



## **Projet de fin d'études STE 5**

# **Calibration du réseau de pluviographes de l'observatoire HSM « Eau dans la ville »**



Ecole polytechnique universitaire de Montpellier

Département Sciences et Technologies de l'Eau

Année 2020-2021

Raphaël ROBIN

Tuteurs : Pierre MARCHAND & Luc NEPPEL



# Sommaire

1.	Introduction .....	1
2.	Principes de mesure des précipitations .....	2
2.1.	Les pluviographes à augets .....	2
2.2.	Règles sur l'utilisation de pluviographes à augets .....	3
2.2.1.	Mise en place et maintenance .....	3
2.2.2.	Biais, imprécisions et incertitudes .....	3
2.3.	Le réseau de pluviographes de l'observatoire « Eau dans la ville » de HSM .....	5
2.4.	La calibration des pluviographes à augets .....	5
3.	Matériels et méthodes employés .....	6
3.1.	Pluies injectées : La pompe péristaltique et la balance .....	6
3.2.	Pluies mesurées : l'enregistreur .....	7
3.3.	Tests et méthodes appliquées .....	8
3.3.1.	Tests de mise en charge .....	8
3.3.2.	Calibration statique .....	8
3.3.3.	Calibration dynamique .....	9
4.	Résultats .....	11
4.1.	Calibration de la pompe péristaltique .....	11
4.2.	Mesure des pluies et calibration des pluviographes .....	12
4.2.1.	Tests de mise en charge .....	12
4.2.2.	Calibration statique .....	13
4.2.3.	Calibration dynamique .....	13
5.	Discussion .....	19
5.1.	Proposition de correction dynamique .....	19
5.2.	Retour d'expérience et propositions d'améliorations .....	20
6.	Conclusion .....	21

# 1. Introduction

Ces dernières années, l'augmentation des phénomènes météorologiques violents constituent une problématique importante, surtout en zone urbaine et dans les zones rurales exposées aux risques. L'un des risques les plus préoccupant et présent en France est le risque inondation, causé le plus souvent par des épisodes pluvieux intenses. Les évènements passés ont déjà montré que les dommages matériels et humains causés par ces phénomènes naturels pouvaient être conséquents. Face à cela, l'un des moyens les plus efficaces pour limiter le risque est d'étudier précisément les épisodes pluvieux à l'origine des inondations. Ces études permettent une meilleure compréhension des phénomènes pluvieux et la création de modèles hydrologiques et hydrauliques pour caractériser au mieux le risque inondation, le dimensionnement d'ouvrages de rétention d'eau et, de réseaux d'assainissement pluviaux. Cependant, pour être suffisamment précis, les modèles utilisés nécessitent une connaissance fine de la pluviométrie, surtout en milieu urbain. Le réseau de pluviographes (particuliers, Météo-France, EDF...) actuellement présent sur le territoire français est étendu mais reste malgré tout d'une densité faible. La modélisation de phénomènes à petite échelle et de manière précise est donc particulièrement compliquée du fait de l'éloignement des pluviographes et de la forte variabilité spatiale des intensités de pluie.

Face à cette problématique, et dans le cadre du pôle « Eau dans la ville » d'HydroSciences Montpellier, cette unité de recherche (HSM) a installé un réseau d'une dizaine de pluviographes situés sur le secteur du campus de l'Université de Montpellier, du CNRS et de l'ENSAM. Ce réseau dense permet une connaissance fine et précise de la variabilité spatiale et temporelle des pluies à l'échelle du quartier. En effet, les inter-distances entre les pluviographes varient de la dizaine de mètres au kilomètre et le pas de temps d'acquisition est actuellement d'une minute. Les pluviographes utilisés sont des pluviographes à augets permettant un enregistrement précis du nombre de basculement par minute. Le nombre important de pluviographes sur la zone géographique restreinte étudiée ainsi que le pas de temps d'enregistrement fin permettent donc une connaissance précise des épisodes pluvieux et la création de modèles tout aussi précis.

Ces pluviographes à augets sont très répandus du fait de leur faible coût. Cependant la partie mécanique les rendent fragiles et les mesures sous-estiment les précipitations. Afin d'avoir la connaissance la plus fiable possible des intensités de pluie sur le secteur étudié, il est essentiel de veiller au bon équilibrage des augets et réaliser une calibration de chaque pluviographe.

Le projet de fin d'études réalisé en 2019 « Calibration d'un réseau de pluviographe », a permis de tester un premier protocole de calibration des pluviographes de marque Davis acquis par HSM. Ce dernier a permis de mieux comprendre le fonctionnement de ces appareils et de définir les outils nécessaires et adaptés à la calibration. Le but de ce nouveau projet de fin d'études est de construire les courbes de calibration des pluviographes utilisés à partir d'un nouveau protocole expérimental permettant d'injecter une pluie artificielle dont l'intensité est contrôlée par une pompe péristaltique (pluie injectée). La mesure de pluie est réalisée par une balance automatique placée sous le pluviographe à calibrer lui-même équipé d'un enregistreur des basculements de l'auget. Cela permet la mesure des volumes basculés, le comptage des basculements et d'en déduire la pluie mesurée.

Dans un premier temps, l'objectif de ce projet est de déterminer à partir d'un travail de recherche bibliographique, les règles et recommandations pour la calibration des pluviographes à augets. La suite du projet se concentre ensuite sur la mise en place d'un protocole de calibration complet et rapide, et sur la réalisation de différentes expériences permettant de tester et d'améliorer le protocole mis en place. Ainsi, la première partie du rapport traitera de la documentation relative aux pluviographes à augets. La seconde partie présentera les matériels et méthodes employés pour la calibration. Enfin, les résultats obtenus lors des différents tests seront présentés, interprétés et discutés.

## 2. Principes de mesure des précipitations

Il existe deux catégories principales d'appareils de mesure des précipitations : les pluviomètres et les pluviographes. Les pluviomètres collectent l'eau dans des récipients gradués directement en millimètre d'eau. Les pluviographes par l'intermédiaire d'un dispositif adéquat permettent l'enregistrement du volume d'eau collecté en fonction du temps sur un support numérique. Ils permettent de déterminer le cumul de la lame d'eau précipitée au cours du temps, et donc de déterminer l'intensité de la pluie (en mm/h) sur des pas de temps courts de l'ordre de 1 à 6 minutes en général, les pas de temps étant fixes ou variables. Par abus de langage on utilise souvent le terme pluviomètre pour les deux dispositifs. Il existe plusieurs types de pluviographes [1]. Les plus couramment utilisés en hydrologie urbaine en France sont les pluviographes à augets. Ce sont ces derniers qui sont utilisés tout au long du projet et qui font l'objet d'une calibration.

Que ce soit un pluviomètre ou un pluviographe, la mesure est une hauteur d'eau exprimée en mm (l'équivalent d'un volume de 1 L sur une surface de 1m<sup>2</sup>) qui dépend de la résolution de l'auget. Pour les pluviographes à augets la résolution de la mesure est le rapport entre le volume d'eau de l'auget et la surface réceptrice du cône de l'appareil. Les résolutions existantes sur le marché sont : 0,1, 0,2 0,5 ou 1 mm.

### 2.1. Les pluviographes à augets

Le principe de fonctionnement d'un pluviographe à augets est relativement simple (Cf. figure 1). L'eau de pluie est recueillie dans un cône de réception et s'écoule à travers un ajutage calibré vers un auget à bascule. Une fois rempli, la masse d'eau contenue dans l'auget fait déplacer son centre de gravité et le fait basculer. L'eau s'écoule alors à l'extérieur du pluviographe et le deuxième auget commence à se remplir jusqu'au prochain basculement et ainsi de suite. Les basculements sont enregistrés par un dispositif électrique couplés aux augets. Un circuit électrique se ferme à chaque basculement d'auget et envoi une impulsion électrique horodatée et enregistrée sur une centrale d'acquisition de données. La surface de réception de l'eau de pluie et la masse d'eau pour laquelle l'auget bascule varie en fonction des modèles et permet de déterminer la résolution de l'auget, soit la lame d'eau écoulee pour laquelle l'auget doit basculer.

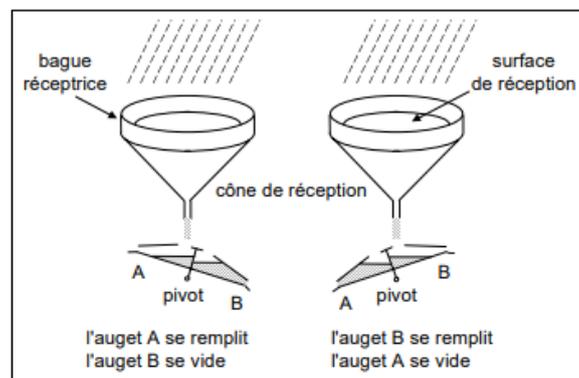


Figure 1 : Schéma de fonctionnement d'un pluviographe à augets

Ce type de pluviographe est simple d'utilisation, et peu coûteux, ce qui explique son utilisation importante dans le domaine de l'hydrologie urbaine [1]. Cependant, ce sont des dispositifs fragiles nécessitant une mise en place, un entretien et une maintenance importante et régulière afin d'obtenir des données fiables. De plus, ce type de pluviographe est soumis à plusieurs incertitudes de mesures qui conduisent généralement à une sous-estimation des intensités de pluie, surtout pour les fortes intensités. Afin de corriger cette erreur, deux types de calibrations sont nécessaires : la calibration dynamique et la calibration statique ou volumétrique. Ces calibrations doivent être effectuées soigneusement et renouvelées périodiquement.

## **2.2. Règles sur l'utilisation de pluviographes à augets**

Comme expliqué dans le paragraphe précédent, l'utilisation de pluviographes à augets nécessite des exigences toutes particulières afin d'obtenir des données fiables. Le guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques [2] coordonne les activités de l'organisation météorologique mondiale (OMM) et définit les règles à respecter concernant la génération de données et d'informations sur le temps, le climat et l'eau dans le respect des normes internationalement reconnues. Le chapitre n°6 du guide de l'OMM est dédié aux mesures des précipitations et décrit les méthodes les plus courantes utilisées pour la mesure des précipitations dans les stations au sol. Il met également l'accent sur le problème de représentativité des mesures avec notamment la prise en compte du vent, de l'exposition et de la topographie.

### **2.2.1. Mise en place et maintenance**

#### ***2.2.1.1. Emplacement et exposition***

Tout d'abord, le guide insiste sur le fait que les effets de l'environnement immédiat du site sur le champ de vent peuvent être à l'origine d'anomalies locales dans la quantité des précipitations captées par le pluviographe. Ainsi, aucun objet ne devrait être installé à une distance du pluviographe inférieure à deux fois sa hauteur au-dessus de l'ouverture de celui-ci [2]. En effet, il est clairement expliqué que des obstacles tels que des murs, toitures, arbres, végétaux peuvent modifier le champ de vent et ainsi engendrer des anomalies positives ou négatives de volumes. D'autres objets vont faire tout simplement écran et empêcher une partie de la pluie d'atteindre le pluviographe.

Dans les zones à végétation dense et homogène, la végétation doit régulièrement être coupée et ramenée au maximum à la hauteur de l'ouverture du pluviomètre [2]. Si besoin est, il est également possible d'employer des palissades judicieusement disposées afin de limiter la prolifération de végétaux pouvant gêner la mesure.

La dernière préconisation du guide concerne les pluviographes fortement exposés au vent. Dans ces cas-là, il est conseillé de mettre en place des écrans et palissades autour du pluviographe de sorte à casser le champ de vent qui est une des sources d'erreur la plus importante [2].

#### ***2.2.1.2. Maintenance des pluviographes***

Le guide de l'OMM préconise une mesure de la section du pluviographe avec une précision d'au moins 0,5% et une constance dans la valeur de cette section pendant le temps d'utilisation du dispositif [2]. Une mesure initiale ainsi qu'un suivi de l'évolution de cette section dans le temps sera donc nécessaire bien qu'en théorie, un changement de section au cours du temps est peu probable, sauf en cas de vandalisme, de chute ou de coups entraînant la déformation de la section du récepteur.

Il est également essentiel de maintenir cette section à l'horizontale. En effet, une inclinaison du dispositif va entraîner une modification des volumes captés et un déséquilibre des augets. Ces derniers ne basculeront pas pour le même volume du fait du déplacement du centre de gravité de l'auget. Les erreurs engendrées par une section qui n'est pas à l'horizontale peuvent donc être très importantes comme l'étude du PFE de 2019 l'a démontré [4]. Une attention particulière devra donc être portée sur ce point.

En ce qui concerne le nettoyage, le guide de l'OMM préconise l'utilisation d'une brosse à long manche et d'eau savonneuse avec un rinçage à l'eau claire [2]. Cette opération devra permettre d'enlever les éventuels dépôts de poussière, sable et débris organiques au sein du récepteur et sur les augets. En effet, des dépôts peuvent se former et gêner l'écoulement de l'eau ou encore modifier le basculement du fait d'un ajout de masse dans un des augets.

### **2.2.2. Biais, imprécisions et incertitudes**

Comme expliqué précédemment, les pluviographes à augets sont sujets à des sources d'erreurs relativement importantes. Des précautions particulières ainsi que des corrections doivent être apportées afin de minimiser au maximum ces erreurs.

En prenant en compte les erreurs existantes sur ce type de pluviographe, la quantité de précipitations échappant à la mesure des pluviographes peut atteindre 30% des précipitations réelles, voire davantage [2].

