

Mise en place d'un processus d'étalonnage statique des pluviomètres à augets basculants pour le laboratoire d'étalonnage et les stations météorologiques de l'ONM

Rabah RIABI^{1*}

Résumé

Après l'acquisition d'un Kit réalisé par l'Office National de la Météorologie en 2023, pour étalonnage statique en laboratoire et sur site des pluviomètres à augets basculants de marque MicroStep-Mis, des tests préliminaires de calibration et d'étalonnages sur ces pluviomètres ont été réalisés au laboratoire. Ces essais ont permis d'avoir une certaine connaissance sur ce mode. Cela nous a aidé à développer et mettre en place un processus d'étalonnage pour garantir la précision des mesures de précipitations avec des données fiables et permettant ainsi un suivi et contrôle rigoureux pour le bon fonctionnement de ces instruments à travers les stations météorologiques nationales.

Mots clés : étalonnage, MicroStep-Mis, pluviomètres, calibration

¹ Office National de la Météorologie – (DMCR-ONM), Dar El Beida, Alger,

* Correspondant: Rabah RIABI, r.riabi@meteo.dz

Table des matières

1	Introduction :	1
2	Principe de fonctionnement d'un pluviomètre à augets basculants	2
3	Procédure d'étalonnage statique	3
3.1	Objectif de l'étalonnage statique	3
3.2	Équipements et Matériels utilisés :	4
3.3	Principe et méthode d'Étalonnage statique	4
3.4	Procédure expérimentale par étapes :	5
3.5	Processus d'ajustement : calibration ou réglage mécanique des augets	5
3.6	Fréquence et traçabilité d'étalonnage	6
3.7	Traçabilité métrologique et planification des réétalonnage	6
3.8	Logigramme d'un étalonnage statique du pluviomètre à augets	7
4	Résultats et Traitement par le logiciel CaliLab	7
4.1	Comparaison avec la valeur attendue	7
4.2	Analyse et interprétation des résultats finales . .	8
	Références	10

1. Introduction :

L'étalonnage constitue une étape fondamentale en métrologie. Il permet de déterminer avec exactitude les performances d'un dispositif de mesure ou d'essai, de garantir la conformité à l'usage prévu, et d'assurer la fiabilité des résultats obtenus. Il s'agit d'un levier essentiel pour maîtriser la qualité des opérations de mesure réalisées au sein de l'organisme.

Étalonner un instrument consiste à le comparer à un étalon de référence. Cet étalon doit lui-même être vérifié périodiquement, par exemple une fois par an, à l'aide d'un étalon de précision supérieure, permettant ainsi d'assurer le raccordement métrologique entre les étalons nationaux ou le système international d'unité et les dispositifs de mesure et d'essai utilisés par les organismes. Ce processus se répète à différents niveaux de précision, formant ainsi ce que l'on appelle une chaîne de traçabilité métrologique [1].

Pour réaliser l'étalonnage d'un appareil de mesure conformément à la norme ISO 17025, notamment selon la loi d'Ichikawa (05 M) [1], il convient de le confier à un laboratoire structuré, idéalement accrédité, disposant d'une procédure formelle d'étalonnage. Ce laboratoire doit opérer dans un environnement contrôlé (température, hygrométrie, pression) et garantir des conditions ambiantes stables. Il doit également être doté de moyens adaptés : équipements de mesure (générateurs de pression, d'humidité, chaînes d'étalonnage pour la température, enceintes climatiques, etc.), étalons de travail et

de référence, personnel qualifié et compétent en métrologie, ainsi qu'un système informatique de gestion et de traitement des données.

À l'issue de l'étalonnage, un certificat est délivré. Il présente les résultats obtenus, notamment les écarts constatés entre l'instrument testé et l'étalon utilisé, et indique la conformité de l'appareil vis-à-vis des spécifications techniques ou de l'usage prévu.

L'Office National de la Météorologie (ONM) est doté d'un laboratoire d'étalonnage spécialisé dans la vérification et l'ajustement des capteurs météorologiques relatifs à la pression, la température et l'humidité (PTU). Ce laboratoire est placé sous la responsabilité du service d'étalonnage, relevant de la Direction de la Maintenance et Coordination Réseau (DMCR/ONM).

Dans cette même perspective, la mise en place d'un nouveau paramètre d'étalonnage dédié à la pluviométrie est programmée au sein de ce laboratoire. En effet, la mesure précise des précipitations revêt une importance capitale dans de nombreux domaines : surveillance climatologique, gestion des ressources hydriques, prévention des risques naturels, etc.

On distingue deux grandes catégories de pluviomètres [2] et [3]. La première catégorie sont les pluviomètres non enregistreurs qui contiennent deux modèles : modèles ordinaires gradués et modèles totaliseurs. La deuxième catégorie sont les pluviomètres enregistreurs qui sont divisés en trois types : à auget peseur, à siphon flottant et à auget basculant.

Les pluviomètres à augets basculants sont les plus utilisés pour la mesure des précipitations, en raison de leur simplicité, de leur coût modéré et de leur capacité à enregistrer automatiquement et en continu les épisodes pluviométriques [4] et [5]. Il est utilisé pour mesurer les hauteurs de pluie cumulées et l'intensité de la pluie. Des corrections d'intensité devraient être apportées pour améliorer la précision des mesures d'intensité et compenser leur sous-estimation lors de précipitations très intenses tout comme leur surestimation lors de précipitations de faible intensité [6].

Cependant, la fiabilité des données issues de ces dispositifs dépend étroitement de leur étalonnage. De nombreuses études ont démontré que des erreurs de mesure peuvent être induites par des facteurs mécaniques, l'usure des composants, des conditions d'installation inadaptées ou un entretien insuffisant [4] et [5]. Par ailleurs, en cas de fortes précipitations, ces dispositifs peuvent sous-estimer la quantité d'eau réellement tombée. Il est donc essentiel de procéder à un étalonnage méthodique, régulier et rigoureux, en laboratoire comme sur site, afin de garantir la validité métrologique, la fiabilité et la traçabilité des données recueillies.

