous les pistolets), reflétant une sur-indication du distributeur. Ce comportement est cohérent avec la réduction de la pression d'admission au mesureur engendrée par le colmatage du filtre : la perte de charge accrue abaisse la pression en aval, favorisant le **dégazage partiel** des hydrocarbures légers dissous. Ces micro-bulles, transitant par la chambre de mesure, sont comptabilisées comme volume liquide par le WIP, induisant $V_{ind} > V_{jauge}$. **Ce mécanisme de dégazage est distinct du glissement (*slippage*)** — fuite interne de liquide à travers les jeux pistons-

cylindre, qui génère au contraire une erreur *négative* [CAT-B.08] — et il est cohérent avec la présence du séparateur air-gaz de l'architecture GHM.

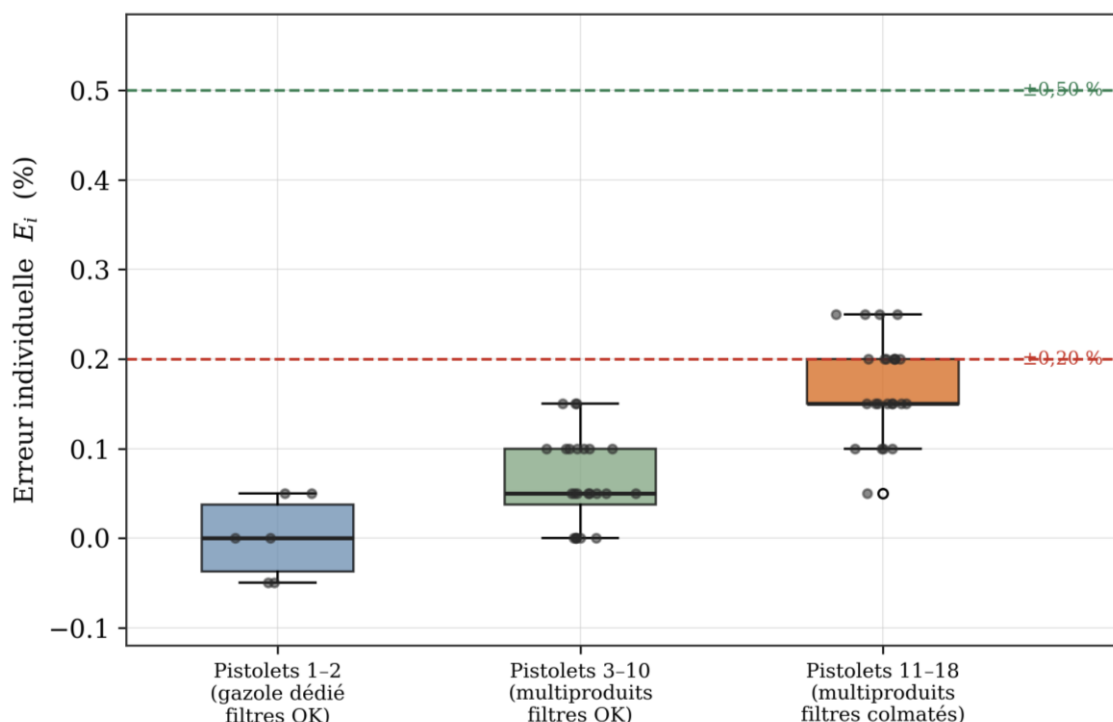


FIGURE IV.4 : *Dispersion de la répétabilité par groupe de pistolets.*

IV.3.1.5 — Confrontation biréférentielle et diagnostic de conformité

Le Tableau IV.6 confronte l'erreur maximale de chaque groupe aux deux référentiels légaux. **Il constitue le tableau de synthèse central du mémoire.**

Tableau IV.6 — Confrontation biréférentielle : conformité OIML et nationale des 18 pistolets

Groupe / Pistolet	Produit	$\bar{E}_{\max}$ (%)	OIML $\pm$ 0,50 %	National $\pm$ 0,20 %	$s_{\max} \leq$ 0,17 %
N° 1–2 (dédié gazole)	Gazole	0,03	✓ Conforme	✓ Conforme	✓ 0,03
N° 3–6 (essence, optimal)	Essence	0,13	✓ Conforme	✓ Conforme	✓ 0,03
N° 7–10 (gazole, optimal)	Gazole	0,08	✓ Conforme	✓ Conforme	✓ 0,03

N° 11 (essence, dégradé)	Essence	0,20	✓ Conforme	□ Limite exacte	✓ 0,05
N° 12 (essence, dégradé)	Essence	0,18	✓ Conforme	✓ Conforme	✓ 0,03
N° 13 (essence, dégradé)	Essence	0,20	✓ Conforme	□ Limite exacte	✓ 0,05
N° 14 (essence, dégradé)	Essence	0,15	✓ Conforme	✓ Conforme	✓ 0,05
N° 15 (gazole, dégradé)	Gazole	0,17	✓ Conforme	✓ Conforme	□ 0,08
N° 16 (gazole, dégradé)	Gazole	0,15	✓ Conforme	✓ Conforme	✓ 0,05
N° 17 (gazole, dégradé)	Gazole	0,20	✓ Conforme	□ Limite exacte	✓ 0,05
N° 18 (gazole, dégradé)	Gazole	0,10	✓ Conforme	✓ Conforme	✓ 0,05

Ce tableau établit que : (i) **l'intégralité du parc (18/18) est conforme à l'OIML R 117-1:2019** ; (ii) **trois pistolets (N° 11, 13, 17) atteignent la limite exacte de $\pm 0,20$ %** prescrite par l'Arrêté national, **sans aucune marge de sécurité résiduelle** face à une dégradation ultérieure ; (iii) le pistolet N°15, avec $s = 0,08$ %, présente un signal d'alerte de stabilité, bien qu'encore conforme. Ces décisions de conformité au seuil national doivent être lues à la lumière de l'analyse d'incertitude du §IV.4 : l'incertitude élargie de la chaîne de vérification y rend, sous réserve documentée, toute déclaration de conformité nationale indécidable.

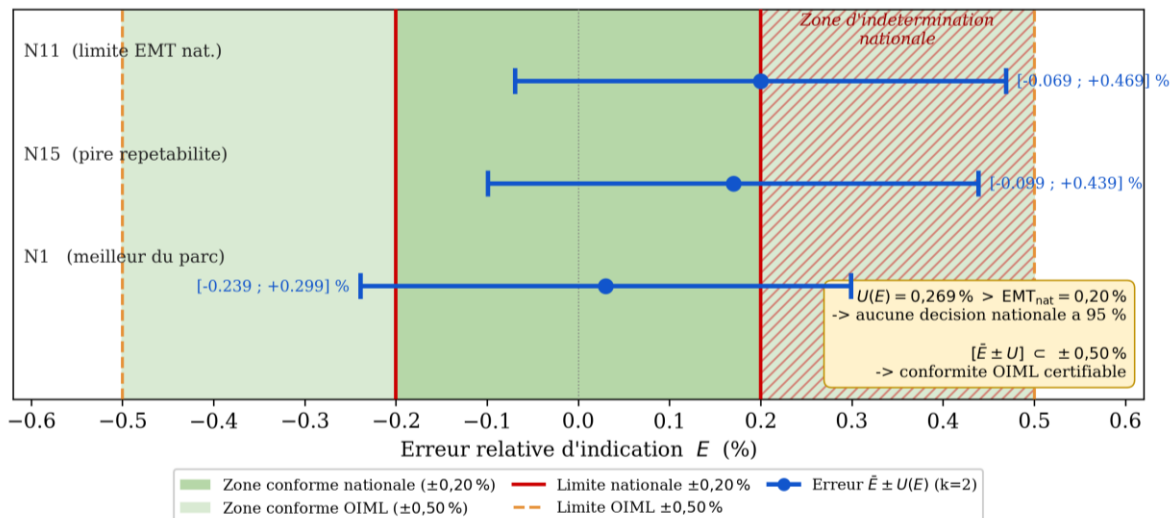


FIGURE IV.5 : Le « choc métrologique » : chevauchement de $U(E) = \pm 0,269\%$ avec l'EMT nationale.