La première incertitude est causée par le temps de basculement de l'auget. En effet, bien que celui-ci s'effectue en un temps réduit, il reste néanmoins fini. Ainsi, pendant la première partie du basculement, une certaine quantité de pluie peut encore entrer dans l'auget contenant la quantité d'eau qui vient d'être prise en compte dans le premier basculement. L'eau non captée au cours du mouvement correspond ainsi à une erreur mécanique systématique qui va varier en fonction de l'intensité des précipitations et qui sera très importante pour les intensités de pluie supérieures à 100 mm/h [2].

Une autre source d'erreurs importante est le vent. Le guide de l'OMM indique que les erreurs dues au vent ont une influence de 5% sur des intensités de pluies de l'ordre de 20 à 50 mm/h [2]. Les observations et l'expérience accumulée montrent que la déformation du champ de vent au-dessus de la surface du collecteur est responsable d'une erreur allant de 2 à 10% de l'intensité de pluie réelle.

D'autres incertitudes vont induire des imprécisions importantes, surtout pour les faibles intensités de pluie. L'évaporation de l'eau dans le collecteur peut causer des pertes importantes, notamment dans les régions chaudes et venteuses. L'OMM a estimé ces pertes à 4% maximum.

Pour les faibles intensités, le mouillage constitue également une source d'erreurs importante. Le mouillage correspond à l'adhérence des gouttes de pluies à la paroi du collecteur et aux augets. Une solution existante consiste à cirer les parois en contact avec l'eau afin de favoriser l'écoulement. Des essais ont permis de démontrer que le volume nécessaire pour rompre l'équilibre était réduit de 4% avec l'utilisation de compartiments cirés.

Bien que moins importante, une autre erreur va pouvoir provenir de la masse volumique de l'eau. En fonction de la température, la masse volumique de l'eau va être modifiée et va ainsi faire basculer les augets pour des volumes différents. La présence de sable ou de poussières dans les eaux de pluie peuvent également modifier la masse volumique des précipitations et entraîner des problèmes similaires. Dans la région de Montpellier et globalement sur le littoral méditerranéen, il n'est d'ailleurs pas rare d'observer des pluies chargées de sable fin.

Enfin, les erreurs mécaniques et relatives à la conception et au fonctionnement direct du pluviographe à augets vont également entraîner des imprécisions. Premièrement, la mise en charge du collecteur par une pluie d'intensité excessivement forte peut survenir. La charge va ainsi conditionner le débit d'écoulement de l'eau dans les augets. Ceci n'entraîne aucune erreur en termes de volume écoulé mais va poser des problèmes pour des échantillonnages fins en minimisant les intensités de pluie instantanées.

D'autres erreurs mécaniques (équilibrage des augets, frottements...), d'échantillonnage systématiques, ainsi que les erreurs liées à des effets dynamiques (retard dû au temps de réponse de l'instrument), souvent appelées erreurs de quantification sont en général de l'ordre de 5 à 15% voire davantage lors d'évènements de fortes intensités. Une calibration statique et dynamique va permettre une correction efficace des éléments systématiques de ces erreurs [2].

Afin de limiter au maximum les imprécisions il est conseillé d'éviter les pas de temps inférieurs à la minute pour l'acquisition des données [2].

D'autres sources d'erreurs existent mais elles ne seront pas toutes détaillées. Le tableau 1 recense les erreurs possiblement rencontrées lors de l'utilisation d'un pluviographe à augets [3].

Tableau 1 : Synthèse des différentes sources d'erreurs sur un pluviographe à augets

Erreurs	Dues au positionnement	Dues au fonctionnement mécanique et électronique	Systématiques	Aléatoires
Exemples	Mouillage, rebond, évaporation, vent	Temps de basculement, nombre de basculements limité dans un temps court, double basculement	Conception de l'appareil, limites de l'appareil	Fuites, pertes, dommages sur l'appareil, erreurs humaines et interférences d'animaux, caractéristiques de la pluie (pluie, neige mêlée, ...)

### 2.3. Le réseau de pluviographes de l'observatoire « Eau dans la ville » de HSM

Le réseau de pluviographes installé sur le Nord de Montpellier est composé de 12 pluviographes à augets du modèle DAVIS Rain Collector 6465M (Cf. Figure 2). Le collecteur, l'enveloppe protectrice ainsi que les augets sont en plastique dur. Les augets sont également recouverts d'une fine couche d'aluminium afin d'éviter la corrosion de ces derniers. Sous les extrémités des augets se trouvent des vis de réglage permettant de déplacer le centre de gravité des augets, et ainsi de modifier le point de basculement. Sous l'axe de symétrie des deux augets se trouve le système d'enregistrement des basculements ainsi que les fils électriques permettant le transfert de l'impulsion électrique vers un enregistreur [3]. L'essentiel des caractéristiques du modèle de pluviographe utilisé est disponible en annexe 1.



Figure 2 : Photo du dispositif à augets

La section des pluviographes est donnée par le constructeur à 214 cm<sup>2</sup>. Les mesures déjà réalisées sur ce type de pluviographes indiquent un diamètre de 16,55 cm, soit une section légèrement plus grande et un écart sur la mesure constructeur de 0,5% [4].

Les augets sont dimensionnés pour basculer pour une lame d'eau égale à 0,2mm. Sachant que la surface du collecteur est de 214 cm<sup>2</sup>, la résolution de l'auget est égale à 4,28 ml. ( $V = 0.2 * S = 0.2 * 214 \times 10^{-4} * 10^3 = 4,28 \text{ ml}$ ). Normalement les augets sont conçus et calibrés pour basculer précisément au volume de résolution. Cependant, un ajustement et une calibration statique est nécessaire afin de s'assurer que les augets basculent bien pour ce volume. L'acquisition des données de basculement est actuellement réalisée avec un pas de temps de 1min.

Les pluviographes à calibrer sont numérotés de 1 à 12. Les pluviographes n°1 à n°4 sont étalonnés à partir d'un protocole de calibration utilisant une pompe péristaltique et un variateur automatique du débit afin de simuler une pluie de 2h dont l'intensité varie entre 10 et 600 mm/h. Les pluviographes n°5 à n°12 sont étalonnés à partir d'une variante du protocole utilisé sur les pluviographes n°1 à n°4. Ces protocoles seront détaillés dans la suite du rapport.

### 2.4. La calibration des pluviographes à augets

La calibration des pluviographes à augets se déroule en deux grandes étapes : la calibration statique et la calibration dynamique. La calibration statique consiste à régler les augets pour qu'ils basculent pour un volume correspondant à la résolution donnée par le constructeur soit dans notre cas 0,2 mm (ce qui correspond à un volume

d'auget de 4,28 ml. Cette calibration est relativement simple mais reste néanmoins essentielle et nécessite une certaine précision.

La seconde étape est la calibration dynamique. Cette étape, qui est un peu plus lourde que la première, permet d'évaluer l'incertitude de mesure des intensités de pluie causées par le dispositif et le caractère dynamique de l'écoulement. Plus précisément, cette étape consiste à déterminer la différence entre la pluie réelle et la pluie mesurée par le pluviographe. L'annexe.6.D du guide de l'OMM [2] décrit en détail la procédure normalisée utilisée pour la calibration en laboratoire des pluviomètres enregistreurs d'intensités de type récepteur. Les points importants de cette procédure normalisée sont résumés dans l'annexe 2 du présent rapport.

Les éléments cités dans la norme permettent la construction d'un protocole de calibration selon les règles normalisées de l'OMM. La procédure développée à HSM pour la calibration des 4 premiers pluviographes s'est appuyée sur cette norme, mais a tout de même modifié certains points afin de l'adapter au matériel et au temps disponible. Cette procédure consiste à injecter des intensités de pluie croissantes dans le pluviographe pendant une durée définie (Cycle de mesures de 2h) et d'enregistrer les basculements ainsi que la masse d'eau écoulée. Dans ce premier protocole, aucun enregistreur de basculement était utilisé. Les basculements étaient déduits par l'intermédiaire des enregistrements réalisés par la balance mesurant la masse d'eau tombant du pluviographe. Ainsi, l'objectif de ce projet a été dans un premier temps de poursuivre la procédure mise en place par HSM pour la calibration des pluviographes n°5 à n°12 afin de pouvoir mettre en commun les résultats, les comparer et proposer un étalonnage commun à tous les pluviographes. Pour cela, la démarche a été reprise en utilisant tout de même un enregistreur de basculements et en modifiant les débits d'injection manuellement au cours des mesures. Dans un second temps, l'objectif était de proposer un second protocole respectant au maximum les préconisations de l'OMM et permettant de calibrer les pluviographes de façon simple et rapide afin de faciliter les futures calibrations.

Dans la partie suivante seront détaillés le matériel et les méthodes employés pour la calibration menée au laboratoire. Dans un premier temps sera présenté le dispositif de simulation de la pluie. Ensuite seront présentés les étapes de calibration statique, les tests de mise en charge et la calibration dynamique.

## **3. Matériels et méthodes employés**

### **3.1. Pluies injectées : La pompe péristaltique et la balance**

#### ***3.1.1.1. La pompe péristaltique***

Afin de réaliser la calibration dynamique, mais également les tests de mise en charge des pluviographes, il a fallu mettre en place un dispositif permettant de créer des pluies artificielles dont les intensités sont choisies. En effet, comme expliqué précédemment la calibration dynamique consiste à injecter dans le pluviographe des pluies artificielles d'intensités connues afin de comparer ces intensités injectées et les intensités mesurées par le pluviographe. La courbe de calibration (intensité mesurée=f(intensité injectée) obtenue permet de corriger les pluies mesurées par les pluviographes. Il est donc indispensable de connaître les intensités injectées, non seulement pour le caractère reproductible de l'expérience, mais également pour construire une courbe de calibration couvrant la plage d'intensité voulue.

Concernant la réalisation des tests de mise en charge des pluviographes, il est aussi indispensable de connaître l'intensité de pluie injectée avec précision afin de déterminer précisément le point à partir duquel les pluviographes se mettent en charge.

Pour créer les pluies artificielles à injecter, le laboratoire de HSM dispose d'une pompe péristaltique du modèle SHENCHEN LabV6 (Cf. Figure 3). Cette pompe de précision permet de fournir un débit constant en réglant le nombre de tours par minute effectués par le moteur. Elle fonctionne à basse pression et possède une plage de vitesse de rotation allant de 0,1 à 600 tr/min ce qui correspond théoriquement à une plage de débit allant de 0,000166 à 2280 ml/min.

La modification de la vitesse de rotation de la pompe et du sens de rotation se fait par l'intermédiaire de l'interface tactile présente sur la face avant de la pompe. Afin de relier cette vitesse de rotation du moteur à un débit, puis à une intensité produite, une courbe d'étalonnage a été construite. Pour cela, différentes vitesses de rotation comprises entre 0,1 et 350 tr/min ont été testées. Chaque mesure dure 5 minutes et le débit est calculé en mesurant la masse d'eau écoulée au cours de ces 5 minutes. La masse ainsi que le temps d'expérience est à chaque fois mesuré à partir du logiciel d'acquisition des données de la balance permettant les mesures de masse. C'est d'ailleurs cette même balance qui sera utilisée par la suite lors de l'étalonnage dynamique de l'intégralité des pluviographes. C'est une balance du modèle Mettler Toledo XS32001L permettant une acquisition des mesures avec un pas de temps de 1 seconde et précise à plus ou moins 0,1g. Les mesures sont réalisées les unes après les autres en respectant un temps d'attente de 10 secondes après chaque changement de vitesse de rotation afin de permettre au régime permanent de s'établir.

Une fois les mesures réalisées, les valeurs de débits et d'intensités calculées sont exprimées en fonction de la vitesse de rotation de la pompe. Une courbe de tendance est ensuite appliquée en choisissant le meilleur ajustement possible. De cette courbe de tendance est extraite une équation permettant ainsi de relier une vitesse de rotation de la pompe à un débit ou une intensité de pluie. Une fois la pompe calibrée, il est ensuite possible de débiter le réglage et la calibration des pluviographes.



Figure 3 : Pompe péristaltique Shenchen LabV6

### 3.1.1.2. La balance

Comme expliqué brièvement ci-dessus, au cours des différentes expériences du projet, des masses d'eau sont mesurées. Ces mesures permettent notamment le calcul de l'intensité de pluie injectée dans les pluviographes lors de la calibration dynamique et lors de la calibration de la pompe péristaltique. Le matériel permettant ces mesures est une balance professionnelle Mettler Toledo XS32001L (Cf. figure 4). La précision de cette balance est de 0,1g et sa capacité maximale est de 32 kg. L'enregistrement des mesures se fait avec un pas de temps de 1 seconde. La fiche technique de cet appareil de mesure est disponible en annexe 3.



Figure 4 : Balance de précision Mettler Toledo XS32001L

## 3.2. Pluies mesurées : l'enregistreur



Figure 5 : Enregistreur de basculements

La mesure de la pluie par le pluviographe est réalisée en horodatant les basculements d'augets. Pour ce faire est utilisé un modem-logger ERCOGENER GenPro 325° (Cf. Figure 5) sur lequel une entrée logique est connectée aux contacts électriques des augets. Lorsqu'un auget bascule une impulsion électrique est créée grâce à un dispositif magnétique sous les augets. Cette impulsion est alors détectée par le logger qui enregistre uniquement la date (à la seconde près) de ce basculement. La fiche technique de l'enregistreur est disponible en annexe 4.