Le présent article porte sur une procédure d'étalonnage statique appliquée aux pluviomètres à augets basculants de marque MicroStep, à l'aide d'un kit dédié [7]. L'objectif est double :

- Proposer un protocole expérimental reproductible, conforme aux exigences normatives en météorologie et en métrologie.
- Quantifier les principales erreurs systématiques et aléa-

toires affectant les mesures [8].

Ce travail permet également d'estimer la contribution de chaque composant du système à l'incertitude globale, et d'évaluer le bilan d'incertitude combinée. En standardisant les procédures d'étalonnage, on vise ainsi à minimiser les erreurs et à garantir la fiabilité métrologique des mesures de précipitations.

2. Principe de fonctionnement d'un pluviomètre à augets basculants

Le mode de fonctionnement de pluviomètre à augets basculeurs est basé sur la collecte de l'eau de pluie à l'aide d'un entonnoir, qui la dirige vers un mécanisme de bascule constitué par deux augets ou compartiments en équilibre, instable autour d'un axe de pivotement horizontal, permettant le basculement (Figure 1) [9].

Quand l'un des augets est arrivé à un volume d'eau prédéfini, il bascule sous l'effet de la gravité (le poids), se vide, puis redevient dans sa position initiale tandis que l'autre auget commence à se remplir.

Chaque basculement génère une impulsion électrique transmise à un système d'acquisition. Cette impulsion correspondant à une quantité fixe de précipitation, exprimée en millimètres d'eau (par exemple, 0.2 mm ou 0.5 mm par basculement) [3].

Le volume correspondant à un basculement (également nommé pas de basculement) est défini par le réglage mécanique du mécanisme de bascule et précisé par le constructeur. Mais il peut varier avec le temps par effet d'usure mécanique, d'accumulation de dépôts ou d'influence de conditions environnementales (température, vent, vibrations, etc.). Il est donc essentiel d'effectuer un étalonnage périodique afin de s'assurer que le signal électrique généré est conforme à la quantité réelle de précipitations collectées.

Le pluviomètre à augets basculants est particulièrement approprié pour les stations météorologiques automatiques car il se prête aux méthodes numériques. Un pluviomètre correctement calibré garantit que chaque impulsion provoquée par la fermeture d'un contact peut être surveillée à l'aide d'un enregistreur de données, éliminant ainsi les erreurs dues à des défauts de conception, à des étalonnages incorrects ou à des conditions environnementales particulières et le total peut être calculé sur des périodes de temps déterminées afin de donner la quantité de précipitations bien précise [3] et [10].

Avec ce type de pluviomètre, les sources d'erreur sont quelque peu différentes de celles des autres instruments. Il est donc souhaitable de prendre des précautions particulières et d'apporter des corrections spécifiques. Parmi ces sources d'erreur, on peut citer les suivantes :

- a. La perte d'eau lors du basculement de l'auget pendant une forte pluie peut être réduite, mais non totalement supprimée.
- b. Avec les augets de forme courante, la surface exposée de l'eau est grande par rapport à son volume, ce qui peut en-

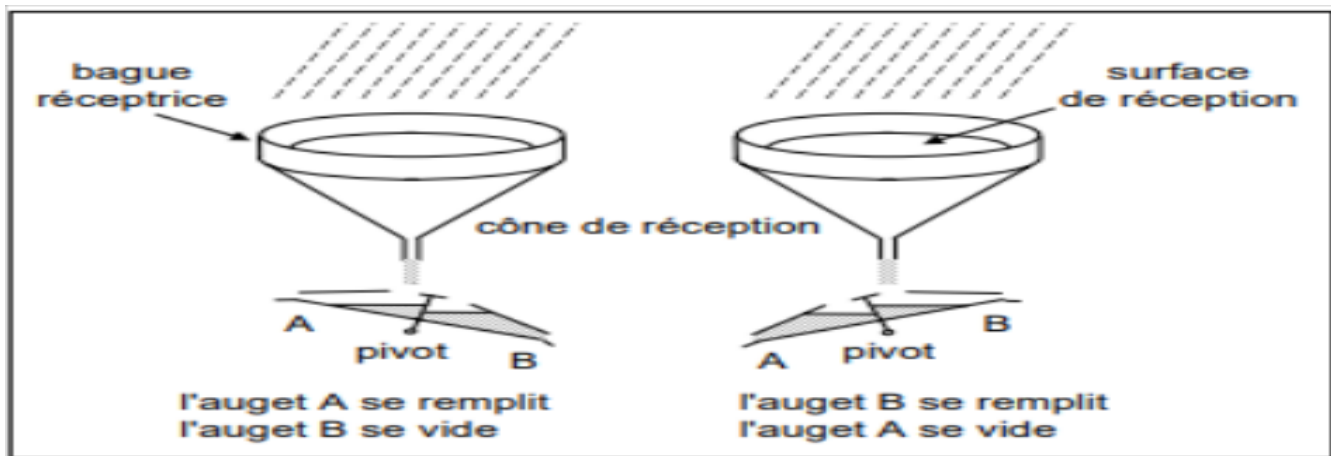


FIGURE 1. Pluviomètre à augets basculeurs : Mécanisme de basculement des augets

traîner des pertes par évaporation importantes, notamment dans les régions chaudes. Ces pertes deviennent significatives lorsque les précipitations sont faibles.