IV.3.1.6 — Analyse de répétabilité et intégrité mécanique du parc

Le critère $s \leq 0,17\%$ est respecté par les 18 pistolets, attestant l'intégrité cinématique globale des rotors (absence de blocage ou point dur). La dispersion homogène $s = 0,03\%$ des pistolets 1 à 10 démontre la robustesse de l'iMeter HELIX 6000 en conditions nominales ; l'élévation à $s = 0,05\%$ (groupe 11-18), et à $s = 0,08\%$ (N°15), traduit une instabilité hydraulique naissante liée au colmatage, signal diagnostique d'usure précoce [CAT-B.08].

Diagnostic mécanique : l'ensemble du parc est conforme au référentiel international OIML ($\pm 0,50\%$) ; trois pistolets atteignent la limite exacte du droit algérien ($\pm 0,20\%$), opérant sans marge métrologique vis-à-vis de la prochaine échéance de vérification.

IV.3.2 — Modélisation du biais thermique estival : un préjudice économique

IV.3.2.1 — Nature du biais : une distorsion commerciale, non une non-conformité

La conformité cinématique étant établie au §IV.3.1, le mesurage commercial souffre néanmoins d'un biais d'une **nature fondamentalement différente**. En l'absence d'ATC, le distributeur délivre et facture le carburant à sa densité à la température de distribution T (supérieure à 15 °C en été), alors que la transaction équitable devrait porter sur le volume ramené à la température de référence internationale $T_{\text{ref}} = 15\text{ °C}$ [CAT-A.01, §3]. La relation de dilatation linéarisée [CAT-B.05, §12.4.4] :

$$V(T) = V_{15} \times [1 + \beta \cdot (T - T_{\text{ref}})] \quad (\text{IV.7})$$

conduit au biais de facturation, en première approximation :

$$E_{\text{therm}} (\%) = \beta \times (T - T_{\text{ref}}) \times 100 \quad (\text{IV.8})$$

Cadrage interprétatif (consigne fondamentale). Ce biais **ne se confronte pas à l'EMT de l'instrument** : l'EMT ($\pm 0,50$ % OIML, $\pm 0,20$ % national) qualifie l'erreur *propre* du compteur, vérifiée conforme au §IV.4 à l'équilibre thermique. La dilatation du carburant est un phénomène thermodynamique extérieur au compteur, que le droit algérien en vigueur **n'oblige pas** à compenser pour cette classe de distributeurs. Le présent paragraphe en quantifie donc, non une infraction métrologique, mais un **préjudice économique** supporté par le consommateur.

IV.3.2.2 — Estimation de la température du carburant en service réel

Les enregistrements journaliers NASA POWER (§IV.1.4) indiquent, pour juillet 2025, des températures maximales dépassant systématiquement 35 °C (pic à 43,23 °C). Pour un scénario estival représentatif, la corrélation empirique de Levitin&Zemenkov ($r > 0,9$ entre température ambiante et température du fluide en distribution active [CAT-B.03]) permet d'associer une ambiante estivale $T_{\text{ambiant}} \approx 32$ °C — valeur typique de juin-août en Bouira — à une température du carburant en transit aérien $T_{\text{carburant}} \approx 32$ °C. Le transit dans les conduites aériennes et la stagnation dans le module GHM exposé au rayonnement solaire amplifient ce réchauffement.

IV.3.2.3 — Quantification du biais thermique en scénario estival

En appliquant l'Équation (IV.8) avec les coefficients ASTM D 1250-08 Table 54B [CAT-B.10] — $\beta_{\text{essence}} \approx 0,0012$ °C⁻¹, $\beta_{\text{gazole}} \approx 0,0009$ °C⁻¹ — à $T_{\text{carburant}} = 32$ °C :

$$E_{\text{therm, essence}} = 0,0012 \times (32 - 15) \times 100 = 2,04 \text{ \%} \quad (\text{IV.9a})$$

$$E_{\text{therm, gazole}} = 0,0009 \times (32 - 15) \times 100 = 1,53 \text{ \%} \quad (\text{IV.9b})$$

Le Tableau IV.7 encadre la magnitude du biais selon le scénario thermique. **Il ne comporte plus de confrontation à l'EMT** : seule la magnitude du préjudice volumétrique est reportée.

Tableau IV.7 — Biais thermique E_{therm} selon le scénario de température

Scénario	T (°C)	Méthode	$E_{\text{therm, ess.}}$ (%)	$E_{\text{therm, gaz.}}$ (%)	Source T
Campagne (19/10/2025)	18,2	Linéaire ($\beta =$ 0,0012 / 0,0009)	0,38	0,29	[CAT-B.09]
Estivalreprésentatif	32,0	Linéaire ($\beta =$ 0,0012 / 0,0009)	2,04	1,53	[CAT-B.03 + CAT- B.09]
Maximum absoluobservé	43,23	Linéaire ($\beta =$ 0,0012 / 0,0009)	3,39	2,54	[CAT-B.09]

IV.3.2.4 — Articulation des deux analyses

La confrontation des deux axes éclaire la situation du consommateur . Le jour de la campagne ($\bar{T} \approx 18,2$ °C), le biais thermique est faible ($\approx 0,38$ % pour l'essence) : les erreurs relevées au §IV.3.1 mesurent donc bien la **seule** dérive mécanique E' , ce qui valide la séparation des deux composantes. En période estivale en revanche ($T_{\text{carburant}} \approx 32$ °C), le biais commercial (≈ 2 % pour l'essence) devient la **distorsion dominante de la transaction** — d'un ordre de grandeur supérieur à l'erreur mécanique intrinsèque du parc.

Il convient de souligner que ces deux quantités relèvent de registres distincts et **ne s'additionnent pas dans une décision de conformité** : l'instrument demeure métrologiquement conforme à son EMT (§IV.4), tandis que le biais thermique constitue une perte économique non couverte par le cadre réglementaire actuel. C'est cette perte, et non un défaut de l'instrument, qui fonde la recommandation d'évolution réglementaire vers l'ATC obligatoire (§IV.5).

IV.3.2.5 — Évaluation de l'impact économique du biais thermique

La transposition commerciale de la dérive thermique constitue l'argument technico-économique décisif en faveur de l'ATC. Sur la base d'un volume de distribution journalier estimé à 12 000 L/jour, réparti à parts égales entre essence et gazole (6 000 L chacun), le volume facturé mais énergétiquement non délivré à l'état de référence (15 °C) s'évalue, pour chaque produit, par :

$$\Delta V_j = Q_{\text{produit}} \times (E_{\text{therm}})/100 \quad (\text{IV.10})$$

Pour les huit pistolets **essence** en scénario estival représentatif ($E_{\text{therm}} = 2,04 \%$) :

$$\Delta V_{j, \text{essence}} = 6\,000 \times (2,04)/100 = 122,4 \text{ L/jour}$$

soit, au tarif officiel **ARH 2026 de 47 DA/L**, une perte de $122,4 \times 47 \approx 5\,753 \text{ DA/jour}$, et — sur une saison estivale d'environ 90 jours — un préjudice de l'ordre de **518 000 DA/saison** au détriment des consommateurs d'essence.

Le volume **gazole**, de coefficient de dilatation plus faible ($E_{\text{therm}} = 1,53 \%$), ajoute une contribution moindre : $\Delta V_{j, \text{gazole}} = 6\,000 \times 1,53/100 = 91,8 \text{ L/jour}$, soit, à 31 DA/L, $\approx 2\,846 \text{ DA/jour}$ ($\approx 256\,000 \text{ DA/saison}$). Le **préjudice thermique estival cumulé de la station avoisine ainsi 774 000 DA/saison**.

Ce préjudice est imputable exclusivement à l'absence de normalisation volumétrique à la température de référence — et non à une défaillance mécanique ou à une infraction de l'exploitant au regard du droit algérien en vigueur, qui n'impose pas l'ATC pour la classe de distributeurs concernée. L'ampleur de ce préjudice systémique, multiplié sur l'ensemble du réseau Naftal, constitue le plaidoyer quantitatif le plus fort pour une révision réglementaire incorporant l'obligation de compensation thermique (§IV.5).