### 3.3. Tests et méthodes appliquées

#### 3.3.1. Tests de mise en charge

Avant toute calibration, il faut déterminer l'intensité de pluie pour laquelle les pluviographes se mettent en charge. La mise en charge des pluviographes va entraîner des problèmes d'incertitude importants. En effet, le débit s'écoulant dans les augets va être conditionné par le diamètre de l'orifice de vidange et par la hauteur d'eau à l'intérieur du pluviographe. Ainsi les intensités supérieures à l'intensité de mise en charge de l'appareil seraient sous estimées.

Le test de mise en charge est simple. Il consiste à introduire dans le collecteur du pluviographe un débit connu et constant et à observer la mise en charge ou non du collecteur. Le matériel d'injection utilisé pour cette expérience est la pompe péristaltique décrite dans la partie précédente. Le tuyau acheminant l'eau dans le pluviographe est placé verticalement, à environ 1 centimètre au-dessus de l'orifice de vidange du collecteur. La mise en charge ou non de l'appareil est alors déterminée visuellement.

Pour la réalisation du test, il faut veiller tout d'abord à placer le pluviographe à l'horizontale. Effectuer une première expérience rapide en injectant une série de débits. Ces débits doivent appartenir à une large plage, afin de déterminer grossièrement le débit de mise en charge. Pour cette première série, des débits situés entre 100 et 1500 mm/h ont été testés rapidement. Lorsque le collecteur semble se mettre en charge, noter l'intensité de pluie correspondante.

Ensuite, il s'agit d'affiner cette mesure. Pour cela, une intensité de départ est choisie. Cette intensité est légèrement inférieure à l'intensité de mise en charge observée lors de la première expérience rapide. Ainsi, une intensité de pluie de 800 mm/h est d'abord testée. Si le collecteur ne se met pas en charge, l'intensité de pluie est augmentée légèrement et ainsi de suite jusqu'à observer une mise en charge du collecteur. L'intensité correspondante est alors l'intensité de mise en charge du pluviographe.

Seul 10 des 12 pluviographes du réseau ont pu être testés car les pluviographes n°1 et n°2 étaient installés sur le terrain au moment de la réalisation des tests en laboratoire.

#### 3.3.2. Calibration statique

Vient ensuite l'étape de la calibration statique. 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 cette étude, la résolution des augets est de, 4,28 ml ou 0,2 mm de pluie.

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. A 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 droite.



Figure 6 : Photographies d'étalonnage statique

La réalisation de la calibration est effectuée à l'aide d'une seringue de 10 ml (Cf. Figure 6). 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. Un volume de 4,28 ml d'eau est prélevé dans un Becher et introduit dans le premier auget. Si l'auget bascule lorsque la totalité du contenu de la seringue se trouve dans ce dernier, alors il est réglé 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 sous l'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 pluviographe 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 effectuée plusieurs fois sur les deux augets du pluviographe afin de vérifier l'impact du réglage effectué précédemment et pour affiner le réglage jusqu'à obtenir un basculement symétrique et correspondant à une lame d'eau de 0,2 mm.

#### Précision de la seringue :

Afin de tester la précision de la seringue lors du prélèvement des 4,28 mL, une série de mesure de masse est réalisée. A l'aide d'une balance de précision, 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.

### **3.3.3. Calibration dynamique**

#### **3.3.3.1. Objectifs**

Une fois la calibration statique réalisée, la calibration dynamique permet d'obtenir une relation entre l'intensité de pluie injectée et l'intensité de pluie mesurée par le pluviographe. En théorie cette relation devrait être de la forme  $x = y$ , cependant les pluviographes à augets sont connus pour sous-estimer fortement les pluies de forte intensité et légèrement surestimer les pluies de faible intensité.

La phase de calibration dynamique constitue la majeure partie du travail réalisé au cours de ce projet. Plusieurs expériences ont été menées dans le but d'étudier des protocoles différents et de comparer les résultats obtenus pour chacune des expériences, puis de les interpréter. Les objectifs au cours de cette étape de calibration dynamique étaient multiples et visaient à comparer différentes méthodes de calibration dynamique et de proposer une calibration unique pour tous les pluviographes du réseau. Voici les objectifs principaux de cette phase de l'étude :

- Réaliser la calibration dynamique des 12 pluviographes selon la procédure de HSM dite en cycle long de 2 heures (Cf. Annexe 5), en créant un protocole permettant de pouvoir réaliser les manipulations dans le temps imparti et sans l'utilisation d'un variateur de débit automatique. Le but ici est de calibrer les 12 pluviographes et de créer une calibration commune pour tous les pluviographes.
- Déterminer l'impact de la calibration statique sur la calibration dynamique, et l'évolution d'une calibration dynamique dans le temps.
- Comparer les résultats d'une calibration utilisant un enregistreur de basculements avec une calibration utilisant seulement la balance pour la détection des basculements.
- Réaliser une calibration en respectant les préconisations de l'OMM : 5 essais dont les deux valeurs extrêmes des erreurs relatives sont écartées et les trois autres sont moyennées. Puis, comparer ce résultat avec ceux de la calibration réalisée selon la procédure de HSM.
- Etudier et réaliser une calibration suivant un protocole permettant une calibration rapide (cycle court) des pluviographes, puis comparer les résultats.

Tous les objectifs ont été atteints au cours du projet, mais tous ne seront pas présentés dans ce rapport.

#### **3.3.3.2. Protocole expérimental :**

Une partie des objectifs cités ci-dessus ont été traités en distanciel, avec les données provenant d'un protocole de calibration dynamique automatisé utilisé sur les pluviographes n°1 à 4. Cependant, la calibration dynamique des 12 pluviographes en cycle long et la calibration dynamique suivant un nouveau protocole à 5 essais consécutifs ont nécessité la mise en place d'un banc d'essai et la réalisation de mesures en présentiel au laboratoire de HSM.

Le protocole expérimental utilisé pour la réalisation de ces tests de calibration est dans les deux cas quasiment identiques. Les seules modifications vont provenir du temps d'expérience pour chacune des intensités testées, et du nombre de répétition d'expérience pour chaque intensité. Le fonctionnement du banc d'essai et la procédure seront donc identiques (Cf. Annexe 6), mais le traitement des données sous Excel différera en fonction des objectifs cités dans la partie précédente (Cf. Annexe 7).

Le dispositif utilisé pour la réalisation du protocole de calibration est représenté dans la figure 7.

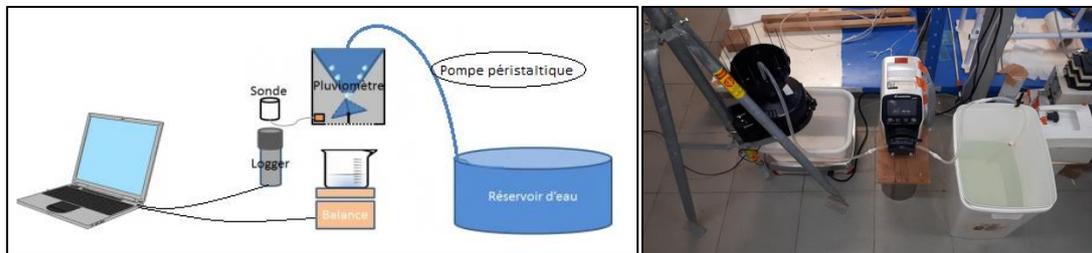


Figure 7 : Dispositif de calibration dynamique mis en place

Le protocole initial consiste à injecter 11 intensités de pluie différentes comprises entre 10 et 800 mm/h dans le pluviographe avec des temps d'injection différents en fonction des intensités testées (Cf tableau 2).

Tableau 2 : Intensité injectée, vitesse de pompe et temps

Intensité injectée (mm/h)	Temps d'expérience minimum (min)	Vitesse de pompe (rpm)
10	20	1,1
25	20	2,7
50	15	5,4
100	15	10,7
150	10	15,7
200	10	21,0
300	10	31,4
400	10	41,9
500	5	52,4
600	5	62,9
800	5	83,8

Les durées d'expérience pour les intensités faibles seront plus importantes que pour les intensités élevées afin d'obtenir un nombre de basculement satisfaisant pour chacune des intensités.

Les étapes du protocole de calibration dynamique utilisées pour la calibration des 12 pluviographes selon la procédure initiée par HSM sont les suivantes :

1. Allumer la pompe et la console d'enregistrement reliée à la balance et ouvrir le logiciel permettant la lecture des mesures réalisées par la balance ;
2. Fixer le pluviographe à calibrer sur le trépied et le connecter à l'enregistreur de basculements ;
3. Synchroniser l'heure de l'enregistreur de basculement avec l'heure de la console d'enregistrement de la balance ;
4. Remplir le réservoir d'eau et poser le récipient de récupération sur la balance ;
5. Fixer les tuyaux d'alimentation et d'injection de la pompe dans le réservoir et dans le collecteur du pluviographe respectivement ;
6. Régler la pompe sur la vitesse de rotation correspondant à l'intensité de pluie testée.
7. Laisser le régime permanent s'établir et démarrer un chronomètre après le premier basculement.
8. Attendre le temps indiqué pour l'intensité testée. Lorsque ce temps est atteint, attendre le basculement suivant puis reprendre à l'étape 6 du protocole jusqu'à ce que le cycle entier ait été effectué.
9. Récupérer les données de basculement à partir de l'enregistreur ainsi que les données de masse enregistrées par la balance.

Un second protocole expérimental a par la suite été utilisé pour réaliser une calibration sur un des pluviographes du réseau selon la procédure de l'OMM qui préconise de répéter 5 fois les mesures pour chaque intensité afin d'écartier les 2 valeurs d'erreurs relatives extrêmes et de calculer une moyenne des intensités avec les 3 valeurs restantes. Pour ce nouveau protocole, les modifications concernent seulement les temps d'expériences qui ont été raccourcis afin de pouvoir disposer du temps nécessaire pour répéter 5 fois d'affilée le protocole initial, le tout en gardant un nombre de basculement suffisamment important pour obtenir des résultats fiables.

### **3.3.3.3. Traitement des données**

Le traitement des données va consister à représenter les intensités mesurées en fonction des intensités injectées. Sur le graphique est ajouté la droite  $x = y$  représentant la parfaite correspondance des intensités mesurées en fonction des intensités injectées. Une courbe de tendance est ensuite ajoutée. La courbe de tendance choisie sera la courbe du meilleur ajustement. Les études menées dans le cadre du PFE de l'an dernier ont montré que l'ajustement le plus adapté était l'ajustement polynomial de second degré, avec forçage du passage par l'origine du repère [3]. Afin de confirmer ceci, une étude de la somme des carrés des écarts à la courbe est réalisée pour 3 types d'ajustement : l'ajustement linéaire, polynomiale de second degré 2 et puissance. La somme des carrés des écarts à la moyenne est calculée pour chaque ajustement et une analyse graphique du résultat est systématiquement effectuée lors du choix de l'ajustement.

Une représentation de l'erreur relative en fonction de l'intensité injectée ainsi qu'une représentation du volume d'eau moyen basculé par basculement en fonction de l'intensité injectée sont également créées. D'autres données d'interprétation sont également calculées comme la lame d'eau moyenne par basculement en fonction de l'intensité injectée, ou encore le temps moyen entre chaque basculement en fonction de l'intensité injectée.

#### Incertitudes :

En utilisant la balance synchronisée avec l'enregistreur de basculement, l'erreur expérimentale sur le temps est estimée à 1 seconde maximum. Concernant l'erreur expérimentale sur la mesure du volume par la balance, elle est estimée à 0,1 ml. Les erreurs relatives sur les mesures ont été calculées à partir de ces erreurs expérimentales et sont systématiquement inférieures au pourcent quelque soient les intensités testées, comme préconisé dans le guide de l'OMM [2]. Les calculs ne sont donc pas détaillés dans le présent rapport.

## **4. Résultats**

### **4.1. Calibration de la pompe péristaltique**

Les résultats détaillés de la calibration de la pompe péristaltique sont placés en annexe 8. Ces résultats ont permis la construction de deux types de courbe de calibration. Une première a d'abord été créée en utilisant tous les points de mesure. Cependant, en observant le nuage de points on constate que pour certaines plages d'intensités, la pente varie légèrement. Afin d'obtenir une plus grande précision dans la détermination des débits et des intensités à partir de la vitesse de rotation de la pompe, il a été décidé de séparer les points de mesure de la courbe en 3 plages d'intensités (faibles, moyennes, fortes) et de proposer un ajustement linéaire pour chacune d'elles (Cf. Figure 8). Ainsi sont obtenues des équations de droite légèrement différentes qui limiteront les incertitudes liées à l'intensité injectée.