- c. Le caractère discontinu de l'enregistrement peut limiter, en cas de bruine légère ou de très faibles pluies, la quantité d'informations recueillies. Il empêche notamment de déterminer précisément le début et la fin d'une précipitation.
- d. De l'eau peut adhérer aux parois et à l'embouchure de l'auget, y laissant des résidus et ajoutant un poids supplémentaire à compenser pour le basculement. Des essais ont montré qu'un réservoir ciré nécessite environ 4 % de volume en moins pour basculer qu'un réservoir non ciré. L'étalonnage volumétrique peut varier, sans ajustement des vis d'étalonnage, en raison d'un changement de la mouillabilité du réservoir dû à l'oxydation, à la contamination par des impuretés ou à des variations de tension superficielle.
- e. Le filet d'eau tombant de l'entonnoir sur l'auget peut provoquer une lecture excessive, selon la taille, la forme et la position de l'embout.
- f. L'instrument est particulièrement sensible au frottement des coussinets et à un mauvais basculement des augets si le pluviomètre n'est pas parfaitement de niveau.

Un étalonnage rigoureux permet de corriger partiellement les erreurs systématiques. Les mesures des pluviomètres à augets basculants peuvent aussi être corrigées pour les effets d'exposition, comme c'est le cas pour d'autres types de pluviomètres. Un dispositif de chauffage peut être utilisé pour permettre la mesure des précipitations solides en hiver. Cependant, les performances des modèles chauffés se sont révélées médiocres, en raison d'erreurs importantes dues au vent et à l'évaporation de la neige fondue. Il n'est donc pas recommandé d'utiliser ce type de pluviomètre pour mesurer les précipitations hivernales dans les régions où la température descend durablement en dessous de 0°C [6].

3. Procédure d'étalonnage statique

3.1 Objectif de l'étalonnage statique

L'étalonnage statique a pour objectif de vérifier et d'ajuster la sensibilité du mécanisme à augets basculants afin de s'assurer que chaque basculement est en effet exactement correspondant à un volume de précipitation déterminé (par exemple : 0.1 mm, 0.2 mm ou 0.5 mm, selon le modèle ou la configuration de pluviomètre). Ce calibrage est crucial pour assurer l'exactitude des observations météorologiques et hydrologiques, selon les normes de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et les exigences des instituts météorologiques nationaux [6].

Les objectifs spécifiques de l'étalonnage statique sont les suivants :

- Assurer la concordance entre le volume réel versé et le nombre de basculements enregistrés en utilisant un débit lent et constant, contrairement à l'étalonnage dynamique où le débit varie comme lors d'une pluie naturelle. Un écoulement régulier est maintenu pour éviter les effets d'inertie, de débordement ou d'arrosage non uniforme.
- Calculer l'erreur relative ou absolue pour chaque basculement afin de détecter une éventuelle asymétrie entre les deux augets, avec une analyse comparative du volume basculé entre les deux compartiments pour s'assurer de leur équilibre.
- Vérifier la régularité de l'écoulement en simulant une précipitation naturelle de faible intensité afin de reproduire des conditions de mesure réalistes, et assurer la stabilité mécanique du dispositif pour garantir que le support est parfaitement horizontal et stable, afin d'éviter les biais de basculement.

Dans cette procédure, une résolution de 0.2 mm par basculement a été retenue. L'objectif est donc de s'assurer que chaque impulsion enregistrée correspond exactement à 0.2 mm de précipitations, sans écart significatif [6].

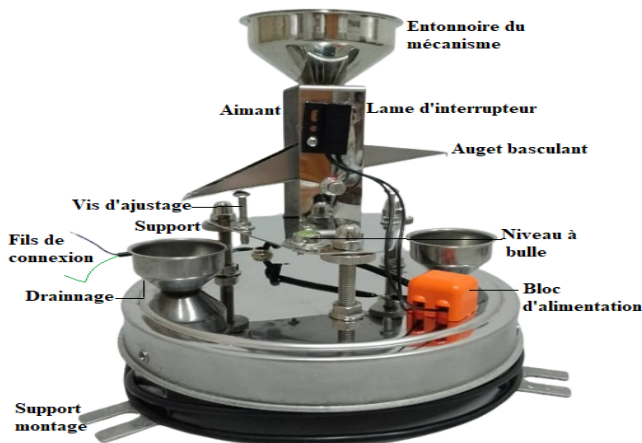


FIGURE 2. Partie mécanique d'un pluviomètre à augets



FIGURE 3. Banc d'étalonnage avec équipement pluviométrique

3.2 Équipements et Matériels utilisés :

Afin de réaliser l'étalonnage statique ainsi que les tests de calibration des pluviomètres à augets, un dispositif adapté a été mis en place afin d'obtenir des résultats fiables, comprenant les équipements et matériels suivants :

- **Pluviomètre à augets basculants** : modèles spécifiés (MicroStep-MIS, Casella, etc.), accompagnés du manuel d'utilisation, certificat d'étalonnage d'usine, fiche technique et documentation associée.
- **Support fixe de nivellement** : permet d'assurer la stabilité et l'horizontalité du pluviomètre durant l'étalonnage.
- **Éprouvette graduée de haute précision** : cylindre étalon de référence, capacité 500 ml, utilisé pour la mesure volumétrique de l'eau versée.
- **Tube de référence avec valve** : équipé de buses interchangeables permettant de générer différents débits pour les essais d'étalonnage.
- **Eau distillée** : utilisée obligatoirement afin d'éviter la formation de dépôts minéraux dans le tube de référence et la valve.
- **Seringue graduée (20 ml) ou micropipette** : pour effectuer des ajustements fins et précis du volume d'eau versé.
- **Niveau à bulle** : pour vérifier et ajuster l'horizontalité du dispositif lors de l'installation.
- **Outils techniques** : tournevis de réglage, pied à coulisse pour mesures mécaniques, multimètre, pinces coupantes et à dénuder, etc.
- **Chronomètre électronique** : utilisé pour contrôler et compter les basculements (RGcal).
- **Ordinateur avec logiciel dédié** : (*CalibLab* de MicroStep-MIS) pour l'enregistrement automatique des données, le calcul des erreurs et la génération du certificat d'étalonnage [7].