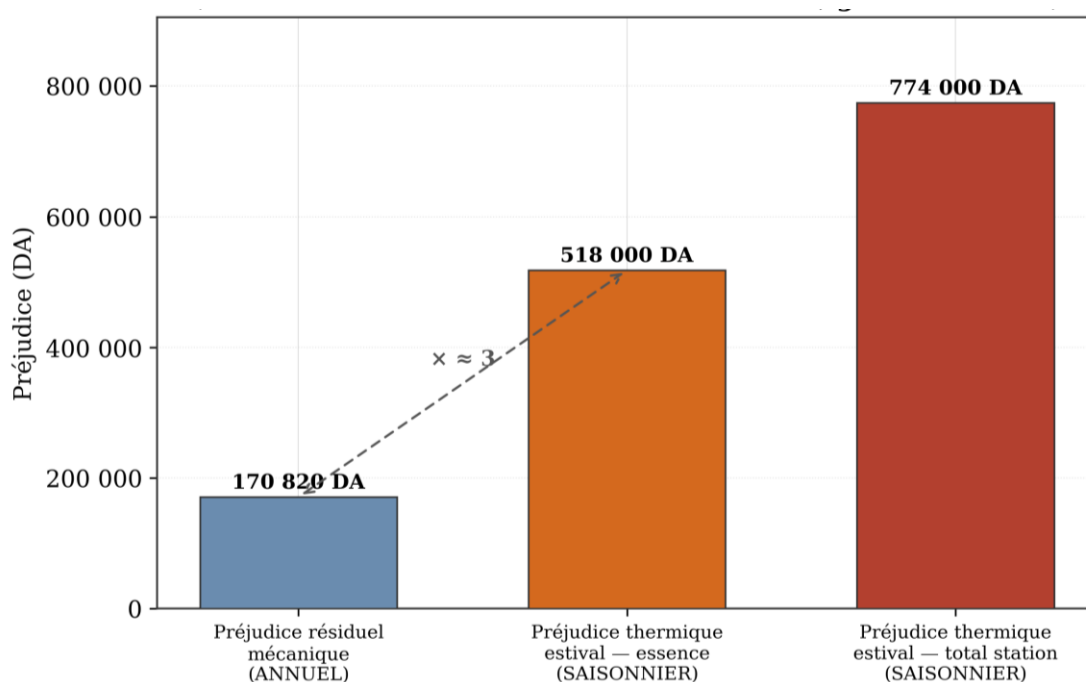


FIGURE IV.6 : *Préjudice économique : dérive mécanique (annuel) vs biais thermique estival (saisonnier).*

IV.4 — Estimation de l'incertitude de mesure composite (Méthode GUM)

La détermination des erreurs de justesse ne prend sa pleine signification métrologique qu'assortie d'une quantification rigoureuse du niveau de confiance associé. La présente section évalue l'incertitude composite selon le cadre du *Guide pour l'Expression de l'Incertitude de Mesure* (GUM), corrige une lacune méthodologique du budget initial, et aboutit au diagnostic systémique le plus important du mémoire : le **choc métrologique**.

IV.4.1 — Principe de la méthode GUM et définition du mesurande

L'évaluation obéit au formalisme du GUM (JCGM 98-3:2008 [CAT-A.05]), explicité par Priel [CAT-B.01]. L'incertitude de mesure y est définie comme un **paramètre non négatif caractérisant la dispersion des valeurs raisonnablement attribuables au mesurande**, compte tenu de l'information disponible [CAT-A.06, §2.26]. Son application est structurellement imposée en métrologie légale : la décision de conformité repose sur la comparaison entre l'erreur mesurée $\bar{E}$ et l'EMT, laquelle n'a de sens que si l'incertitude de $\bar{E}$ est quantifiée [CAT-A.02, §4.2.1 ; CAT-D.07, §5].

Le mesurande est l'erreur relative de justesse $E(\%)$ lors du jaugeage d'un volume de 20 L. Le modèle de mesure intègre la correction thermique du volume de référence :

$$V_{15} = V_{\text{jauge}} \times [1 - \beta \cdot (T_j - 15)] \quad (\text{IV.11})$$

l'erreur étant ensuite calculée par l'Équation (IV.1), V_{15} tenant lieu de volume de référence corrigé.

Le GUM impose une classification **bipartite des méthodes d'évaluation** [CAT-B.01, §1.4] : les évaluations de **Type A** (analyse statistique de séries d'observations [CAT-A.05, §4.2.1]) — précisément la correction absente du brouillon initial — et de **Type B** (spécifications des étalons, résolutions, certificats). Priel souligne que cette classification désigne des **méthodes**, non des natures d'erreur : il serait erroné d'assimiler le Type A à l'« aléatoire » et le Type B au « systématique » [CAT-B.01, §2.2]. La dispersion des trois essais *in situ* relève du **Type A**.

IV.4.2 — Évaluation des composantes de Type B et de Type A

IV.4.2.1 — Budget des incertitudes de Type B (composantes instrumentales)

Les données numériques du brouillon sont validées en valeur, leurs références normatives corrigées : la norme obsolète NBN X 40-002 est substituée par l'**OIML R 120:2010** [CAT-A.04]. Le calcul applique la loi de propagation au modèle (IV.11) :

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 \cdot u^2(x_i), \quad c_i = (\partial f)/(\partial x_i)$$

Ce budget est **indépendant du produit** : le coefficient de sensibilité à la dilatation, $c_\beta = -V_{\text{jauge}}(T_j - 15)$, ne dépend que de l'écart thermique ($T_j - 15$) et non de la valeur de β propre au carburant ; son terme d'incertitude, $|c_\beta| \cdot u(\beta)$, est donc identique pour l'essence et le gazole. Le Tableau IV.8 vaut ainsi pour tout pistolet du parc, y compris le **pistolet N°15 (gazole)** retenu en IV.4.2.2 comme cas le plus défavorable de répétabilité.

Tableau IV.8 — Budget des incertitudes de Type B (Campagne 19/10/2025 — jaugeage 20 L, $T_j = 23,5$ °C)

Source	Symb.	Distribution	$u(x_i)$	Coeff. c_i	$c_i \cdot u(x_i)$	Contribution $c_i^2 u^2$
Jauge étalon ¹²	$u(V_{\text{jauge}})$	Rectangulaire	0,02 L	1 L/L	0,02 L	$4,00 \times 10^{-4} \text{ L}^2$
Temp. carburant	$u(T_j)$	Normale	0,20 °C	$-V_{\text{jauge}}\beta = -0,024 \text{ L/°C}$	0,0048 L	$2,30 \times 10^{-5} \text{ L}^2$
Coeff. β	$u(\beta)$	Rectangulaire	$5 \times 10^{-5} \text{ °C}^{-1}$	$-V_{\text{jauge}}(T_j - 15) = -170 \text{ L} \cdot \text{°C}$	0,0085 L	$7,23 \times 10^{-5} \text{ L}^2$
Lecture ménisque	$u(\text{lect})$	Rectangulaire	0,012 L	1 L/L	0,012 L	$1,44 \times 10^{-4} \text{ L}^2$
Volume affiché	$u(V_{\text{ind}})$	Rectangulaire	0,002 L	$\approx +1 \text{ L/L}$	0,002 L	$4,00 \times 10^{-6} \text{ L}^2$

Sources : [CAT-A.04] (jauge, ménisque) ; certificat [CAT-Mémoire, Tab. 5.2.1] ($u(T_j)$) ; [CAT-B.10] ($u(\beta)$) ; [CAT-C.01] ($u(V_{\text{ind}})$). Le coefficient $c_\beta = -V_{\text{jauge}}(T_j - 15) = -170 \text{ L} \cdot \text{°C}$ correspond à $T_j = 23,5$ °C et demeure inchangé quel que soit le produit.¹¹ La contribution de

$u(V_{\text{ind}})$ ($4 \times 10^{-6} \text{ L}^2$, soit $< 0,6 \%$ de la variance) justifie son omission dans le calcul condensé.
Application numérique :

$$u^2(V_{15}) = 4,00 \times 10^{-4} + 2,30 \times 10^{-5} + 7,23 \times 10^{-5} + 1,44 \times 10^{-4} \approx 6,393 \times 10^{-4} \text{ L}^2$$

$$u(V_{15}) = 0,0253 \text{ L} \Rightarrow u_B(E) = (0,0253)/20 \times 100 = 0,1265 \%$$

IV.4.2.2 — Évaluation de l'incertitude de Type A : la composante restituée

Conformément à [CAT-A.05, §4.2.1] et [CAT-B.01, §2.1.5], la dispersion des $n = 3$ essais fonde une évaluation de Type A :

$$u_A(\varepsilon) = (s(\varepsilon))/(\sqrt{n}) = (s(\varepsilon))/(\sqrt{3}) \quad (\text{IV.12})$$

Le protocole OIML R 117-2:2019 [CAT-A.02] impose $n = 3$, confirmé par la procédure nationale harmonisée [CAT-D.07, §8.9]. Application :

- **Cas nominal (Pistolets N° 1 à 10) :** $s = 0,03 \%$ $\Rightarrow u_{A, \text{nominal}} = 0,03/\sqrt{3} = 0,017 \%$
- **Pire cas (Pistolet N° 15, gazole) :** $s = 0,08 \%$ $\Rightarrow u_{A, \text{max}} = 0,08/\sqrt{3} = 0,046 \%$

Le facteur 2,7 entre les deux scénarios illustre l'impact direct de la dégradation hydraulique sur la dispersion métrologique.