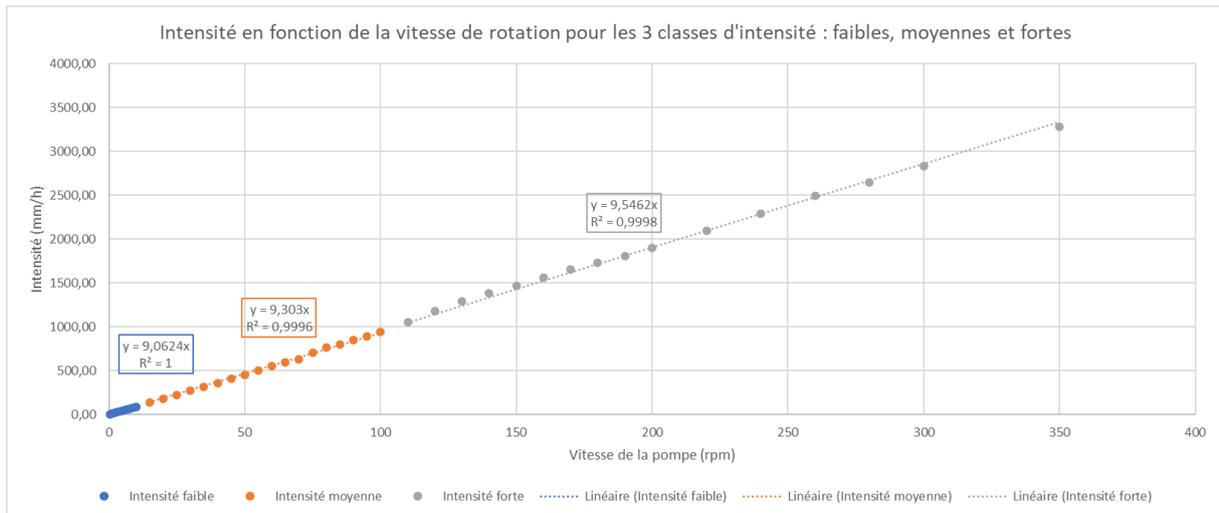


Figure 8 : Courbe de calibration de la pompe péristaltique

Pour chacune des 3 plages de débit, le modèle d'ajustement linéaire représente le mieux les résultats expérimentaux. Il y a donc une évolution linéaire du réglage manuel de la pompe. Les régressions possèdent des  $R^2$  tous supérieurs à 0,999 et témoignent ainsi de la qualité de prédiction de la régression linéaire. A noter également qu'une courbe de calibration a été créée en exprimant le débit en fonction de la vitesse de rotation de la pompe. Les résultats sont regroupés dans le tableau 3 ci-dessous :

Tableau 3 : Equations des courbes de calibration de la pompe péristaltique

Débit/intensité	$I=f(V)$	$Q=f(V)$
Faible	$I = 9,0624 * V$	$Q = 0,0539 * V$
Moyen	$I = 9,303 * V$	$Q = 0,0553 * V$
Fort	$I = 9,5462 * V$	$Q = 0,0567 * V$
Tous les points	$I = 9,5238 * V$	$Q = 0,0566 * V$

Avec  $I$  l'intensité injectée exprimée en mm/h,  $Q$  le débit injecté exprimé en ml/s et  $V$  la vitesse de rotation de la pompe exprimée en rotations par minute (rpm).

Malgré la forte similitude des équations, une légère différence existe en fonction des intensités produites. Il est donc préférable de choisir l'équation associée à la plage de débit à produire pour une plus grande précision.

## 4.2. Mesure des pluies et calibration des pluviographes

### 4.2.1. Tests de mise en charge

Les tests de mise en charge réalisés sur les pluviographes n°3 à n°12 ont donné des résultats identiques. Le collecteur se met en charge à partir d'une intensité de pluie de 950 mm/h. Cette intensité correspond à un débit de 5,65 ml/s et à une vitesse de pompe de 99,8 rotations par minute.

Le fait que les résultats soient identiques n'est pas étonnant mais cela devait tout de même être vérifié. En effet, les pluviographes étant tous du même modèle, il semble évident que la mise en charge s'effectue pour la même intensité de pluie injectée. Cependant, cela devait tout de même être contrôlé car une anomalie ou un défaut de fabrication pourrait venir modifier cette valeur d'intensité de mise en charge de l'appareil.

De plus, au cours des tests, il a été constaté que la position du tuyau, la distance à laquelle ce dernier était positionné de l'orifice de vidange ainsi que la zone du collecteur où l'eau était injectée, modifiait significativement l'écoulement à travers l'orifice de vidange. Par exemple, lorsque l'eau était injectée sur les parois du collecteur, l'écoulement de l'eau le long de ces dernières et les mouvements de tourbillons aux abords de l'orifice venaient gêner l'observation et l'écoulement à travers l'orifice de vidange. Ainsi, il était particulièrement compliqué de déterminer avec précision et certitude le débit à partir duquel le collecteur se mettait en charge. La méthode employée a donc consisté à placer le tuyau d'injection en position verticale, à environ 1 cm au-dessus de l'orifice de vidange. C'est en suivant cette méthode que les résultats ont été obtenus et ces derniers semblent cohérents. Cependant, les résultats des tests de mise en charge réalisés lors du PFE de 2019 sur les mêmes pluviographes ont permis de conclure à une intensité de mise en charge égale à 300-400 mm/h [3]. Selon les méthodes employées, on constate bien une différence importante sur le débit de mise en charge.

#### 4.2.2. Calibration statique

La calibration statique en laboratoire a ensuite été effectuée. Dans un premier temps, les augets ont été réglés à l'aide des vis de réglage afin qu'ils basculent pour une lame d'eau équivalente à 0,2 mm. Malgré les réglages effectués à l'aide des vis il est apparu que, selon les pluviographes, les basculements intervenaient pour des volumes d'eau assez variables. Le réglage des augets a permis de compenser au maximum ces variations mais ne permet pas un réglage parfait. Dans certains cas et en fonction des pluviographes, les réglages étaient plus ou moins difficiles à réaliser et stables d'un basculement à l'autre.

Ces réglages vont tout de même permettre de diminuer les déviations qui pourraient être observées par la suite lors de la calibration dynamique. En effet, c'est ce caractère dynamique de la pluie qui va avoir un fort impact sur le basculement des augets et ainsi modifier cet équilibre trouvé lors de la phase statique. L'utilisation d'une relation de correction permettra alors de prendre en considération le caractère dynamique de la pluie, la sensibilité du dispositif ainsi que le biais induit par des basculements pour des mauvais volumes d'eau.

##### Précision de la seringue :

Les tests visant à déterminer la précision de la seringue ont permis d'obtenir les résultats contenus dans le tableau 4. La totalité des mesures sont disponibles en annexe 9.

*Tableau 4 : Résultats des tests de précision de la seringue*

<b>Moyenne (g)</b>	4,29
<b>Ecart type (g)</b>	0,02
<b>Coefficient de variation (%)</b>	0,53
<b>Max (g)</b>	4,33
<b>Min (g)</b>	4,24

La moyenne des volumes mesurés est légèrement supérieure à 4,28 ml. Les extremums obtenus au cours des mesures montrent également un écart sur les mesures pouvant aller jusqu'à 0,05 g. La précision, sur la totalité des prélèvements s'élève à 0,02 g, avec un coefficient de variation égale à 0,53%.

Ainsi, malgré la faible précision théorique (0,2 ml) du matériel utilisé, les résultats expérimentaux montrent une précision 10 fois supérieure en moyenne. Cependant, la seringue n'est pas une seringue de précision et les écarts observés sur certains prélèvements sont tout de même relativement importants. A l'avenir, une micropipette de précision 1000-5000 µl devrait être utilisée afin de réduire les imprécisions sur le volume prélevé pour la calibration statique.

#### 4.2.3. Calibration dynamique

La calibration dynamique s'est déroulée en plusieurs phases. La première phase réalisée en distanciel a consisté à traiter et exploiter les mesures de calibration dynamique déjà effectuées avant le début du projet sur les pluviographes n°1 à n°4. Cette phase de l'étude a permis de répondre à plusieurs des objectifs fixés comme

déterminer l'impact de la calibration statique sur la calibration dynamique, déterminer l'évolution de la calibration dynamique dans le temps, ou encore étudier la faisabilité d'une calibration dynamique rapide. La seconde phase de l'étude a consisté à mettre en place le banc d'essai et les protocoles nécessaires à la calibration des 12 pluviographes en 1 seul cycle (de 2h) de différentes intensités. Et enfin, à la réalisation d'une calibration selon les directives de l'OMM qui préconise une calibration en 5 cycles consécutifs pour le même pluviographe. Tous ces tests visent à évaluer l'efficacité des différents protocoles et d'essayer d'en définir un seul. Les résultats ont été traités, interprétés et comparés entre eux.

#### 4.2.3.1. Calibration des 12 pluviographes avec le protocole d'un cycle de 2h

##### Deux méthodes de détection des basculements :

Avant tout développement, il est indispensable de rappeler que les pluviographes n°1 à n°4 ont été calibrés suivant un protocole n'utilisant pas l'enregistreur de basculement. Les pluviographes n°5 à n°12 ont quant à eux été calibrés à l'aide d'un enregistreur de basculement. Ce changement de mode de détection des basculements effectué à partir du pluviographe n°5 pourrait constituer un biais et gêner l'interprétation des données. Ainsi, afin de vérifier si les données des pluviographes n°1 à n°4 pouvaient être utilisées dans cette partie, malgré cette différence notable dans le protocole, il était nécessaire de réaliser une comparaison des 2 méthodes de détection des basculements.

Cette comparaison a été opérée sur le pluviographe n°5. La méthode de comparaison a consisté à traiter les mêmes données expérimentales du pluviographe n°5 des deux façons différentes, en suivant les deux protocoles de traitement des données (celui utilisé pour les pluviographes n°1 à n°4 et celui utilisé pour les pluviographes n°5 à n°12). Les tableaux de résultat des tests de comparaison des deux méthodes sont disponibles en annexe 10. La figure 9 permet de comparer les résultats obtenus en opposant les 2 courbes de calibration obtenues :

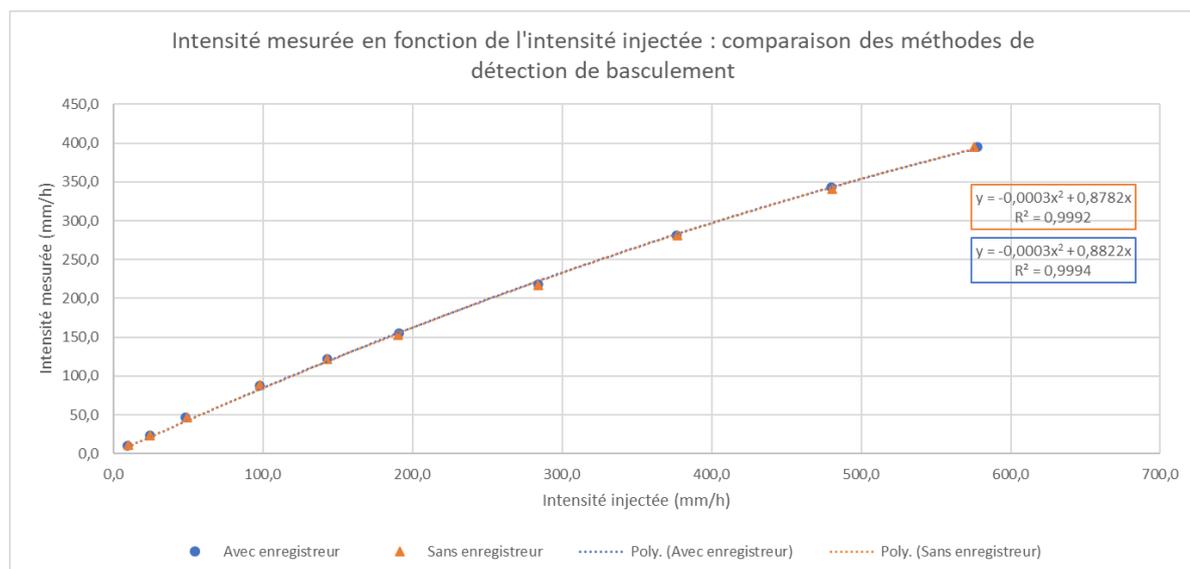


Figure 9 : Comparaison des courbes de calibration avec et sans enregistreur

Les équations des ajustements polynomiaux de degré 2 indiquent une très forte correspondance entre les résultats obtenus avec les deux méthodes de détection. Graphiquement, les courbes sont quasiment parfaitement superposées, des petites aux fortes intensités. Les résultats disponibles en annexe 10 indiquent également des écarts entre les intensités injectées et entre les intensités mesurées très faibles avec une différence moyenne de 0,2 mm/h pour les deux intensités. Ainsi, malgré la légère différence de résultats obtenus, cette dernière n'est pas significative et est sûrement liée aux légères variations de temps d'expérience et aux incertitudes de mesure. Ainsi, les résultats des pluviographes n°1 à n°4 seront pris en compte dans la suite de l'étude.

##### Calibration des pluviographes :

La calibration du réseau complet de pluviographes a d'abord nécessité le traitement et l'exploitation des données des 4 premiers pluviographes, puis la réalisation des mesures pour les pluviographes n°5 à n°12, le traitement et l'exploitation des données obtenues. Les courbes de calibration représentant l'intensité mesurée en fonction de

l'intensité injectée, les graphiques des erreurs relatives en fonction de l'intensité injectée ainsi que les graphiques de résolution des augets en fonction de l'intensité injectée ont été construits pour chaque pluviographe. Ces données permettent ainsi une calibration propre à chacun des appareils. La synthèse des résultats obtenus pour les 12 pluviographes est disponible en annexe 11.