3.3 Principe et méthode d'Étalonnage statique

Les étalonnages en mode statique des pluviomètres à augets se font par comparaison à l'étalon de référence en utilisant une éprouvette 500 ml d'eau distillée comme étalon de référence, à remplir par la suite dans le tube de référence. Ce volume d'eau injecté à partir des buses de différents débits sera comparé par rapport au nombre de basculements total des augets en prenant en compte les caractéristiques mentionnées sur la fiche technique du pluviomètre (résolution, surface de captage, etc.).

- Si les basculements correspondent exactement à la théorie : **Étalonnage correct**.
- Si un écart est observé : **Ajustement nécessaire**.

La répétition de l'expérience se fait au moins 5 fois pour obtenir des données statistiques fiables. Le protocole permet ensuite de comparer la valeur mesurée à la valeur de référence nominale, calculer les erreurs relatives et estimer l'incertitude [7] et [8].

Le résultat de mesure est donné par : $R = M - \delta \pm I$ (1)

Avec : M : moyenne des mesures effectuées

δ : erreur de mesure

I : incertitude de mesure

La moyenne est calculée par :

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

Avec : x_i : valeur individuelle mesurée

n : nombre total de mesures

L'écart-type est calculé par :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - M)^2} \quad (3)$$

Le volume par basculement est donné par :

$$V_b = \frac{V}{N} \quad (4)$$

Avec : V : volume total versé (déterminé en millilitres à l'aide d'une éprouvette de référence)

N : nombre de basculements enregistrés

L'incertitude absolue est calculée par :

$$u(V_b) = V_b \cdot \sqrt{\left(\frac{u(V)}{V}\right)^2 + \left(\frac{u(N)}{N}\right)^2} \quad (5)$$

Avec : $u(V)$: incertitude sur le volume versé

$u(N)$: incertitude sur le comptage des basculements (souvent négligeable si le système est électronique)

L'incertitude relative est donnée par : $ur(V_b) = \frac{u(V_b)}{V_b} \quad (6)$

Enfin, l'incertitude élargie (avec $k = 2$) est donnée par :

$$U(V_b) = k \cdot u(V_b) \quad (7)$$

— V : volume d'eau de référence exprimé en ml

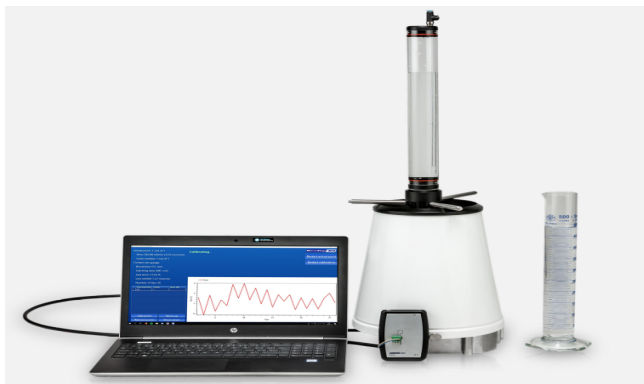


FIGURE 4. Procédure expérimentale et affichage du résultat d'un essai

3.4 Procédure expérimentale par étapes :

Les étapes principales de la procédure expérimentale de l'étalonnage statique sont :

- Le pluviomètre est installé sur un support fixe et parfaitement de niveau à l'aide d'un niveau à bulle. L'environnement de l'essai est contrôlé : température stable, absence de vibrations et de flux d'air.
- Utilisation exclusive d'eau distillée pour éviter les dépôts calcaires ou impuretés pouvant fausser le mécanisme. Le volume d'eau est mesuré à l'aide d'une éprouvette étalon ou d'une micropipette de haute précision. L'eau est versée dans l'entonnoir du pluviomètre via un tube de référence muni d'une valve de régulation. Le débit est maintenu constant et lent afin d'éviter toute influence dynamique (débordement ou sous-comptage), avec pour objectif de simuler une pluie faible et régulière.
- Le système électronique enregistre chaque basculement de l'auget. Le nombre total de basculements est comparé à la valeur théorique attendue. L'erreur relative est calculée à partir de l'écart entre les basculements mesurés et ceux attendus. Une observation du comportement individuel des deux augets est effectuée afin de détecter d'éventuelles asymétries dans le basculement. Si un

déséquilibre est identifié, un ajustement mécanique est réalisé à l'aide des vis de réglage.

- La procédure est répétée pour différents volumes afin d'évaluer la stabilité et la linéarité du dispositif.
- Un certificat d'étalonnage est ensuite établi. Il comprend les conditions d'essai, les résultats, l'incertitude associée, et une conclusion sur la conformité de l'instrument.

3.5 Processus d'ajustement : calibration ou réglage mécanique des augets

Elle consiste à régler les augets afin qu'ils basculent pour la masse d'eau nominale fixée, soit la résolution théorique de l'auget. Dans notre cas, la résolution des augets est de 10 ml ou 0.2 mm de pluie [12].



(a) réglage seringue



(b) réglage vis

FIGURE 5. Réglage ou calibration statique des augets

Les augets se règlent à l'aide de petites vis positionnées sous chacun d'eux. Visser sous l'auget de gauche permet de surélever l'auget droit et ainsi de rapprocher son centre de gravité de l'axe de basculement des augets. Le point de basculement surviendra alors avec un volume d'eau plus important. À l'inverse, dévisser la vis présente sous l'auget de gauche aura pour conséquence de réduire le volume d'eau à injecter pour le basculement de l'auget de droit.

La réalisation de la calibration est effectuée à l'aide d'une seringue de 20 ml (Figure 5). Les augets sont séchés à l'aide de papier absorbant avant chaque nouvel essai afin que les gouttelettes résiduelles provenant du basculement précédent n'impactent pas l'équilibre de l'auget.