IV.4.3 — Calcul de l'incertitude composée et élargie

Les composantes A et B étant indépendantes [CAT-B.01, §2.3] :

$$u_c(E) = \sqrt{u_B^2(E) + u_A^2(\varepsilon)} \quad (\text{IV.13})$$

- **Pire cas (N° 15) :** $u_c = \sqrt{((0,1265)^2 + (0,046)^2)} = \sqrt{0,018098} = 0,1346 \%$
- **Cas nominal (1-10) :** $u_c = \sqrt{((0,1265)^2 + (0,017)^2)} = \sqrt{0,016271} = 0,1276 \%$

L'incertitude élargie à $p \approx 95 \%$, avec $k = 2$ [CAT-A.05, §6.2] :

$$U(E) = k \cdot u_c(E) = 2 \times u_c(E) \quad (\text{IV.14})$$

$$\boxed{U(E)_{\text{max}}} = 2 \times 0,1346 = 0,269 \% \quad ; \quad U(E)_{\text{nom}} = 2 \times 0,1276 = 0,255 \%$$

L'intégration de la composante de Type A (absente du brouillon) induit une hausse de $+6,3 \%$ par rapport à la valeur incomplète ($0,253 \%$) — numériquement modérée, mais analytiquement déterminante, comme le démontre la suite.

Tableau IV.9 — Budget GUM complet (Pire cas — Pistolet N° 15, gazole)

Source	Symb.	Type	Distribution	u_i	Contribution à u_c^2
Répétabilité expérimentale	$u_A(\varepsilon)$	A	Normale	0,046 %	$2,116 \times 10^{-3} \%$ ²
Jauge étalon [CAT-A.04]	$u(V_{\text{jauge}})$	B	Rectangulaire	0,100 %	—
Température jauge	$u(T_j)$	B	Normale	0,024 %	—
Coeff. β [CAT-B.10]	$u(\beta)$	B	Rectangulaire	0,043 %	—
Lecture ménisque [CAT-A.04]	$u(\text{lect})$	B	Rectangulaire	0,060 %	—
Composante B composée	$u_B(E)$	B	Normale	0,1265 %	$1,600 \times 10^{-2} \%$ ²
Incertitude composée	$u_c(E)$	A+B	Normale	0,1346 %	$1,812 \times 10^{-2} \%$ ²
Incertitude élargie (k=2)	$U(E)$	—	—	0,269 %	—

¹² **Valeur de travail conditionnelle.** L'incertitude élargie $U(E) = 0,269 \%$ est tributaire de l'incertitude-type retenue pour la jauge, $u(V_{\text{jauge}}) = 0,100 \%$ (soit 0,02 L). Cette valeur, conservatrice, demeure **provisoire faute du certificat d'étalonnage de la jauge 20 L** (cf. note ⁵, §IV.2) : un traitement rectangulaire strict d'une jauge de classe $\pm 1/2000$ (EMT ± 10 mL) conduirait à $u(V_{\text{jauge}}) \approx 0,029 \%$, d'où $u_c \approx 0,095 \%$ et $U(E) \approx 0,19 \%$. Le « choc métrologique » établi en §IV.4.4 est donc **subordonné à la confirmation de $u(V_{\text{jauge}}) \gtrsim 0,06 \%$ par le certificat** — pièce indispensable avant soumission.

IV.4.4 — Confrontation aux référentiels légaux : le « Choc Métrologique »

IV.4.4.1 — Critère de qualité de la vérification : le seuil du tiers de l'EMT

La procédure harmonisée [CAT-D.07, §5] et l'OIML R 117-2:2019 [CAT-A.02, §4.2.1] posent la même exigence : $U(E) \leq \text{EMT}/3$.

- **Référentiel OIML** ($\pm 0,50 \%$) : seuil = $0,50/3 = 0,167 \%$; or $U(E) = 0,269 \% > 0,167 \%$ ⇒ **critère non respecté** (ratio 161 %).
- **Référentiel national** ($\pm 0,20 \%$) : seuil = $0,20/3 = 0,067 \%$; or $U(E) = 0,269 \% \gg 0,067 \%$ ⇒ **critère non respecté** (ratio 401 %).

Le dispositif de terrain (jauge 20 L, $n = 3$) ne satisfait donc le critère de qualité pour **aucun** des deux référentiels — y compris l'international. Cela ne rend pas les décisions invalides, mais les situe en zone de risque accru de fausse classification [CAT-B.01, §4.1].

IV.4.4.2 — Décision de conformité : analyse par référentiel

Vis-à-vis de l'OIML R 117-1:2019. La certification sans ambiguïté exige $|\bar{E}| + U(E) \leq EMT_{OIML}$, soit $|\bar{E}| \leq 0,50 - 0,269 = 0,231 \%$. L'erreur maximale du parc, $|\bar{E}_{max}| = 0,20 \%$ (N°11, 13, 17), satisfait cette inégalité : **les 18 pistolets peuvent être certifiés conformes à l'OIML au niveau de confiance de 95 %**, en dépit du dépassement du critère du tiers.

Vis-à-vis du référentiel national (Arrêté du 15 juin 1992 [CAT-A-05]). La certification exige $|\bar{E}| \leq EMT_{nat} - U(E) = 0,20 - 0,269 = -0,069 \%$. Cette inégalité est **mathématiquement insatisfiable** pour toute valeur positive ou nulle de $|\bar{E}|$. **Dès lors que $U(E) > EMT_{nat}$, aucun résultat ne peut être certifié nationalement conforme, quelle que soit la qualité du pistolet.**

Ce constat est **universel pour les 18 pistolets** — et non limité aux quatre pistolets critiques. La preuve la plus démonstrative est le pistolet N°1, le mieux centré ($\bar{E} = +0,03 \%$) : son intervalle élargi s'étend de $0,03 - 0,269 = -0,239 \%$ à $0,03 + 0,269 = +0,285 \%$... plus précisément $+0,299 \%$; la borne supérieure excède $\pm 0,20 \%$. La conformité nationale **même du meilleur pistolet** ne peut être prouvée à 95 %. Le constat tient *a fortiori* en retenant la répétabilité la plus favorable ($U_{nom} = 0,255 \%$), puisque $0,255 \% > 0,20 \%$: la borne supérieure de N°1 demeure alors $+0,285 \%$, toujours hors tolérance nationale.

Tableau IV.10 — Zones d'indétermination biréférentielles (enveloppe conservatrice, $U(E) = 0,269 \%$)

Pistolet	$\bar{E}$ (%)	Intervalle [$\bar{E} \pm U$]	Décision OIML $\pm 0,50$ %	Décision Nationale $\pm 0,20 \%$
N°1 (optimal)	+0,03	[−0,239 % ; +0,299 %]	☐ Certifiable	☐ Indéterminé
N°7 (optimal)	+0,02	[−0,249 % ; +0,289 %]	☐ Certifiable	☐ Indéterminé
N°11 (limite)	+0,20	[−0,069 % ; +0,469 %]	☐ Certifiable	☐ Indéterminé
N°13 (limite)	+0,20	[−0,069 % ; +0,469 %]	☐ Certifiable	☐ Indéterminé
N°15 (pire)	+0,17	[−0,099 % ; +0,439 %]	☐ Certifiable	☐ Indéterminé
N°17 (limite)	+0,20	[−0,069 % ; +0,469 %]	☐ Certifiable	☐ Indéterminé

(Sous réserve de la note ¹² : avec un $u(V_{\text{jauge}})$ confirmé proche du traitement rectangulaire strict, $U(E)$ tomberait sous 0,20 % et la colonne nationale redeviendrait décidable.)