Un des objectifs de l'étude était également d'étudier la possibilité d'une calibration unique pour tous les pluviographes. Pour cela différentes courbes de calibration peuvent être utilisées. La première est construite en exprimant la moyenne des intensités obtenues pour les 12 pluviographes (Cf. Figure 10)

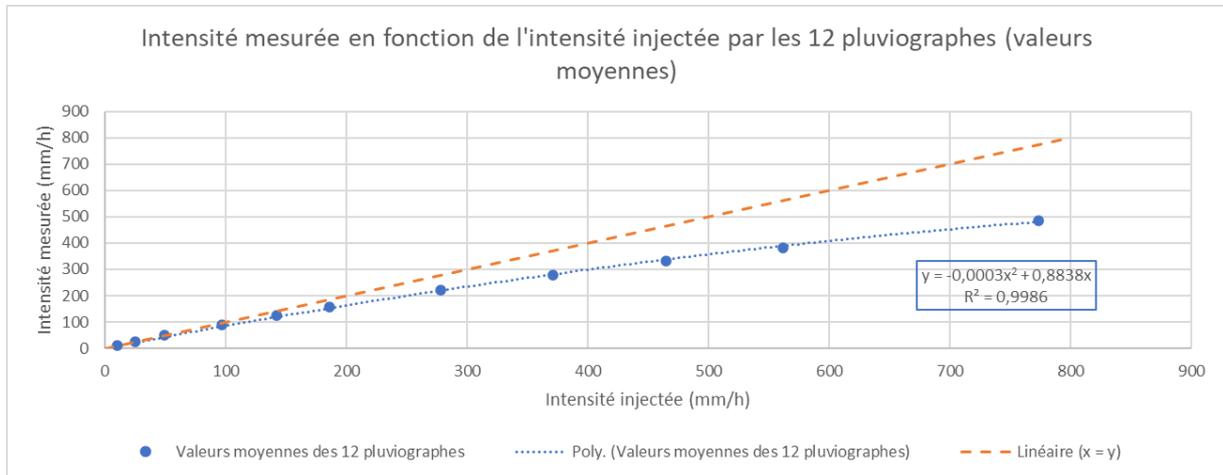


Figure 10 : Intensité mesurée en fonction de l'intensité injectée par les 12 pluviographes (valeurs moyennes)

Afin d'étudier la pertinence d'une calibration à l'aide d'une courbe unique comme celle représentée en figure 10, une option consiste à calculer les écarts types des intensités et de considérer que ces derniers constituent les incertitudes autour des valeurs moyennes calculées. En soustrayant et en ajoutant les valeurs d'écart type aux moyennes correspondantes, il est alors possible de construire un graphique composé de 2 courbes d'incertitudes encadrant la courbe de calibration moyenne. En ajoutant sur le même graphique les 12 courbes de calibration individuelles, on peut ainsi déterminer graphiquement si les 12 courbes sont contenues dans l'encadrement formé par les courbes d'incertitudes. Le graphique obtenu est représenté en figure 11. Les calculs des incertitudes à partir des écarts types sont disponibles en annexe 12.

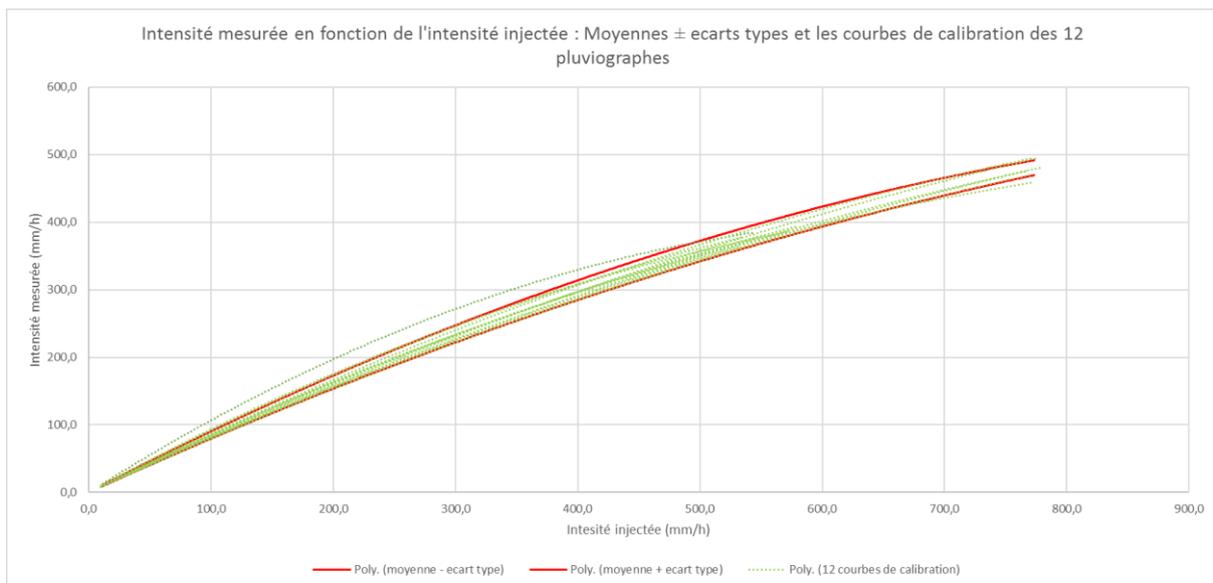


Figure 11 : Intensité mesurée en fonction de l'intensité injectée : moyennes ± les écarts types et courbes des 12 pluviographes

Ce graphique permet déjà de constater une certaine cohérence et une similitude entre les résultats obtenus pour les différents pluviographes. Seul le pluviographe n°3 montre des résultats qui diffèrent beaucoup de la moyenne. Cette différence est notamment observée pour les valeurs d'intensités comprises entre 100mm/h et 500 mm/h. Le

fait qu'un seul des pluviographes possède ce type de courbe laisse suggérer que cet écart est lié à un défaut du pluviographe en lui-même ou des appareils de mesures utilisés au moment de la calibration. Une seconde calibration de ce pluviographe serait nécessaire afin de vérifier l'origine de cet écart important. Un remplacement du pluviographe pourrait être une option envisageable.

En excluant le pluviographe n°3, toutes les courbes de calibration individuelles sont contenues dans l'intervalle d'incertitude quelle que soit l'intensité. Ceci permet donc d'envisager une calibration unique pour tous les pluviographes. Les incertitudes varient entre  $\pm 1,3$  et  $\pm 16,5$  mm/h pour les intensités mesurées par les pluviographes. Les incertitudes les plus élevées sont observées pour les intensités comprises entre 100 mm/h et 500 mm/h. Ceci est certainement dû aux écarts importants observés pour le pluviographe n°3 qui viennent augmenter les valeurs d'écart type.

Une autre méthode pour la calibration unique des pluviographes est d'utiliser la courbe de calibration formée par tous les points des 12 pluviographes. Ceci permet d'obtenir la courbe de calibration de la figure 12.

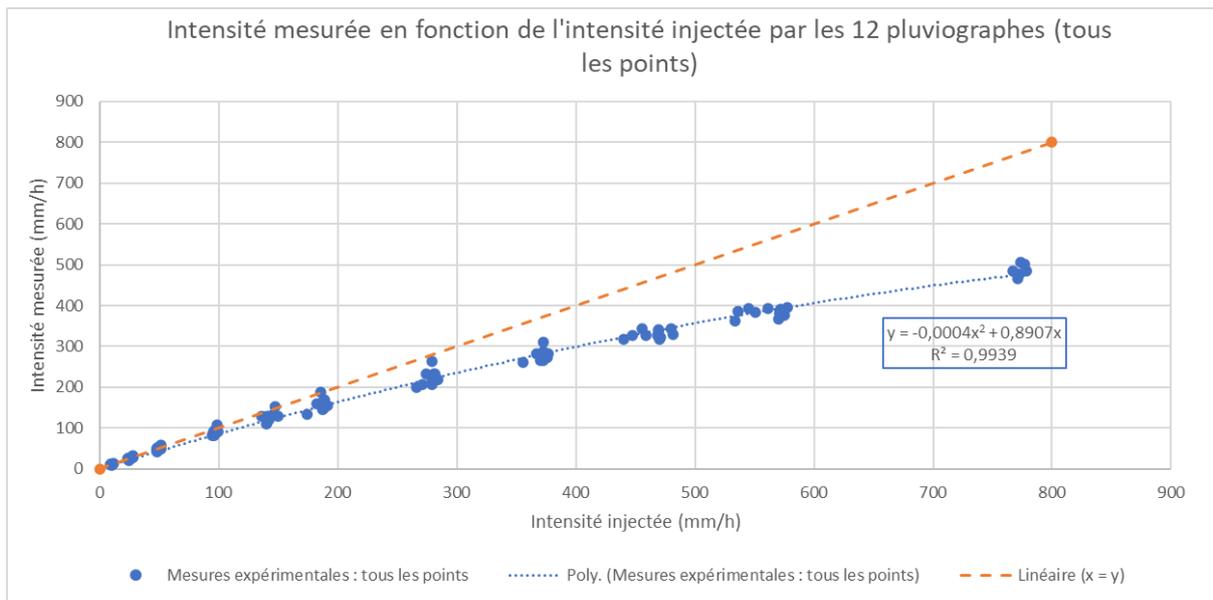


Figure 12 : Courbe de calibration globale avec les points de tous les pluviographes

#### Le choix de la courbe de calibration :

Le choix de la courbe la plus adaptée doit se faire à la fois à l'aide des indicateurs renseignant la dispersion des données autour de la relation mathématique testée (SCE, Moyenne des résidus) mais aussi par une analyse visuelle via le graphique. Tout d'abord l'analyse graphique des deux courbes représentées sur un même graphique (Cf. annexe 13) montre qu'elles sont quasiment parfaitement superposées. La différence de calibration ne devrait pas être importante, peu importe le choix de courbe. Ensuite, l'analyse des écarts entre les points expérimentaux et les courbes donne les résultats du tableau 5. La totalité des calculs sont disponibles en annexe 14.

Tableau 5 : Etude des écarts aux 2 courbes de calibration créées

	Comparaison des valeurs expérimentales avec la courbe réalisée avec tous les points	Comparaison des valeurs expérimentales avec la courbe réalisée avec la moyenne des valeurs pour chaque intensité
<b>SCE</b>	23263	23192
<b>Moyenne des écarts</b>	-2,2	6,7

Les sommes des carrés des écarts (SCE) aux courbes sont peu différentes. La SCE obtenue à partir de la courbe de calibration réalisée avec les valeurs d'intensité moyennes est légèrement plus faible. La moyenne des écarts à la courbe réalisée avec tous les points est cependant plus faible. En prenant en compte l'analyse graphique ainsi

que les indicateurs de dispersion, il ne semble pas y avoir de solution meilleure qu'une autre. Les deux semblent adaptées, mais le choix se tournerait plus vers la courbe réalisée à partir de tous les points du fait d'une moyenne des résidus plus faible qui indique une répartition plus équilibrée entre les valeurs expérimentales supérieures et inférieures à la courbe.

Les graphiques des erreurs relatives pour tous les points ainsi que les erreurs relatives moyennes en fonction des intensités injectées ont également été créés. Ils sont placés en annexe 15.

Pour compléter cette analyse et apporter un indice supplémentaire pour le choix de la courbe de calibration, un calcul de la SCE et de la moyenne des résidus a aussi été effectué à partir des valeurs moyennes et de la courbe de calibration obtenue à partir de ces mêmes valeurs. Les résultats montrent une moyenne des écarts de -2,9 mm/h, soit légèrement plus que la moyenne des écarts obtenue par comparaison des valeurs expérimentales des 12 pluviographes avec la courbe de calibration construite à partir de ces mêmes points.

*Tableau 6 : Indices de dispersion calculés à partir des valeurs moyennes et de leur courbe correspondante*

<b>SCE</b>	1153,8
<b>Moyenne des résidus</b>	-2,9

La SCE calculée avec les 12 valeurs moyennes et la courbe correspondante donne un résultat de 1154. Cependant ce résultat n'est pas comparable avec les résultats du tableau 5 étant donné qu'ils ont été obtenus en prenant en compte 12 fois plus de valeurs. Ainsi, la meilleure option, semble tout de même être la courbe de calibration construite à partir de tous les points expérimentaux.

#### Choix de la méthode d'ajustement :

L'ajustement utilisé pour chaque courbe de calibration est un ajustement polynomial de degré 2. Ce choix a été fait selon plusieurs critères. Tout d'abord, le projet de fin d'études de l'année précédente [3] portant sur la calibration des mêmes pluviographes avait démontré, par une étude de la somme des carrés des écarts et une étude graphique, que l'ajustement polynomial était le plus représentatif des mesures réalisées. Afin de confirmer ce choix, un calcul de la somme des carrés des écarts a été réalisé pour la courbe de calibration prenant en compte la totalité des points des 12 pluviographes. Trois ajustements ont été étudiés, l'ajustement puissance, linéaire et polynomiale de degré 2. Les résultats sont disponibles en annexe 16. Le choix final d'ajustement a été fait en fonction des résultats des calculs de somme des carrés des écarts et d'une analyse graphique de l'ajustement. Cette analyse a été effectuée pour chaque pluviographe individuellement, et l'ajustement le plus représentatif était à chaque fois l'ajustement polynomial de degré 2.

#### **4.2.3.2. Test du protocole de calibration du pluviographe n°7 en 5 cycles courts**

Un autre des objectifs du projet était de mettre en place une calibration en suivant une des recommandations de l'OMM qui était de réaliser la calibration en répétant 5 fois les mesures et en excluant les deux valeurs d'erreurs relatives extrêmes. Par souci de temps, une seule calibration de ce type a été réalisée sur le pluviographe n°7.