- Si l'auget bascule lorsque la totalité du contenu de la seringue se trouve dans ce dernier, alors il est réglé

TABLE 1. Procédure normalisée d'étalonnage des pluviomètres à augets basculants [?]

Étape	Action	Responsable	Fréquence recommandée	Documents à générer	Remarques
1	Étalonnage initial avant mise en service	Technicien de calibration	Après l'achat	Certificat d'étalonnage initial	Conformité aux spécifications fabricant
2	Étalonnage statique en laboratoire	Laboratoire d'étalonnage	Annuel	Fiche d'enregistrement, Certificat d'étalonnage	Conditions contrôlées (débit constant, stabilité)
3	Vérification sur site (station météo)	Opérateur station / technicien régional	Annuel (ou semestriel en conditions extrêmes)	Rapport de vérification terrain	Vérifie installation, inclinaison, propreté
4	Étalonnage dynamique (optionnel selon besoin)	Laboratoire d'étalonnage	Tous les 2–3 ans ou en cas de doute	Procès-verbal d'essai dynamique	Simulation de pluie réelle, tests avec pesée
5	Étalonnage après maintenance ou réparation	Station ou laboratoire	À chaque intervention	Fiche technique d'intervention, Certificat d'étalonnage	À consigner dans l'historique de l'instrument (fiche de vie)
6	Archivage des documents	Responsable qualité / laboratoire	Permanent	Dossier d'étalonnage, base de données	Traçabilité assurée (papier + numérique)
7	Transmission des données	Station régionale vers labo central	Après chaque étalonnage	Fiche + Certificat au format PDF	Voie électronique recommandée

correctement.

- Si l'auget bascule avant que la totalité du contenu de la seringue soit placé dans l'auget, il faut visser la vis présente sol'auget opposé.
- Inversement, si l'auget ne bascule pas après avoir vidé le contenu de la seringue, il faut dévisser la vis sous l'auget situé à l'opposé.
- Tout au long de la manipulation, il est important de veiller à ce que le pluviomètre soit à l'horizontale à l'aide de la bulle de niveau présente à l'intérieur du dispositif, à côté des augets.

Cette manipulation est répétée deux ou trois fois sur les deux augets du pluviomètre afin de contrôler l'effet du réglage effectué à l'avance et de préciser le réglage jusqu'à obtenir un basculement symétrique et correspondant à une lame d'eau de 0.2 mm.

Afin de tester la précision de la seringue lors du prélèvement des 10 ml, une série de mesure de masse est réalisée. À l'aide d'une balance de précision (si disponible), le contenu de la seringue est pesé afin de déterminer quel est le volume d'eau moyen prélevé à chaque réglage. Ainsi il est possible de déterminer une moyenne de volume prélevé, et ainsi quantifier la précision de la seringue de prélèvement. [9]

3.6 Fréquence et traçabilité d'étalonnage

Conformément aux recommandations de l'OMM pour une utilisation en contexte météorologique officiel, la gestion

de l'étalonnage des pluviomètres doit suivre les principes suivants :

- **Étalonnage initial** : Réalisé en laboratoire d'étalonnage avant la mise en service de l'instrument, afin de garantir sa conformité aux spécifications du fabricant et aux exigences météorologiques.
- **Étalonnage périodique au niveau des stations météorologiques** :
 - **Annuel** : Recommandé pour les stations afin de vérifier la stabilité du dispositif et détecter toute dérive éventuelle.
 - **Semestriel** : Requis pour les stations exposées à des environnements sévères (zones poussiéreuses, fortes précipitations, gel, salinité élevée, etc.).
- **Étalonnage après intervention** : Toute opération de maintenance, de nettoyage ou de remplacement de pièces (partie mécanique, entonnoir, augets, capteurs) nécessite une reprise complète de l'étalonnage sur site, afin de garantir la validité des données. [5]

3.7 Traçabilité métrologique et planification des ré-étalonnage

Tous les certificats d'étalonnage et fiches d'enregistrement doivent être archivés systématiquement, selon un protocole de gestion documentaire normalisé.

Ces documents assurent la traçabilité des opérations de vérification, conformément aux exigences qualité (ISO/IEC 17025, OMM Guide No. 8 : précèlement chapitre 6, etc.).

Le réétalonnage statique doit être réalisé tous les 6 à 12 mois, en fonction des conditions d'utilisation spécifiques de chaque station météorologique.

Après transmission des certificats d'étalonnage et des fiches d'enregistrement par les stations régionales au laboratoire central, les données sont analysées. En cas d'incohérences ou d'incertitudes élevées, une procédure d'étalonnage dynamique pourra être engagée pour compléter l'analyse.

3.8 Logigramme d'un étalonnage statique du pluviomètre à augets

Le logigramme ci-dessous présente de manière simplifiée les étapes clés de l'étalonnage statique d'un pluviomètre à augets. Il permet de visualiser le déroulement logique du protocole, depuis la réception du matériel jusqu'à la validation des résultats obtenus.

4. Résultats et Traitement par le logiciel CaliLab

Nous avons étalonné un pluviomètre de type MR3 de MicroStep-Mis, d'une résolution de 0.2 mm avec une surface de captage de 500 cm² [7]. Le volume de référence (étalon) est de 500 ml (constant), volume par basculement théorique de référence est de 10 ml et nombre de basculements de chaque essai 50 basculements.

Nous avons effectué douze essais d'étalonnage dans des conditions presque identiques, avec un débit constant de 13.40 ml/min, soit l'équivalent de 0.27 mm/min, afin de garantir la reproductibilité des résultats.

Les mesures ont été réalisées à l'aide du logiciel CaliLab, dans le cadre d'un étalonnage statique en laboratoire à l'aide d'un kit complet de MicroStep-MIS (dispositifs, processus de mesure et d'essai).