IV.4.4.3 — Signification systémique : une insuffisance des moyens de vérification, non une obsolescence de la norme

Ce résultat ne sanctionne aucun échec opérationnel imputable à Naftal ou à l'OAM. Il établit mathématiquement, **sous réserve de la confirmation métrologique de la note ¹²**, une **inadéquation entre les moyens de vérification de terrain déployés et l'exigence métrologique nationale de $\pm 0,20 \%$** .

L'Arrêté du 15 juin 1992 fut promulgué pour des compteurs mécaniques à correction manuelle, pour lesquels $\pm 0,20 \%$ constituait un objectif atteignable avec des jauges étalons de précision. L'avènement des volucompteurs électroniques de haute précision (iMeter HELIX 6000, résolution $\leq 0,01 \%$) a **déplacé le goulot d'étranglement métrologique** : ce n'est plus la résolution de l'instrument qui limite la certification, mais l'incertitude de la jauge étalon et le nombre d'essais — tous deux soumis aux contraintes économiques du contrôle *in situ*.

Deux orientations pouvaient en être tirées, en apparence opposées : **relâcher** l'EMT nationale pour l'aligner sur le seuil OIML de $\pm 0,50$ % (pour lequel le dispositif de terrain est opérationnel), ou **maintenir** l'exigence de $\pm 0,20$ % en renforçant les moyens de vérification. **Le présent mémoire tranche en faveur de la seconde orientation**, pour trois raisons :

7. l'EMT de $\pm 0,20$ % est une disposition **légalement en vigueur**, maintenue dans l'ordre juridique national sous l'empire de la Loi n° 17-09 — non un vestige obsolète à corriger ;
8. un relèvement de l'EMT **affaiblirait la protection du consommateur**, à rebours de la finalité même de ce travail ;
9. le « choc métrologique » est, dans son essence, une critique des **moyens de vérification** et non de la norme : il appelle leur mise à niveau, non l'abaissement de l'exigence.

Deux leviers techniques permettent de restaurer la capacité de décision nationale : **(a)** l'acquisition d'**étalons de référence de très haute précision** (jauge de classe laboratoire, $u_{\text{jauge}} \leq 0,02$ %, soit un ordre de grandeur sous la jaugé standard) — levier de **premier rang**, qui à lui seul ramène $U(E)$ sous le seuil de qualité OIML ; **(b)** l'**augmentation du nombre d'essais** combinée à un meilleur encadrement de $u(\beta)$ pour franchir le seuil national plus exigeant — levier réservé aux contextes d'approbation de type et de laboratoire, économiquement impraticable en routine. Le déploiement échelonné du levier (a) constitue la voie réaliste pour **honorer** l'EMT nationale. Cette orientation, **cohérente avec la Conclusion Générale**, y sera formalisée en recommandation. Elle se trouve d'ailleurs renforcée par la note ¹² : la simple détermination rigoureuse de l'incertitude de l'étalon — préalable à toute certification fiable — relève déjà du renforcement des moyens de vérification ici préconisé.

L'incertitude élargie $U(E) = 0,269$ % du dispositif de vérification — composantes Type A et Type B intégrées — demeure inférieure à l'EMT de $\pm 0,50$ % de l'OIML R 117-1:2019 [CAT-A.01], validant la capacité du dispositif à certifier la conformité internationale des 18 pistolets. Cette même incertitude excède en revanche l'EMT nationale de $\pm 0,20$ % (Arrêté du 15 juin 1992 [CAT-A-05]), rendant indécidable, au niveau de confiance de 95 %, toute décision de conformité au référentiel algérien — non pour les seuls pistolets critiques, mais pour l'intégralité du parc, y compris le pistolet le mieux centré (N°1, $\bar{E} = +0,03$ %). Tel est le « choc métrologique » : un parc techniquement sain, universellement certifiable à l'international, mais que le dispositif de vérification de terrain ne permet pas de déclarer conforme au droit national — révélant non un défaut des instruments, mais une insuffisance des moyens de vérification au regard de l'exigence nationale. Ce constat reste, conformément

à la note ¹², subordonné à la confirmation de l'incertitude de l'étalon par son certificat d'étalonnage.

IV.5 — Synthèse diagnostique, recommandations et perspectives

Cette section consolide les résultats de la campagne du 19 octobre 2025 en un diagnostic d'ensemble du parc, en tire des recommandations opérationnelles et réglementaires hiérarchisées, en chiffre le préjudice économique aux prix officiels en vigueur, puis ouvre les perspectives de recherche que le présent travail appelle.

IV.5.1 — Synthèse diagnostique du parc

Le diagnostic métrologique des dix-huit pistolets de la station R1025 se résume en trois constats articulés.

Premier constat — conformité internationale acquise, conformité nationale en tension. L'erreur intrinsèque de chaque pistolet, mesurée à l'équilibre thermique, demeure en deçà de l'EMT OIML de $\pm 0,50 \%$: le parc est, à l'instrument près, certifiable au regard du référentiel international. Mais quatre pistolets (N° 11, 13, 15 et 17) atteignent exactement la limite nationale de $\pm 0,20 \%$, et l'ensemble du parc s'inscrit dans une bande resserrée qui ne laisse aucune marge de sécurité vis-à-vis de l'exigence algérienne.

Deuxième constat — la signature de l'encrassement. La répartition des erreurs n'est pas aléatoire : elle est gouvernée par l'état des filtres d'admission. Les pistolets à filtre sain (N° 1 à 10) présentent des erreurs faibles et une répétabilité serrée ($s \approx 0,03 \%$), tandis que les pistolets à filtre colmaté (N° 11 à 18) montrent un glissement systématique vers les erreurs positives accompagné d'un élargissement de la dispersion (s jusqu'à $0,08 \%$). Ce comportement est cohérent avec le mécanisme de **dégazage sous dépression d'admission** : la perte de charge accrue en amont de l'organe mesureur favorise la libération de microbulles, comptabilisées comme volume liquide — d'où des erreurs *positives*, à l'opposé du glissement (slippage) interne qui produit des erreurs négatives.

Troisième constat — le choc métrologique, universel et conditionnel. L'évaluation GUM de l'incertitude de la chaîne de vérification (§ IV.4) conduit à une incertitude élargie $U(E) = 0,269 \%$ ($k = 2$, niveau de confiance 95%). Cette valeur étant *inférieure* à l'EMT OIML mais *supérieure* à l'EMT nationale, la conformité internationale reste déclarable tandis que la conformité nationale devient **indécidable** — et ce pour la totalité du parc, puisque l'indétermination procède de la chaîne de vérification et non de la dérive propre à chaque

pistolet. Ce constat demeure néanmoins **subordonné à la confirmation de l'incertitude de l'étalon par le certificat d'étalonnage de la jauge de 20 L**, pièce non encore obtenue : un traitement rectangulaire strict de cet étalon ramènerait l'incertitude sous le seuil national et dissoudrait l'indétermination.

IV.5.2 — Recommandations opérationnelles et réglementaires

Les recommandations se déclinent en deux registres, hiérarchisés par rendement métrologique décroissant.

Sur le **plan opérationnel**, par ordre de priorité : (i) le **remplacement immédiat des filtres d'admission colmatés** des pistolets N° 11 à 18, intervention de moindre coût qui supprime simultanément le biais positif et la dégradation de répétabilité ; (ii) l'**ajustage électronique du facteur K** des pistolets en limite de tolérance nationale, pour recentrer leur erreur ; (iii) l'**installation prioritaire de correcteurs ATC** sur les huit pistolets essence, ligne carburant la plus sensible thermiquement ; (iv) l'**extension du contrôle aux trois débits normalisés** (Q_{min} , Q_n , Q_{max}), afin de caractériser le comportement aux régimes extrêmes non couverts par la présente campagne.