#### Mise en place d'un cycle court

Afin de faciliter la réalisation des mesures nécessaires à la calibration des pluviographes dans le futur, il a d'abord été décidé de tester la possibilité de calibrer les pluviographes en réduisant le temps d'expérience (cycle court). Ceci allait également permettre de réaliser les 5 cycles de mesures en une seule journée. Ainsi, différentes options ont été étudiées afin de diminuer au maximum le temps d'expérience, tout en gardant des résultats viables. Quatre options ont été proposées, et seul les deux les plus intéressantes ont été testées. Afin de vérifier la viabilité des mesures avec chacune des options étudiées, des courbes de calibrations ont été construites à partir des mesures déjà effectuées en cycle long, en ne sélectionnant que les mesures comprises dans le nouveau temps d'expérience testé. Ainsi, il était possible d'obtenir un aperçu des résultats obtenus en modifiant les temps d'expérience. Cette étude ne sera pas détaillée dans le présent rapport par souci de place mais les résultats sont résumés en annexe 17 sous forme de graphiques représentant les comparaisons entre le cycle long initial et les cycles courts testés. L'option 4 a été rapidement écartée du fait de l'inexploitabilité des données. En effet, le nombre de basculement pour les faibles intensités étaient bien trop faible et ne permettait pas le calcul des intensités mesurées. L'option retenue

pour la calibration en 5 cycles consécutifs est donc l'option numéro 2 qui permet de passer d'un cycle de 2h00 à un cycle de 1h19 tout en ayant des résultats très proches de ceux obtenus en cycle long.

### Calibration en 5 cycles consécutifs

Après avoir écarté les valeurs des 2 erreurs relatives extrêmes et moyenné les 3 valeurs restantes, les graphiques des intensités mesurées en fonction des intensités injectées et des erreurs relatives en fonction des intensités injectées ont été construits (Cf. Figure 14 et 15).

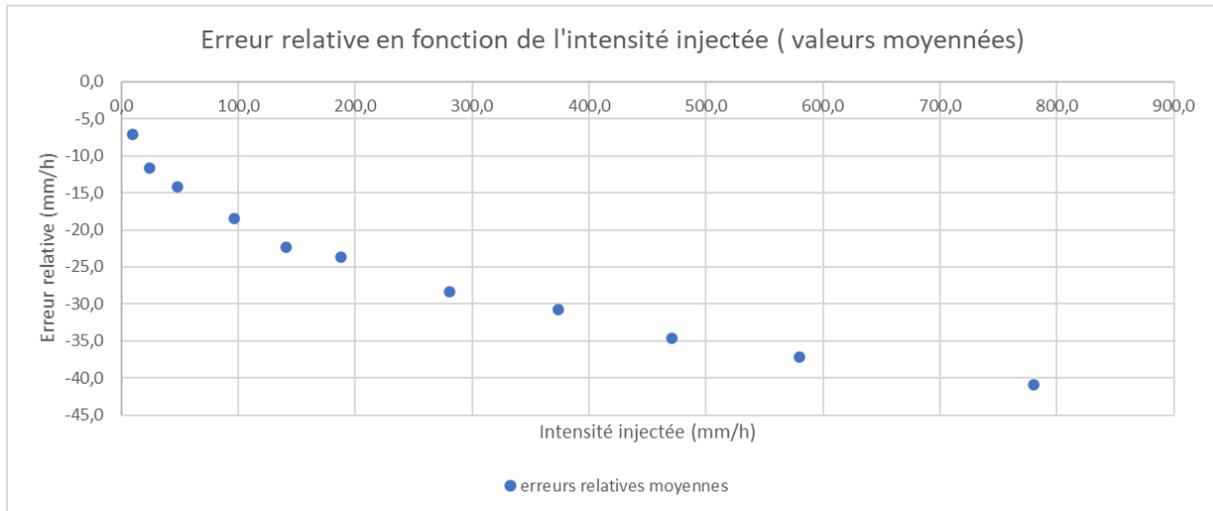


Figure 13 : Erreur relative en fonction de l'intensité injectée pour le pluviographe n°7, calibration en 5 cycles courts

Comme pour les calibrations en cycle long, on constate une augmentation importante de l'erreur relative lorsque l'intensité injectée augmente.

La figure 15 conduit au même constat, mais en comparant la courbe de calibration obtenue avec celle créée à partir de l'expérience en cycle long, il est constaté une différence relativement importante entre les résultats des deux méthodes. La calibration en 5 cycles consécutifs montre une sous-estimation encore plus importante des pluies. Plus l'intensité injectée est importante, plus l'écart entre les résultats des 2 méthodes se creuse.

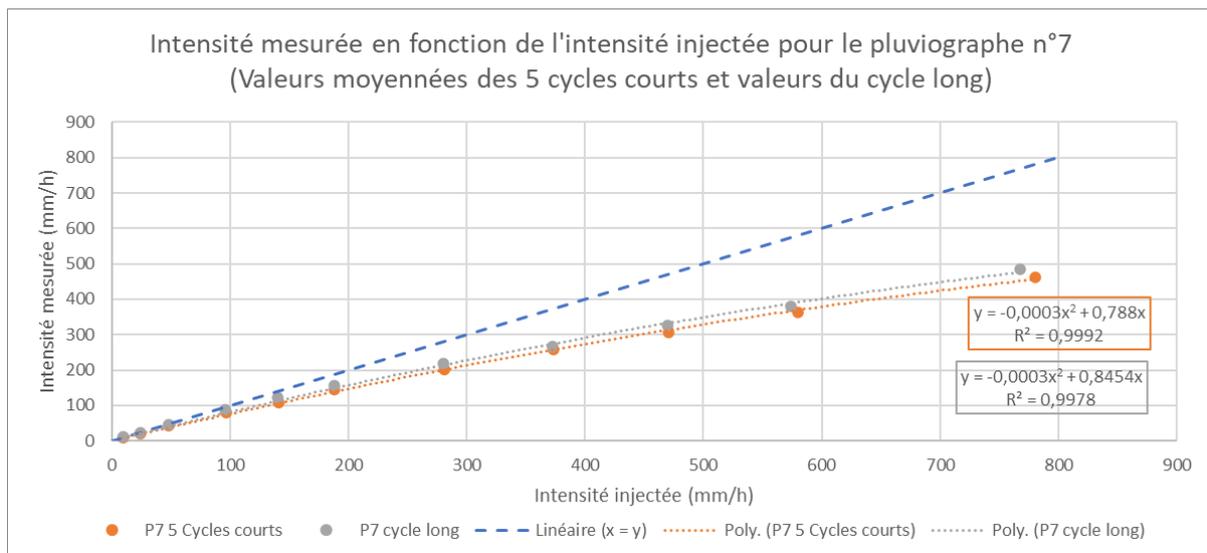


Figure 14 : Comparaison des deux méthodes de calibration pour le pluviographe n°7

Bien que cette expérience n'ait pu être réalisée sur tous les pluviographes, elle donne ici une indication importante concernant la fiabilité des résultats. Elle permet également une critique des résultats obtenus avec la calibration en

1 cycle long. En effet, en écartant les valeurs extrêmes et en moyennant les valeurs restantes, la calibration en 5 cycles consécutifs semble plus juste et plus précise. Il aurait été intéressant de pouvoir réaliser ce type de calibration sur tous les pluviographes afin de contrôler si la tendance observée sur le pluviographe n°7 est commune à tous les appareils. Si tel était le cas et si le temps le permettait, il serait peut-être plus intéressant de développer la calibration en 5 cycles à l'avenir.

## 5. Discussion

### 5.1. Proposition de correction dynamique

Les courbes de calibration créées au cours des différentes expériences du projet permettent la correction des hyetogrammes de pluie passées et futures. Le document « URGC - Hydrologie Urbaine - Cours d'hydrologie Urbaine : La pluie » de l'INSA [2] donne un exemple de correction des pluies après avoir créé les courbes de calibration (Intensité mesurée = f(Intensité injectée)). En adaptant cette méthode de correction au pas de temps et au mode d'acquisition utilisé à HSM, une méthode de correction simple et efficace peut être proposée pour corriger les précipitations mesurées par les pluviographes.

L'acquisition des données de basculement à HSM est réalisée avec un pas de temps de 1 min. Ce mode d'acquisition dit en pas de temps fixe, est très utile, notamment pour les usages ultérieurs en modélisation, mais il conduit à écreter les points instantanés d'intensité. Cependant, un pas de temps de 1 min reste très petit et permet un écretement relativement faible des intensités.

Ainsi à l'aide des données de basculement recueillies, il va être possible dans un premier temps, de calculer l'intensité mesurée moyenne pendant chaque pas de temps de 1 min. Cette intensité moyenne sera donnée par la relation :

$$I_m = \frac{H_a * Nb}{t_{-1} - t}$$

Avec  $H_a$  (en mm) la lame d'eau correspondante à un basculement d'auget,  $I_m$  (mm/h) l'intensité mesurée moyenne entre  $t_{-1}$  et  $t$  (en h),  $Nb$  le nombre de basculement entre  $t_{-1}$  et  $t$ .

Dans notre cas le pas de temps d'acquisition étant de 1 min, le dénominateur sera constant et toujours égal à 1/60 h. On détermine alors les valeurs d'intensités à pas de temps fixe d'une minute, avec une fonction en escalier  $I_m(t)$  appelée hyetogramme.

A partir de la courbe de calibration il est ensuite possible de corriger les intensités mesurées afin d'estimer les intensités réelles  $I_r(t)$  en mm/h. Une fois la correction réalisée, un hyetogramme corrigé à pas de temps fixe de 1min est créé. La correction mathématiques appliquée est de la forme de l'ajustement choisi pour représenter la répartition des points obtenus expérimentalement lors des expériences de calibration. Dans notre cas, la correction appliquée est de la forme :

$$I_m = a * I_r^2 + b * I_r$$

Avec  $a$  et  $b$  les coefficients numériques expérimentaux de la courbe de calibration.

Dans notre cas, la courbe de calibration obtenue pour les 12 pluviographes donnerait une correction du type :

$$I_m = 0,0004 * I_r^2 + 0,8907 * I_r$$

L'intensité réelle est alors déterminée par simple résolution du polynôme de second degré. Cette étape est réalisée à l'aide d'un solveur Excel ou d'une formule permettant le calcul des racines du polynôme.

La documentation de l'INSA [2] considère deux types d'intensités de pluie : les pluies de forte intensité et les pluies de faible intensité. Il est expliqué que les pluies dites de faible intensité (<100 mm/h) ne nécessitent pas de correction, contrairement aux pluies de plus de 100 mm/h. Cependant au cours des différentes expériences de

calibration effectuées au laboratoire d'HSM, des erreurs de mesures sont également présentes pour les intensités dites faibles. Une correction est donc nécessaire, bien que les erreurs entre les intensités mesurées et les intensités injectées soient beaucoup plus faibles pour des intensités injectées faibles. De plus, il est parfois observé une très légère sur-estimation des intensités pour les très faibles débits. Une correction appliquée également sur ces intensités permettrait ainsi de gagner en précision sur l'estimation des intensités réelles.

Enfin, un autre type de correction faisant intervenir les graphiques de résolution des augets en fonction de l'intensité injectée a été étudié. Cependant, aucun ajustement des points expérimentaux était convenable. Les sommes des carrés des écarts étaient très élevées et l'analyse graphique des ajustements montrait un très mauvais ajustement des mesures expérimentales, quel que soit l'ajustement choisi.

## 5.2. Retour d'expérience et propositions d'améliorations

Les différents travaux de calibration menés au cours de ce projet ont permis de mettre en évidence deux phénomènes caractéristiques des pluviographes à augets : la légère surestimation des pluies de faible intensité (<50 mm/h) et la sous-estimation des pluies de moyenne et forte intensité (>50mm/h). Cette sous-estimation augmente fortement avec l'augmentation des intensités de pluies. Cette erreur entre la pluie injectée et la pluie mesurée par le pluviographe est causée par différents phénomènes observés au cours des manipulations, notamment pour les forts débits. Lorsqu'une pluie de forte intensité est produite, un filet d'eau continu s'écoule de l'orifice de vidange du pluviographe. Ainsi, lorsque l'auget entame son basculement, une partie de cette eau va s'écouler et ne sera pas prise en compte dans le basculement. L'eau écoulée sera de nouveau comptabilisée lorsque l'auget sera revenu à sa position d'équilibre. Ainsi un certain volume d'eau ne sera pas comptabilisé entre chaque basculement. Ceci sera donc responsable d'une erreur importante, surtout pour les intensités de pluie importantes. Une autre erreur va être causée par la vitesse maximale de basculement des augets. Les augets ne peuvent basculer qu'un nombre de fois limité dans un temps court. Ceci conduira également à des erreurs importantes sur les très fortes intensités.

La calibration dynamique va alors permettre de rectifier les erreurs engendrées par les causes citées ci-dessus. Les travaux menés ont permis d'établir une calibration individuelle pour chacun des pluviographes du réseau. Ces courbes de calibrations ont été obtenues à partir d'un protocole précis et reproductible permettant d'injecter différentes intensités de pluies et de les mettre en relation avec les intensités mesurées par l'appareil. Ce protocole est un protocole relativement long (environ 2h30 par pluviographe sans compter le traitement des données) et qui nécessite par conséquent une certaine disponibilité. A partir des calibrations effectuées, une calibration unique pour tous les pluviographes a été étudiée. L'analyse graphique du faisceau de courbe constitué des 12 courbes de calibrations individuelles et des courbes d'incertitudes ont montré qu'une telle calibration était envisageable mais qu'elle engendrait inévitablement des erreurs plus importantes sur l'estimation des pluies. Les écarts types et les indices de dispersion (SCE, moyenne des résidus) permettent aussi de quantifier la dispersion des données et les écarts de calibration. L'analyse de tous ces critères n'ont pas réellement permis de choisir une option plutôt qu'une autre. Malgré cela, le choix le plus optimal semble être la courbe de calibration construite à partir de tous les points expérimentaux car les indices utilisés indiquent une faible dispersion des valeurs autour de cette courbe. Les résultats obtenus semblent donc indiquer que la calibration unique est une option envisageable mais que les erreurs d'estimation de la pluie seront inévitablement plus grandes. Pour plus de précision, il serait préférable d'utiliser les courbes de calibration individuelles.