Dans ce qui suit, nous allons représenter les résultats pour les essais N°1 et N°11.

Essai N°1 : La figure 7 montre les résultats d'un étalonnage complet d'un pluviomètre à augets : l'évolution de l'erreur (%) en fonction du nombre de basculements indique une tendance décroissante, passant d'une surestimation à une sous-estimation.

À droite, la correction moyenne à appliquer est de -0.64%. Ce qui signifie que le pluviomètre mesure en moyenne légèrement plus que la valeur réelle. Il nécessite alors un ajustement.

Essai N°11 : La figure 8 illustre l'évolution de l'erreur relative (%) en fonction du nombre de basculements (tips) du pluviomètre. L'analyse montre que l'erreur reste globalement positive, oscillant entre +6 % et +13 % sur l'ensemble des 48 premiers basculements, indiquant une surestimation systématique du volume d'eau mesuré par l'instrument, cet étalonnage révèle un comportement stable.

Les résultats complets des douze (12) essais sont présentés dans le tableau suivant :

TABLE 2. Résultats des essais d'étalonnage du pluviomètre à augets

N° Essai	Volume versé (ml)	Nombre de basculements	Volume/Basculement (ml)	Erreur relative (%)	Incertitude type (u)	Incertitude élargie*1 (U)	Asymétrie augets (%)
1	499,8	49,98	10	-0,64	0,12	0,24	0,23
2	499,5	49,95	10	-0,7	0,12	0,24	-0,09
3	501	50,1	10	-0,4	0,12	0,24	0,59
4	497	49,7	10	-1,2	0,12	0,24	0,52
5	495,5	49,55	10	-1,49	0,11	0,22	-1,63
6	495	49,5	10	-1,59	0,11	0,22	5
7	489	48,9	10	-2,79	0,11	0,22	0,71
8	493,8	49,38	10	-1,83	0,11	0,22	-0,18
9	493	49,3	10	-1,99	0,14	0,28	1,23
10	490,3	49,03	10	-2,53	0,11	0,22	1,11
11	500,3	50,03	10	-0,54	0,12	0,24	0,91
12	500,2	50,02	10	-0,2	0,12	0,24	0,79
Moyenne	496,2	49,62	—	-1,33	0,12	0,24	0,77
Écart type	4,10	0,41	—	0,85	0,01	0,02	1,54

4.1 Comparaison avec la valeur attendue

Le volume de l'éprouvette étalon utilisé pour les essais est de 500 ml ± 5 ml, ce qui signifie que le volume réel d'eau versé peut varier entre 495 ml et 505 ml.

La moyenne des volumes mesurés lors des 12 essais est de 496,2 ml, une valeur qui reste dans la plage de tolérance de l'éprouvette.

Le **volume moyen par basculement** est déterminé par la relation suivante :

$$V_b = \frac{V_{\text{total}}}{N}$$

avec : V_b : volume moyen par basculement (en ml) V_{total} = 496,2 ml : volume total d'eau versé N : nombre total de basculements enregistrés

Ce résultat correspond parfaitement à la valeur théorique attendue, avec un écart-type très faible. Cela démontre une excellente **répétabilité** du mécanisme de basculement dans les conditions contrôlées du laboratoire [1].