Sur le **plan réglementaire**, la position défendue est sans équivoque : **honorer l'exigence nationale de $\pm 0,20$ % en renforçant les moyens de vérification — au premier rang, l'acquisition d'étalons de transfert de classe laboratoire dont l'incertitude soit compatible avec le seuil national —, et non en relâchant la norme**. Tout alignement de l'EMT nationale sur l'EMT OIML de $\pm 0,50$ % contredirait la conclusion du présent travail et sacrifierait la protection du consommateur que la métrologie légale a pour mission de garantir. À ces mesures s'ajoutent l'inscription de l'**ATC obligatoire** pour les zones climatiques sévères et la mise à niveau du **scellement logiciel** des calculateurs selon le guide WELMEC 10.6:2019, le scellement mécanique hérité de la réglementation de 1991-1992 ne couvrant plus une chaîne de mesure désormais pilotée par logiciel.

L'ensemble de ces prescriptions se met en œuvre selon un **cycle de surveillance biannuel calé sur la cyclicité thermique** : intervention de pré-saison en avril (remplacement des filtres, vérification OAM, ajustage K), exploitation estivale, puis contrôle post-canicule en octobre avec relevé des températures réelles du carburant.

IV.5.3 — Quantification du préjudice économique

La traduction monétaire des écarts s'appuie sur les **prix officiels ARH 2026** (essence 47 DA/L, gazole 31 DA/L) et distingue rigoureusement deux préjudices de natures et de bases temporelles différentes.

Le **préjudice mécanique résiduel** — imputable aux erreurs intrinsèques des instruments après les correctifs recommandés — s'établit à environ 170 820 DA/an pour l'ensemble de la station. Le **préjudice thermique estival** — imputable à l'absence d'ATC, le carburant dilaté étant facturé à chaud — est de nature **strictement saisonnière** : il se concentre sur la seule saison estivale (≈ 90 jours) et s'élève à environ 518 000 DA par saison pour le seul volume essence, et à environ 774 000 DA par saison pour l'ensemble de la station.

La comparaison honnête met en regard une **saison estivale** de préjudice thermique avec une **année entière** de préjudice mécanique : une seule saison dépasse déjà, d'un facteur voisin de trois, le préjudice mécanique annuel. Aucune annualisation artificielle du biais thermique n'est opérée — le carburant n'est pas dilaté toute l'année. Cette comparaison, quoique conservatrice, suffit à désigner **l'installation de l'ATC comme l'intervention au plus fort rendement économique**, son coût étant sans commune mesure avec le préjudice qu'elle annule.

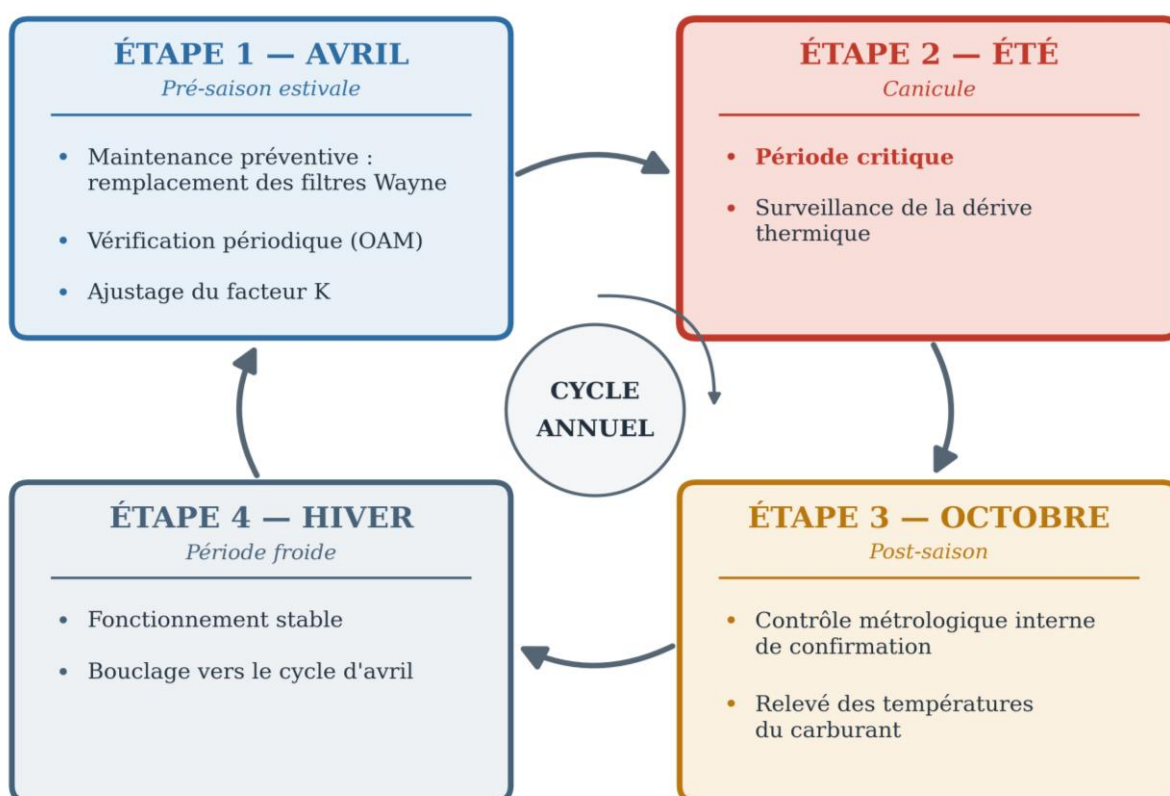


FIGURE IV.7 : *Cycle de surveillance métrologique biannuel (organigramme Avril → Été → Octobre)*

IV.5.4 — Perspectives

Le présent travail ouvre quatre perspectives. *Premièrement*, l'obtention du **certificat d'étalonnage de la jauge de 20 L** — verrou unique conditionnant le résultat central — et le déploiement échelonné d'étalons de laboratoire. *Deuxièmement*, une **campagne aux trois débits** et un **suivi thermique annuel** des températures réelles du carburant en service, qui substitueraient des mesures directes aux données satellitaires. *Troisièmement*, l'**intégration réglementaire** de l'ATC obligatoire et du scellement logiciel WELMEC au corpus national. *Quatrièmement*, à plus long terme, l'**évaluation des débitmètres massiques à effet Coriolis**, qui supprimeraient structurellement le biais thermique en mesurant directement le débit-masse plutôt que le débit-volume.

Conclusion du Chapitre IV

La validation expérimentale a transformé le cadre théorique des chapitres précédents en un diagnostic chiffré. Elle établit que le parc de la station R1025 est conforme au référentiel international mais frappé d'indétermination au regard du référentiel national — un résultat universel, conditionné au certificat de l'étalon —, que cette indétermination procède de l'inadéquation des moyens de vérification et non d'un défaut des instruments, et que le biais thermique non compensé constitue, à lui seul, le poste de préjudice dominant. Le chapitre débouche ainsi sur une feuille de route opérationnelle dont la cohérence sera reprise et élargie par la Conclusion Générale.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire s'était donné pour objet de trancher une question d'apparence simple mais aux implications profondes : les volucompteurs Wayne Global Star V exploités par Naftal à la station R1025 de la wilaya de Bouira respectent-ils *simultanément* l'Erreur Maximale Tolérée nationale de $\pm 0,20 \%$ et l'EMT internationale de $\pm 0,50 \%$, dans les conditions thermodynamiques réelles de leur exploitation ? Pour y répondre, une démarche **biréférentielle** a été adoptée — chaque résultat confronté aux deux référentiels à la fois —, démarche dont la fécondité tient précisément à ce qu'elle révèle des conflits de conformité qu'une lecture monoréférentielle aurait occultés.

La réponse, construite en quatre chapitres solidaires, n'est ni un simple « oui » ni un simple « non » : elle est une **dissociation**.