La calibration dynamique en 5 cycles courts sur le pluviographe n°7 a permis de mettre en évidence un écart non négligeable entre les courbes de calibrations tirées des deux méthodes. Il serait intéressant de répéter la calibration en 5 cycles sur les autres pluviographes afin de pouvoir comparer les résultats et déterminer si les observations faites sur le pluviographe n°7 sont aussi observables sur les autres pluviographes.

La calibration volumétrique constitue également une étape importante de la calibration des pluviographes à augets. Le réglage des augets doit être réalisé avec soin et avec la plus grande précision possible. Le matériel disponible pour la calibration des augets au cours de ce projet était une seringue de 10 ml. La documentation disponible sur internet suggère que l'incertitude est généralement de 0,2 ml sur ce type de seringue. Cette incertitude n'étant pas négligeable, il serait préférable d'utiliser une micropipette 0,5-5 ml pour les prochaines calibrations statiques. De plus, plusieurs des pluviographes du réseau étaient tout particulièrement difficiles à calibrer statiquement. Malgré un vissage maximal de la vis de réglage présente sous les augets, certains augets basculaient pour des volumes légèrement inférieurs à 4,28 ml. Les étalonnages ont tout de même été effectués au maximum de ce qu'il était

possible de corriger avec la vis de réglage, mais un lestage manuel de l'auget pourrait être envisager. Certains préconisent l'emploi de colle thermofusible pour lester les augets et perfectionner le réglage des appareils.

## 6. Conclusion

Les travaux menés au cours de ce projet ont permis d'atteindre plusieurs des objectifs qui avaient été fixés. Premièrement, la calibration statique puis la calibration des 12 pluviographes a pu être effectuée avec succès. Pour cela un protocole expérimental dit en « 1 cycle long de 2h » a été mis en place. A partir des résultats obtenus au cours de ces expérimentations, une calibration dynamique unique pour tous les pluviographes a été mise en place. Une courbe de calibration a été construite à partir de toutes les mesures effectuées sur les 12 pluviographes. Il a été démontré qu'une telle calibration était envisageable mais qu'elle entraînait inévitablement des erreurs plus importantes sur l'estimation de l'intensité de pluie. Ensuite, une calibration dynamique suivant un autre protocole expérimental dit en « 5 cycles de 1h19 » a été menée sur le pluviographe n°7. Les résultats ont permis de démontrer un écart relativement important entre les 2 types de protocoles, surtout pour les fortes intensités de pluie. En effet, le protocole dit en « 5 cycles de 1h19 » a permis la création d'une courbe de calibration qui sous-estimait encore plus les précipitations. Il serait intéressant de mener la même expérience sur le reste des pluviographes afin de conclure sur la différence entre les 2 protocoles.

Ensuite, la calibration statique des pluviographes a permis de mettre en exergue la difficulté du réglage des augets. Les volumes de basculement étaient relativement instables et aléatoires et le système de réglage par vissage sous les augets a montré certaines limites. A l'avenir, et si cela est nécessaire, un lestage des augets pourrait être envisagé afin d'affiner le réglage et permettre une meilleure calibration statique. Par ailleurs, la seringue utilisée pour la calibration n'est pas précise, les incertitudes sont importantes et ne permettent pas de prélever un volume précis de 4,28 ml. Il serait préférable d'utiliser une micropipette 0,5-5 ml précise au microlitre pour les futures mesures.

D'autres traitements de données ont également été effectués dans le but de déterminer l'impact de la calibration statique sur la calibration dynamique et l'impact du temps sur la calibration du pluviographe. Les résultats de ces études ne sont pas présentés dans le rapport mais ont permis de montrer une différence significative des mesures lorsque la calibration statique n'était pas réalisée avant la calibration dynamique. Le temps, en revanche, ne semble pas avoir beaucoup d'impact sur la calibration à court terme (quelques jours).

# Références bibliographiques

[1] J.-L. Bertrand-Krajewski, *URGC Hydrologie Urbaine*, INSA de Lyon, p. 5-6

[2] Organisation météorologique mondiale, *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques*, OMM N°8, p. 201 – p. 228, Edition 2014, Mis à jour en 2017

[3] User manual, *Rain Collector with Mountable Base*, Product numbers 6465 and 6465M

[4] LAMIRAUX Cédric, *Calibration d'un réseau de pluviographes*, p. 11, Année 2019-2020

# **Index des tables et illustrations**

Figure 1 : Schéma de fonctionnement d'un pluviographe à augets .....	2
Figure 2 : Photo du dispositif à augets .....	5
Figure 3 : Pompe péristaltique Shenchen LabV6 .....	7
Figure 4 : Balance de précision Mettler Toledo XS320001L.....	7
Figure 5 : Enregistreur de basculements ERCOGENER GenPro 325e.....	7
Figure 6 : Photographies d'étalonnage statique .....	8
Figure 7 : Dispositif de calibration dynamique mis en place .....	10
Figure 8 : Courbe de calibration de la pompe péristaltique.....	12
Figure 9 : Comparaison des courbes de calibration avec et sans enregistreur.....	14
Figure 10 : Intensité mesurée en fonction de l'intensité injectée par les 12 pluviographes (valeurs moyennes)...	15
Figure 11 : Intensité mesurée en fonction de l'intensité injectée : moyennes $\pm$ les écarts types et courbes des 12 pluviographes.....	15
Figure 12 : Courbe de calibration globale avec les points de tous les pluviographes .....	16
Figure 14 : Erreur relative en fonction de l'intensité injectée pour le pluviographe n°7, calibration en 5 cycles courts .....	18
Figure 15 : Comparaison des deux méthodes de calibration pour le pluviographe n°7 .....	18
Tableau 1 : Synthèse des différentes sources d'erreurs sur un pluviographe à augets.....	5
Tableau 2 : Intensité injectée, vitesse de pompe et temps d'expérience pour chaque intensité .....	10
Tableau 3 : Equations des courbes de calibration de la pompe péristaltique .....	12
Tableau 4 : Résultats des tests de précision de la seringue .....	13
Tableau 5 : Etude des écarts aux 2 courbes de calibration créées .....	16
Tableau 6 : Indices de dispersion calculés à partir des valeurs moyennes et de leur courbe correspondante .....	17

# Annexes

## ANNEXE 1 : Manuel d'utilisation du pluviographe DAVIS 6465

### Rain Collector (#6465 & 76465M)

This rain collector can be used with Vantage Pro2™ weather stations, including Vantage Pro2, Vantage Pro2 Plus, and the Anemometer/Sensor Transmitter Kit.

The following instructions assume the rain collector is being used with a Vantage Pro2 or Vantage Pro2 Plus Integrated Sensor Suite (ISS). Refer to the user manual that came with your station for more information.

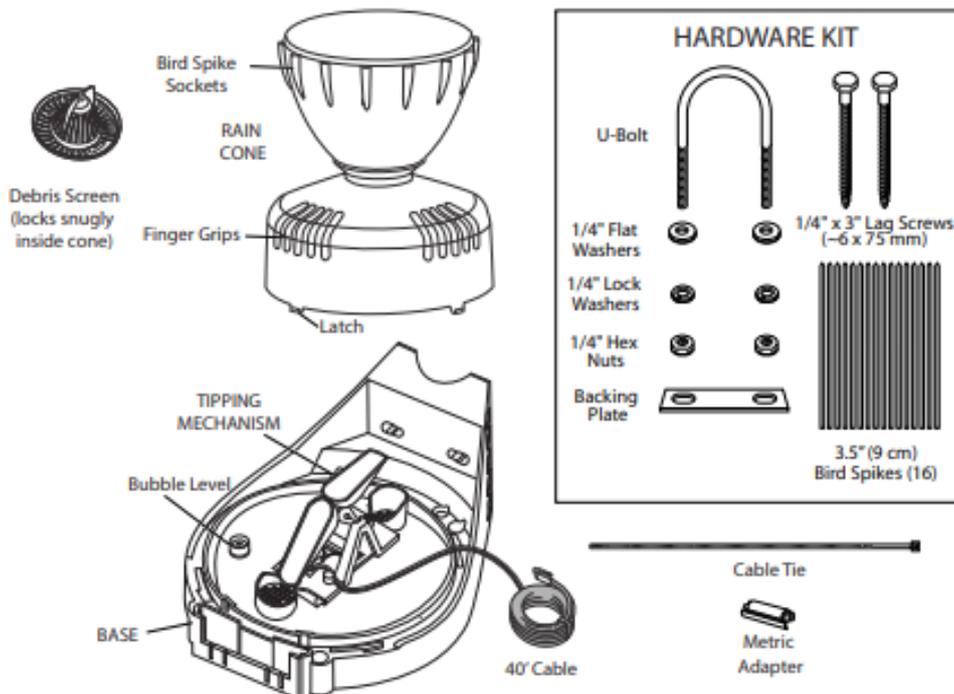
*Manuals are available online at [www.davisnet.com](http://www.davisnet.com) in the Weather Support section.*

**Note:** Model number 7857 is factory-calibrated to take rain measurements in 0.01 inches. The metric version of the rain collector, number 7857M, comes factory-calibrated to take measurements in 0.2 mm.

#### Components

Please make sure you have all listed components before continuing.

- Rain collector cone latched onto base
- Base with tipping mechanism and 40' (12 m) cable
- U-bolt, backing plate and 2 each: lag screws, flat washers, lock washers, hex nuts, and cable tie
- Metric adapter
- Debris Screen
- 16 3.5" (9 cm) bird spikes (optional)

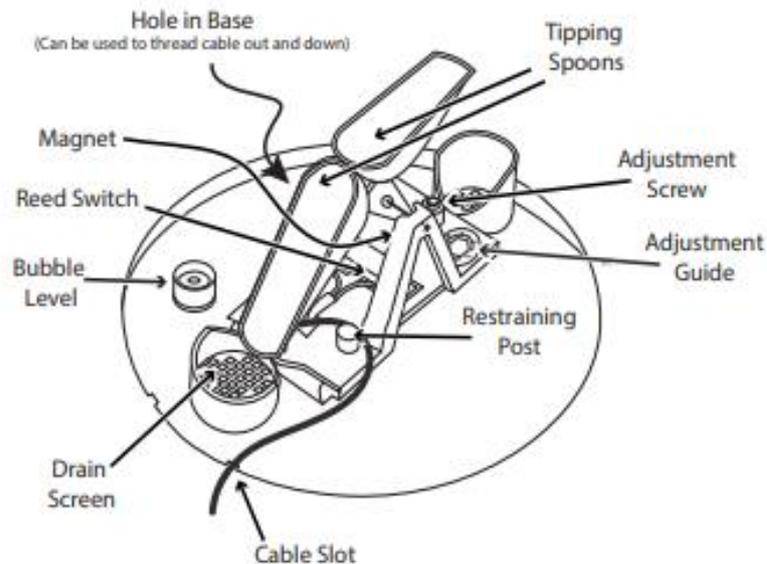


## Tools and Materials Needed

You may need some of the following tools and materials to install the rain collector.

- Drill with 3/32" (2 mm) drill bit
- Medium Phillips screwdriver
- 3/16" (or 5 mm) wrench
- Cable clips or weather-resistant cable ties with screw holes or other means for mounting

## Rain Collector Internal Components



---

Note: The rain collector is shipped with the 40' cable coiled and exiting through one of the cable slots. You may want to uncoil the cable and feed it down through the hole in the base behind the tipping spoon.

---

## **ANNEXE 2 : PROCEDURE D'ETALONNAGE SELON OMM**

### **Les points importants de cette procédure normalisée sont les suivants :**

Les pluviomètres enregistreurs d'intensité devraient être étalonnés à l'aide d'un système de simulation de pluie qui remplit les conditions suivantes :

- 1/ Nécessité de produire des intensités à débits constants de 0,2 à 2 000 mm/h (4,28 ml/h à 42 800 ml/h dans le cas des pluviomètres DAVIS)
- 2/ Mesurer le débit par pesée lors de l'expérience
- 3/ Possibilité de mesurer la valeur de sortie de l'instrument étalonné à chaque impulsion ou à intervalles de temps réguliers. **6**

### **Exigences :**

- 1/ Les incertitudes sur l'intensité des précipitations injectées doivent être inférieures à 1%
- 2/ Au moins 5 intensités de référence réparties de manière à couvrir la gamme d'utilisation de l'appareil doivent être testées.
- 3/ Le débit est calculé à partir des mesures de la masse et du temps
- 4/ La mesure de la masse doit être plus précise que 0,1%.
- 5/ Les essais doivent durer assez longtemps pour garantir une incertitude inférieure à 1% dans les mesures de l'intensité. (de 5 minutes pour les intensités fortes à plus de 30 minutes pour les plus faibles)
- 6/ La résolution temporelle maximale pour les mesures de l'intensité devrait être d'une seconde
- 7/ Les incertitudes dues aux variations de la masse volumique de l'eau doivent être prises en compte. Pour cela, les conditions ambiantes lors de l'étalonnage doivent être notées (date, heure, température de l'air, de l'eau, pression atmosphérique et humidité relative ambiante)
- 8/Le nombre d'essais réalisés pour chaque instrument et leur description en termes d'unités de temps et/ou de nombre de basculements doivent être indiqués.