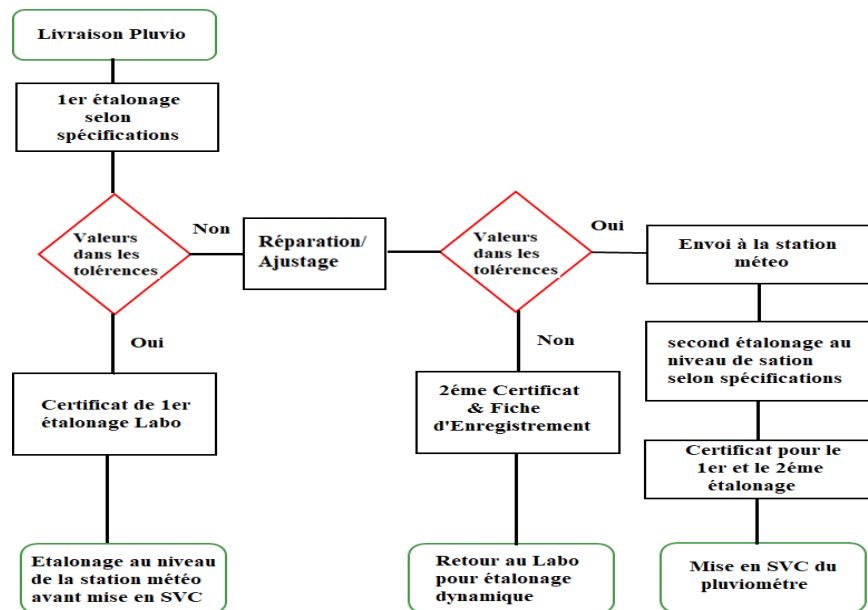


FIGURE 6. Logigramme d'un étalonnage statique

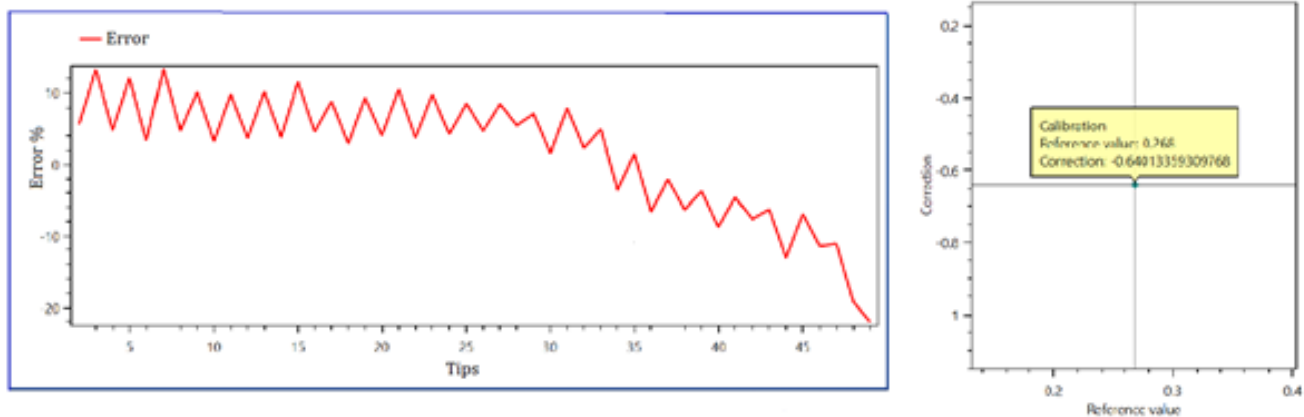


FIGURE 7. Résultat du premier essai d'étalonnage complet d'un pluviomètre à augets, erreur=-0,64 %

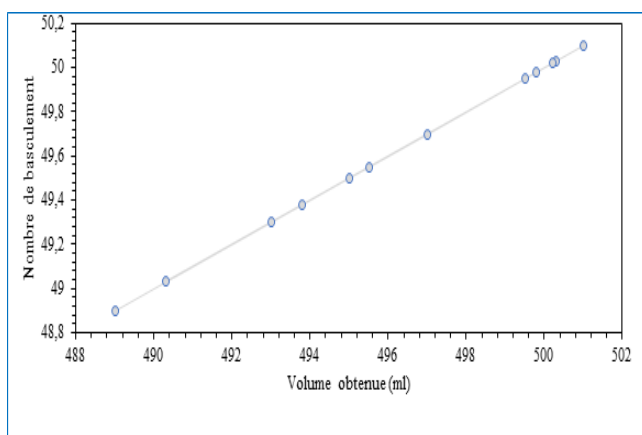


FIGURE 9. Relation entre le nombre de basculement et le volume obtenu.

Le graphique ci-dessous représente la relation entre le nombre de basculements et le volume obtenu. On observe une relation **linéaire positive** : plus le nombre de basculements augmente, plus la quantité d'eau recueillie est importante.

4.2 Analyse et interprétation des résultats finales

Dans le cas d'un écart, une fois la calibration ajustée (réglage) et corrige :

- Observer le nombre de basculements enregistrés pendant le processus (50 basculements).
- Comparer les résultats avec la quantité d'eau ajoutée pour vérifier que chaque basculement représente bien la quantité attendue (dans notre exemple, 10ml ou 0.2mm).
- Analyser les données recueillies pour déterminer la quantité totale de prélèvement et identifier les tendances météorologiques.
- Vérifier que l'erreur maximale tolérée (EMT) est inférieure ou égale à 5%.
- S'assurer que l'incertitude élargie ($U_{\text{élargie}}$) est inférieure à 1%.

Comparer les résultats obtenus avec ceux d'autres stations

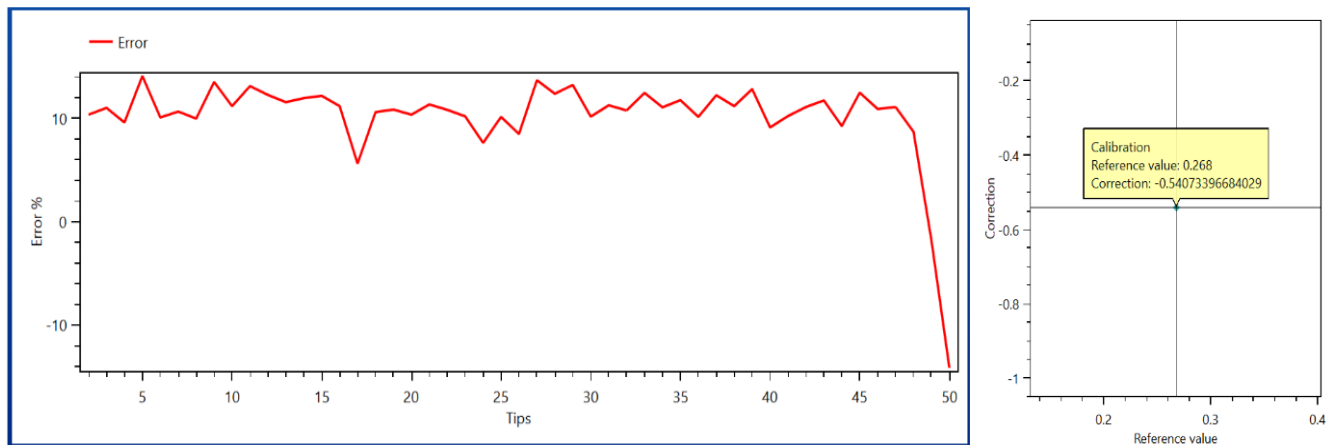


FIGURE 8. Résultat du 11ème essai d'étalonnage complet d'un pluviomètre à auget, erreur=-0,54 %

météorologiques à proximité, pour détecter d'éventuelles incohérences ou dérives.

Effectuer un dernier test de vérification comprenant au moins 10 basculements consécutifs, en conditions contrôlées, avant validation définitive.

Noter les résultats dans la **Fiche d'Enregistrement**.

S'assurer que les fiches d'enregistrement et certificats d'étalonnage sont bien transmis électroniquement au Laboratoire d'Étalonnage, pour archivage et traçabilité.

Les résultats obtenus lors de l'étalonnage statique montrent une bonne cohérence avec la valeur nominale annoncée par le fabricant, soit résolution de 0.2 mm ou 10 ml par basculement. Les écarts observés sont faibles, de l'ordre de $\pm 1.3\%$, et l'incertitude totale estimée à $\pm 0.1\%$ confirment la précision du dispositif dans les conditions expérimentales contrôlées.