Le **premier chapitre** a établi le socle thermophysique et énergétique de l'analyse, en quantifiant la sensibilité des carburants liquides aux contraintes thermiques. Il a démontré que la dilatation volumétrique — gouvernée par un coefficient de l'ordre de $1,2 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ pour l'essence — fait de chaque degré au-dessus de la référence de 15 °C une source d'erreur systématique. Le **deuxième chapitre** a caractérisé l'architecture métrologique du Wayne Global Star V comme chaîne de transduction intégrée, du mesureur à pistons rotatifs iMeter HELIX 6000 jusqu'au calculateur iGEM, en passant par le module hydraulique GHM et le transducteur WIP — prérequis indispensable à l'identification rigoureuse des sources de dérive. Le **troisième chapitre** a hiérarchisé ces sources : la dilatation thermique s'y impose comme le facteur hégémonique, avec une dérive non compensée de l'essence atteignant **−3,76 % à 45 °C** (le volume facturé à chaud excédant de 3,76 % le volume ramené à 15 °C effectivement livré en contenu énergétique), soit un facteur d'amplification de 18,8 fois l'EMT nationale et de 7,5 fois l'EMT internationale ; les phénomènes hydrauliques et de dégazage, de second rang, y ont été écartés par délimitation explicite. Ce même chapitre a formalisé, par la méthode GUM, le résultat le plus important du travail. Le **quatrième chapitre**, enfin, a soumis ce cadre à l'épreuve de l'audit *in situ* des dix-huit pistolets, conduit le 19 octobre 2025.

De cette confrontation émerge la **contribution originale centrale** du mémoire, que l'on peut nommer le **choc métrologique de Bouira** : l'incertitude élargie de la chaîne de vérification de terrain, $U(E) = 0,269 \text{ } \%$, est *inférieure* à l'EMT OIML de $\pm 0,50 \text{ } \%$ — la conformité internationale des 18 pistolets est donc certifiable — mais *supérieure* à l'EMT nationale de $\pm 0,20 \text{ } \%$ — rendant indécidable, au niveau de confiance de 95 %, toute déclaration de conformité au droit algérien. Cette indétermination n'est pas localisée sur quelques instruments défaillants : parce qu'elle procède de la chaîne de vérification et non de la dérive propre à chaque pistolet, elle affecte **l'intégralité du parc**, y compris le pistolet le mieux centré. Un même distributeur peut ainsi être simultanément déclaré conforme au standard international et frappé d'indétermination au regard du standard national — non parce qu'il est défectueux, mais parce que le seuil national est plus fin que ce que les moyens de vérification disponibles peuvent résoudre. Il importe de souligner, avec la prudence qui s'impose, que **ce constat demeure subordonné à la confirmation de l'incertitude de l'étalon par le certificat d'étalonnage de la jauge 20 L** : un traitement rectangulaire strict de cet étalon ramènerait l'incertitude sous le seuil national et restituerait la décidabilité.

L'obtention de ce certificat constitue donc le verrou unique du résultat central, et la lacune prioritaire à lever avant toute soumission.

À cette indétermination métrologique se superpose un **biais commercial** de nature distincte. En l'absence de compensation automatique de température (ATC), le carburant dilaté est délivré et facturé à sa température chaude : en scénario estival représentatif (32 °C), ce biais atteint 2,04 % pour l'essence — un ordre de grandeur au-dessus de l'erreur mécanique intrinsèque du parc. Il faut ici être rigoureux sur la nature des choses : ce biais **n'est pas une non-conformité de l'instrument** — l'appareil demeure conforme à son EMT, vérifié à l'équilibre thermique —, mais une **distorsion économique** que le droit algérien en vigueur n'oblige pas à corriger pour cette classe de distributeurs. Sa traduction monétaire, aux prix officiels ARH 2026 (essence 47 DA/L, gazole 31 DA/L), s'élève à un préjudice estival de l'ordre de **518 000 DA par saison** pour le seul volume essence, et d'environ **774 000 DA par saison** pour l'ensemble de la station. Ce préjudice strictement saisonnier dépasse, à lui seul et sur une seule saison, d'un facteur voisin de trois le préjudice résiduel mécanique de l'année entière (170 820 DA/an) — désignant sans ambiguïté l'installation de l'ATC comme l'intervention au plus fort rendement.

Ces résultats convergent vers un **triolet de contributions** à vocation scientifique et réglementaire : *premièrement*, la démonstration quantitative de l'inadéquation entre les moyens de vérification de terrain et l'exigence nationale de $\pm 0,20$ % — appelant, non l'abaissement de la norme, mais l'acquisition d'étalons de classe laboratoire ; *deuxièmement*, la mise en évidence du vide réglementaire de la compensation thermique en zone climatique sévère ; *troisièmement*, l'identification de l'écart entre le scellement mécanique algérien de 1991-1992 et les exigences de protection logicielle du guide WELMEC 10.6:2019, dans une chaîne de mesure désormais pilotée par logiciel.

Sur le plan opérationnel, le travail recommande, par ordre de priorité : le remplacement immédiat des filtres colmatés des pistolets 11 à 18 ; l'ajustage électronique des pistolets en limite ; l'installation prioritaire de correcteurs ATC sur les huit pistolets essence ; et l'extension de la campagne aux trois débits normalisés. Sur le plan réglementaire, la position défendue est sans équivoque : **honorer l'exigence nationale de $\pm 0,20$ % en renforçant les moyens de vérification — étalons de précision supérieure au premier rang —, et non en relâchant la norme**, dont l'abaissement à $\pm 0,50$ % sacrifierait la protection du consommateur que la métrologie légale a précisément pour mission de garantir.

Ce travail connaît ses limites, qu'il assume. La campagne a été conduite au seul débit nominal, laissant non caractérisé le comportement aux régimes extrêmes — singulièrement à débit minimal, où le glissement est le plus pénalisant. La caractérisation climatique repose sur des données satellitaires, à défaut de mesures de température du carburant en service réel sur un cycle annuel complet. Et le résultat métrologique central demeure, on l'a dit, suspendu à la production du certificat d'étalonnage de l'étalon.

Ces limites tracent les **perspectives** : l'obtention du certificat de la jauge et le déploiement échelonné d'étalons de laboratoire ; une campagne aux trois débits et un suivi thermique annuel du carburant ; l'inscription de l'ATC obligatoire et du scellement logiciel WELMEC dans le corpus réglementaire national ; et, à plus long terme, l'évaluation des débitmètres massiques Coriolis, qui supprimeraient structurellement le biais thermique en mesurant directement le débit-masse.

Au terme de cette démarche, une conviction se dégage, qui dépasse le cas particulier de Bouira : la maîtrise métrologique des transactions de carburant n'est pas qu'une affaire d'instruments, mais une articulation entre la physique des fluides, la capacité réelle des chaînes de vérification et l'intransigeance — légitime — du droit national. Le « choc métrologique » n'oppose pas un bon et un mauvais appareil ; il révèle que la fidélité au citoyen, inscrite dans la $\pm 0,20$ % algérienne, exige aujourd'hui des moyens de mesure à la hauteur de l'ambition de la norme. C'est à cette mise à niveau — et non au renoncement — que ce travail invite.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] [A1] S. Amiroudine et J.-L. Battaglia, *Mécanique des fluides*, 2^e éd., Paris : Dunod, 2022.

[2] [B1] J.-C. Guibet, « Carburants liquides », *Techniques de l'Ingénieur*, réf. BE 8 545.

[3] [C9] CEN, *EN 228:2012+A1:2017 — Automotive fuels — Unleaded petrol*, CEN, 2017.

[4] [C10] BSI, *BS EN 590:2013+A1:2017 — Automotive fuels — Diesel*, BSI, 2017.

[5] [A3] Y. A. Çengel et M. A. Boles (trad. M. Lacroix), *Thermodynamique : une approche pragmatique*, 8^e éd., Montréal : Chenelière Éducation, 2014.

[6] [C7] ISO, *ISO 91:2017 — Petroleum measurement tables*, ISO, 2017.

[7] [A2] J. Taine, F. Enguehard et E. Iacona, *Transferts thermiques : Introduction aux transferts d'énergie*, 5^e éd., Paris : Dunod, 2021.

[8] [C8] ISO, *ISO 8222:2020 — Petroleum measurement systems — Calibration*, ISO, 2020.

[9] [B3] B. Wolff et G. Dupuis, « Viscosité », *Techniques de l'Ingénieur*, réf. R 2 350, 1994.

[10] [B4] M. Lallemand, « Étude physique et cinématique », *Techniques de l'Ingénieur*, réf. BE 8 151.

Normes, recommandations et référentiels internationaux

[C1 / CAT-A.3] OIML, R 117-1:2019 (E), *Dynamic measuring systems for liquids other than water — Part 1: Metrological and technical requirements*. Paris : BIML, 2019.