Cette performance peut être attribuée aux conditions optimales du laboratoire : température stable, absence de perturbations aérodynamiques (vent), mise à niveau rigoureuse du pluviomètre et débit très lent et constant lors du versement de l'eau. Ces conditions permettent de neutraliser les effets dynamiques ou mécaniques souvent observés en conditions extérieures.

Une observation intéressante concerne la stabilité des basculements : aucune asymétrie marquée n'a été constatée entre les deux augets. Cela suggère que le mécanisme de bascule est encore bien équilibré et que l'usure mécanique est faible. Cela dit, ce point pourrait évoluer avec le temps, et un suivi périodique est recommandé.

En comparaison avec d'autres études ou normes (ex. : normes WMO/OMM), le pluviomètre testé se situe dans les tolérances acceptables. Il serait cependant pertinent de compléter cet étalonnage statique par un étalonnage dynamique, impliquant un écoulement de débits intermittents ou variables, couplé à un système de poids d'eau afin de mieux reproduire les conditions réelles de précipitations. Ce type d'approche mettrait en évidence les éventuels retards de basculement, les pertes d'eau lors du changement d'auget ou les erreurs à haut débit.

Enfin, il est important de souligner que l'étalonnage statique ne prend pas en compte certains facteurs externes qui influencent la mesure réelle en terrain : éblouissements induites par le vent, obstruction partielle de l'entonnoir, vibrations, etc. Pour cette raison, il est fortement recommandé d'associer cette méthode à des vérifications sur site, au minimum une fois par an, en particulier pour les stations automatiques.

Conclusion

L'étalonnage statique réalisé sur un pluviomètre à augets basculants de type MR3 (MicroStep-MIS) a permis de vérifier la précision de l'instrument dans des conditions de laboratoire contrôlées. Les résultats montrent une très bonne concordance entre le volume moyen mesuré par basculement est conforme à la résolution théorique de 0,2 mm, avec une erreur moyenne de 1,3% et une incertitude inférieure à 0,1%.

Cette étude confirme la fiabilité du protocole d'étalonnage statique pour détecter d'éventuelles dérives de calibration et garantir des données pluviométriques de qualité. Elle souligne également l'importance de maintenir des conditions expérimentales rigoureuses (débit lent, horizontalité, stabilité du montage) pour limiter les sources d'erreur.

Toutefois, l'étalonnage statique présente certaines limites, notamment l'incapacité à reproduire fidèlement les conditions de précipitation naturelle. Il serait donc pertinent, dans le cadre de futurs projets, d'explorer des approches complémentaires telles que l'étalonnage dynamique ou les tests en conditions réelles sur le terrain (stations météorologiques), afin d'évaluer le comportement du dispositif face à des événements de pluie plus complexes. **Les recommandations opérationnelles :**

- Étalonnage initial obligatoire avant mise en service de tout pluviomètre.
- Vérification périodique annuelle, selon les recommandations de l'OMM.
- Fréquence renforcée (semestrielle) pour les stations en environnement difficile (poussière, gel, humidité)

extrême).

- Étalonnage après toute intervention technique ou remplacement de pièce.
- Archivage systématique des certificats d'étalonnage et fiches d'enregistrement pour garantir la traçabilité.
- Complémentarité statique/dynamique : exécuter un étalonnage dynamique (avec pesée et débits variables) dès que les conditions d'utilisation sur site le justifient.
- Comparaison croisée avec les données d'autres stations ou systèmes de référence pour détecter toute dérive ou incohérence.
- Transmission électronique des données d'étalonnage vers le laboratoire central pour validation, analyse et intégration dans les bases de données officielles.

[11] Humphrey, M. D., & Istok, J. D. (1996). *A new method for automated dynamic calibration of tipping-bucket rain gauges*.

[12] Shedekar, V. S., & King, K. W. (2009). *Measurement errors in tipping-bucket rain gauges under different rainfall intensities*. Hydrological Processes.

Références

- [1] ISO. *ISO/CEI 17025 : Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais*, 2017.
- [2] SLOVENSKI STANDARD SIST EN 17277. *Hydrométrie : Exigences de mesure et classification des instruments de mesure d'intensité pluviométrique*, 2019.
- [3] Niubol Technologies. *Stainless steel tipping bucket rain gauge*, <https://www.niuboltech.com/rain-gauge-sensor/stainless-steel-Tipping-bucket-Rain-gauge.html>.
- [4] Habib, E., Krajewski, W. F., & Kruger, A. (2001). *Sampling errors of tipping-bucket rain gauge measurements*. Journal of Hydrologic Engineering, 6(2), 159–166. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2001\)6:2\(159\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2001)6:2(159)).
- [5] Segovia-Cardozo, D. A. (2003). *Tipping Bucket Rain Gauges in Hydrological Research : Summary on Measurement Uncertainties, Calibration, and Error Reduction Strategies*.
- [6] Organisation Météorologique Mondiale. *Guide et méthodes d'observation (n°8), Chapitre 6 : Pluviométrie*, Genève, éditions 2014 et 2021.
- [7] MicroStep-MIS. *Documentation technique du kit d'étalonnage pour pluviomètres à augets basculants*, 2023.
- [8] JCGM. *Vocabulaire international de métrologie (VIM) – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés*, 2012.
- [9] Campbell Scientific. *ARG100 Pluviomètre à augets basculeurs, Manuel d'utilisation*, 1998.
- [10] Santana, M., Guimarães, P., & Lanza, L. (2017). *Development of procedures for calibration of meteorological sensors : Case study – calibration of a tipping-bucket rain gauge and data-logger set*. Brazilian Congress on Metrology (Metrologia 2017).