[C2 / CAT-A.4] OIML, R 117-2:2019 (E), *Dynamic measuring systems for liquids other than water — Part 2: Metrological controls and performance tests*. Paris : BIML, 2019.

[C3 / CAT-A.5] OIML, R 117-3:2019 (E), *Dynamic measuring systems for liquids other than water — Part 3: Test report format*. Paris : BIML, 2019.

[C6] OIML, R 120:2010, *Standard capacity measures for testing measuring systems for liquids*. Paris : BIML, 2010.

- [B-11]** OIML, R 43:1977 (F), Fioles étalons graduées en verre pour agents de vérification. Paris : BIML, 1977. [disponibilité à confirmer]
- [C4]** JCGM 200:2012, Vocabulaire International de Métrologie (VIM), concepts fondamentaux et généraux et termes associés. Sèvres : BIPM, 2012.
- [GUM]** JCGM 100:2008 (GUM), Évaluation des données de mesure — Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. Sèvres : BIPM, 2008.
- [C-02]** WELMEC 10.6:2019, Guide for Securing of Fuel Dispensers (Measuring Systems for Liquids other than Water), Issue 2. Secrétariat WELMEC, 2019.
- [C5]** ISO 4006:1991, Measurement of fluid flow in closed conduits — Vocabulary and symbols. Genève : ISO, 1991.
- [C7]** ISO 91:2017, Petroleum and related products — Temperature and pressure volume correction factors (petroleum measurement tables) and standard reference conditions. Genève : ISO, 2017.
- [C8]** ISO 8222:2020, Petroleum measurement systems — Calibration. Genève : ISO, 2020.
- [C11]** ISO 7278-1:1987, Liquid hydrocarbons — Dynamic measurement — Proving systems for volumetric meters — Part 1. Genève : ISO, 1987.
- [C9]** CEN, EN 228:2012+A1:2017, Automotive fuels — Unleaded petrol — Requirements and test methods. Bruxelles : CEN, 2017.
- [C10]** BSI, BS EN 590:2013+A1:2017, Automotive fuels — Diesel — Requirements and test methods. Londres : BSI, 2017.
- [B10]** ASTM / API / IP, Petroleum Measurement Tables, Volume VIII — Tables 53B et 54B (Generalized Products), ASTM D 1250-08. Philadelphia : ASTM International, 2008.
- [A-12]** CEN, BS EN 13617-1:2021, Petrol filling stations — Part 1: Safety requirements for the construction and performance of metering pumps, dispensers and remote pumping units. Bruxelles : CEN, 2021. [disponibilité à confirmer]
- [B11]** Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, Directive 2009/126/CE du 21 octobre 2009 (récupération des vapeurs d'essence — phase II). JO UE, L 285, 2009.

Textes réglementaires et législatifs algériens

- [A-01]** République Algérienne Démocratique et Populaire, Ordonnance n° 76-15 du 20 février 1976 portant adhésion à la Convention instituant l'OIML du 12 octobre 1955. JORADP.
- [A-02]** RADP, Décret n° 86-250 du 30 septembre 1986 portant création de l'Office national de métrologie légale (ONML). JORADP.
- [A-03]** RADP, Décret exécutif n° 91-538 du 25 décembre 1991 relatif au contrôle et aux vérifications de conformité des instruments de mesure. JORADP.
- [A-05]** RADP, Arrêté interministériel du 15 juin 1992 fixant les dispositions applicables aux ensembles de mesurage autres que l'eau. JORA n° 86.
- [A-06]** RADP, Arrêtés du 24 septembre 1996. JORA n° 34 du 27 mai 1997.
- [A-07]** RADP, Loi n° 09-03 du 25 février 2009 relative à la protection du consommateur et à la répression des fraudes. JORA n° 15 du 8 mars 2009.
- [A-08]** RADP, Loi n° 17-09 du 27 mars 2017 relative au système national de métrologie. JORA n° 21 du 2 avril 2017.
- [A-09]** RADP, Décret exécutif n° 24-276 du 13 août 2024 fixant les missions, l'organisation et le fonctionnement de l'Office algérien de métrologie (OAM). JORA n° 57 du 21 août 2024.
- [A-10]** RADP, Loi de finances modifiant l'article 217 de la loi n° 01-21 — Tarifs des redevances et taxes parafiscales perçus par l'OAM. JORA n° 88 du 31 décembre 2025.
- [A-11]** RADP, Arrêté interministériel du 26 mars 2026 fixant l'organisation interne de l'Office algérien de métrologie (OAM). JORA, 2026.

Ouvrages, thèses et articles scientifiques

- [A1]** S.Amiroudine et J.-L. Battaglia, Mécanique des fluides, 2^e éd. Paris : Dunod, 2022.
- [A2]** J. Taine, F. Enguehard et É. Iacona, Transferts thermiques — Introduction aux transferts d'énergie, 5^e éd. Paris : Dunod, 2021.
- [A3]** Y. A. Çengel et M. A. Boles (trad. M. Lacroix), Thermodynamique — une approche pragmatique, 8^e éd. Montréal : Chenelière Éducation, 2014.

- [CAT-A.1]** G. Asch et collaborateurs, Les capteurs en instrumentation industrielle, 7^e éd. Paris :Dunod, 2010.
- [B9 / CAT-A.2]** P. J. LaNasa et E. L. Upp, Fluid Flow Measurement — A Practical Guide to Accurate Flow Measurement, 3^e éd. Oxford : Elsevier (Gulf Professional Publishing), 2014.
- [B1]** J.-C.Guibet, « Carburants liquides », Techniques de l'Ingénieur, réf. BE 8 545.
- [B2]** J.-C.Guibet, « Combustibles liquides », Techniques de l'Ingénieur, réf. BE 8 546.
- [B3]** B. Wolff et G. Dupuis, « Viscosité », Techniques de l'Ingénieur, réf. R 2 350, 1994.
- [B4]** M. Lallemand, « Étude physique et cinématique », Techniques de l'Ingénieur, réf. BE 8 151.
- [B5]** L.Silvert, « Étalonnage et vérification des compteurs de liquides », Techniques de l'Ingénieur, réf. R 2005, 1995.
- [B6]** M. Scotto, « Masse volumique des fluides en conduite fermée », Techniques de l'Ingénieur, réf. R 1 450.
- [B7]** M.Priel, « Incertitudes de mesure et tolérances », Techniques de l'Ingénieur, réf. R 285.
- [B8 / E1]** R. E. Levitin et Y. D. Zemenkov, « Fuel Temperature Fluctuations During Storage », IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., vol. 154, n° 012001, 2016.
- [A4 / F1]** S.Hamdane, Parametric Study of Air-Soil Heat Exchanger Destined for Cooling/Heating the Local in Arid and Semi-Arid Regions, Thèse de Doctorat, Dép. Génie Mécanique, Université Mohamed Khider de Biskra, 2020-2021.

Documentation technique constructeur et institutionnelle

- [D1 / CAT-B.2]** Dresser Wayne AB, WM027790 — Global Star V HH/HHR — Manuel d'utilisation, Rév. 02/8. Dresser Wayne AB, 2014.
- [CAT-B.1]** Dresser Wayne AB, Global Star V — Spare Parts (HHR, HH, LPG, B2B, AdBlue), Rév. 02/10. Dresser Wayne AB, 2012.
- [CAT-B.4]** Dresser Equipment Group, Inc. (Wayne), Module Électronique Intelligent Global (iGEM) — MAINTENANCE Mode, Part No. 921279F Rev C. Dresser Equipment Group, 2003.

- [D2 / CAT-B.3]** AMC / NAFTAL, Formation NAFTAL 2017 — Global Century Carburant, Global Star V, systèmes de pompage immergé (support de formation technique). Bouira : NAFTAL, 2017.
- [D3 / CAT-B.5]** A.Fodil (Abdelkrim) et A. Guerguit (Abdelkader), Ensemble de mesurage routier — Volucompteur, Rapport de formation pour l'obtention du grade d'inspecteur de métrologie, Office algérien de métrologie (OAM) / ONDEFOC, 2024-2025.
- [D4]** ELAFLEX Gummi Ehlers GmbH, Pistoletmanuel ZV 25 / ZVF 25 (HIFLO-MANUAL NOZZLES), Rév. 5. Hambourg : ELAFLEX, 2013.