### **Limitation des sources d'erreurs en laboratoire :**

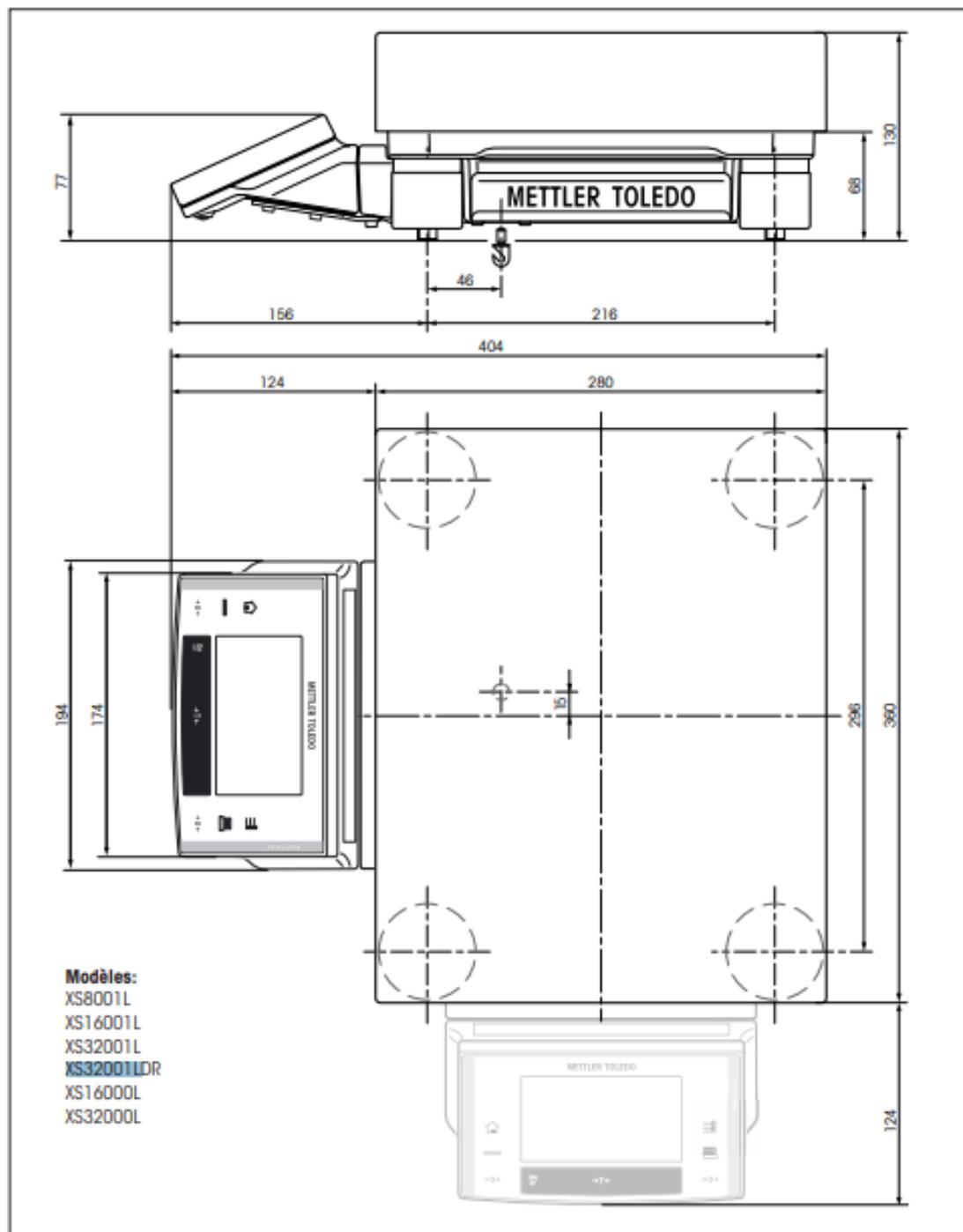
- 1/ La qualité de l'eau doit être définie. Une eau du robinet est favorisée à une eau déminéralisée puisque plus proche de l'eau de pluie du point de vue de sa composition.
- 2/ Les conditions d'étalonnage doivent être reproductibles.
- 3/ Un équipement de contrôle et d'enregistrement adéquat doit être utilisé afin de réduire les erreurs dues au comptage.

### **Procédure pour l'interprétation des données :**

- 1/ Calcul de l'erreur relative :  $e = \frac{I_m - I_r}{I_r} \times 100\%$  avec  $I_m$  l'intensité mesurée et  $I_r$  l'intensité injectée.
- 2/ De 3 à 5 essais doivent être réalisés pour chaque intensité. Pour 5 essais, les deux valeurs extrêmes des erreurs relatives sont écartées et les trois autres sont moyennées.
- 3/  $I_m$  et  $I_r$  doivent être représentées sur un graphique avec des valeurs moyennes pour chaque intensité. Les données sont ensuite ajustées sur une courbe d'interpolation qui correspond à la courbe du meilleur ajustement.
- 4/ Si l'eau commence à se stocker dans le cône à une intensité inférieure à l'intensité maximale déclarée par le constructeur, cette intensité doit être notée. Dans le cas de la documentation DAVIS cette intensité n'a pas été trouvée pour le nouveau modèle de collecteur. Cependant pour les stations utilisant les anciens modèles de collecteur avec le même fonctionnement d'augets et la même section cette intensité maximale fournie par le constructeur est de 2540 mm/h [5] **7**

**ANNEXE 3 : Fiche technique de la balance Mettler Toledo xs32001L**

**3.7.3 Dimensions des balances de précision XS avec plate-forme de pesage L**



### 3.7.2 Caractéristiques spécifiques aux modèles avec plate-forme de pesage L

#### 3.7.2.1 Balances de précision XS avec une précision d'affichage de 0.1 g / 1 g, plate-forme L

##### Caractéristiques techniques (valeurs limites)

Modèle	XS8001L	XS16001L	XS32001L	XS32001LDR	XS16000L	XS32000L
Charge max.	8100 g	16100 g	32100 g	32100 g	16100 g	32100 g
Charge max. dans la plage fine	-	-	-	6400 g	-	-
Précision d'affichage	0.1 g	0.1 g	0.1 g	1 g	1 g	1 g
Précision d'affichage dans la plage fine	-	-	-	0.1 g	-	-
Plage de tarage	0...8100 g	0...16100 g	0...32100 g	0...32100 g	0...16100 g	0...32100 g
Répétabilité (sd)	0.08 g	0.08 g	0.08 g	0.6 g	0.6 g	0.6 g
Répétabilité (sd) dans la plage fine	-	-	-	0.1 g	-	-
Linéarité	0.2 g	0.2 g	0.3 g	0.3 g	0.6 g	0.6 g
Déviaton de la charge excentrée (mesurée avec)	0.3 g (5 kg)	0.3 g (5 kg)	0.3 g (10 kg)	1 g (10 kg)	1 g (5 kg)	1 g (10 kg)
Ecart de sensibilité	$8 \times 10^{-5} R_{gr}$	$5 \times 10^{-5} R_{gr}$	$3 \times 10^{-5} R_{gr}$	$3 \times 10^{-5} R_{gr}$	$8 \times 10^{-5} R_{gr}$	$6 \times 10^{-5} R_{gr}$
Dérive de température de la sensibilité <sup>1)</sup>	$1.5 \times 10^{-5} / ^\circ C R_{gr}$	$1.5 \times 10^{-5} / ^\circ C R_{gr}$	$1 \times 10^{-5} / ^\circ C R_{gr}$	$1 \times 10^{-5} / ^\circ C R_{gr}$	$1.5 \times 10^{-5} / ^\circ C R_{gr}$	$1.5 \times 10^{-5} / ^\circ C R_{gr}$
Stabilité de la sensibilité <sup>2)</sup>	$5 \times 10^{-5} / \alpha R_{gr}$	$5 \times 10^{-5} / \alpha R_{gr}$	$3 \times 10^{-5} / \alpha R_{gr}$	$3 \times 10^{-5} / \alpha R_{gr}$	$5 \times 10^{-5} / \alpha R_{gr}$	$5 \times 10^{-5} / \alpha R_{gr}$
Temps de stabilisation	1.5 s	1.5 s	1.5 s	1.5 s	1.2 s	1.2 s
Cadence d'actualisation de l'interface	23 /s	23 /s	23 /s	23 /s	23 /s	23 /s
Nombre de poids d'étalonnage intégrés <sup>3)</sup>	1	1	1	1	1	1
Dimensions balance (L x P x H) [mm]						
• Terminal monté sur le grand côté	360 x 404 x 130	360 x 404 x 130	360 x 404 x 130	360 x 404 x 130	360 x 404 x 130	360 x 404 x 130
• Terminal monté sur le petit côté	280 x 484 x 130	280 x 484 x 130	280 x 484 x 130	280 x 484 x 130	280 x 484 x 130	280 x 484 x 130
Dimensions plate-forme (L x P x H) [mm]	280 x 360 x 130	280 x 360 x 130	280 x 360 x 130	280 x 360 x 130	280 x 360 x 130	280 x 360 x 130
Dimensions plateau (L x P) [mm]	280 x 360	280 x 360	280 x 360	280 x 360	280 x 360	280 x 360
Poids [kg]	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4

##### Caractéristiques techniques pour la détermination de l'incertitude de mesure

Modèle	XS8001L	XS16001L	XS32001L	XS32001LDR	XS16000L	XS32000L
Répétabilité (sd) typique	$40mg + 2.5 \times 10^{-4} R_{gr}$	$40mg + 1.2 \times 10^{-4} R_{gr}$	$40mg + 6 \times 10^{-7} R_{gr}$	$400mg + 3 \times 10^{-4} R_{gr}$	$400mg + 6 \times 10^{-4} R_{gr}$	$400mg + 3 \times 10^{-4} R_{gr}$
Non-linéarité différentielle (sd) typique	$\sqrt{(5 \times 10^{-7} g R_{gr})}$	$\sqrt{(2.5 \times 10^{-7} g R_{gr})}$	$\sqrt{(3 \times 10^{-7} g R_{gr})}$	$\sqrt{(3 \times 10^{-7} g R_{gr})}$	$\sqrt{(2.5 \times 10^{-7} g R_{gr})}$	$\sqrt{(1.2 \times 10^{-6} g R_{gr})}$
Déviaton de la charge excentrée différentielle (sd) typique	$2 \times 10^{-5} R_{gr}$	$2 \times 10^{-5} R_{gr}$	$1 \times 10^{-5} R_{gr}$	$3 \times 10^{-5} R_{gr}$	$6 \times 10^{-5} R_{gr}$	$3 \times 10^{-5} R_{gr}$
Ecart de sensibilité (sd) typique	$1.2 \times 10^{-5} R_{gr}$	$8 \times 10^{-6} R_{gr}$	$5 \times 10^{-6} R_{gr}$	$5 \times 10^{-6} R_{gr}$	$1.2 \times 10^{-5} R_{gr}$	$1 \times 10^{-5} R_{gr}$
Pesée minimale <sup>4)</sup> (selon USP) typique	$120g + 7.5 \times 10^{-3} R_{gr}$	$120g + 3.6 \times 10^{-3} R_{gr}$	$120g + 1.8 \times 10^{-3} R_{gr}$	$1200g + 9 \times 10^{-3} R_{gr}$	$1200g + 1.8 \times 10^{-2} R_{gr}$	$1200g + 9 \times 10^{-3} R_{gr}$
Pesée minimale <sup>4)</sup> (selon USP), plage fine, typique	-	-	-	$120g + 9 \times 10^{-3} R_{gr}$	-	-
Pesée minimale <sup>4)</sup> (1%, 2 sd) typique	$8g + 5 \times 10^{-4} R_{gr}$	$8g + 2.4 \times 10^{-4} R_{gr}$	$8g + 1.2 \times 10^{-4} R_{gr}$	$80g + 6 \times 10^{-4} R_{gr}$	$80g + 1.2 \times 10^{-3} R_{gr}$	$80g + 6 \times 10^{-4} R_{gr}$
Pesée minimale <sup>4)</sup> (1%, 2 sd), plage fine, typique	-	-	-	$8g + 6 \times 10^{-4} R_{gr}$	-	-

$R_{gr}$  = Pesée minimale

$R_{nt}$  = Poids net (pesée)

sd = Écart type

$\alpha$  = Année (Annum)

<sup>1)</sup> Dans la plage de température 10...30 °C

<sup>2)</sup> Stabilité de la sensibilité à partir de la première mise en service avec réglage automatique activé FACT.

<sup>3)</sup> Les poids d'étalonnage des balances de précision XS sont en acier au nickel-chrome inoxydable non magnétique.

La masse des poids d'étalonnage est raccordée au kilogramme primaire qui représente l'unité de la masse et est conservée à Paris.

<sup>4)</sup> La pesée minimale peut être améliorée par les actions suivantes:

- Sélection de paramètres de pesage appropriés
- Choix d'un meilleur emplacement
- Utilisation de récipients de tare plus petits

## ANNEXE 4 : Fiche technique de l'enregistreur de basculement ECOGENER GenPro 325°

# GenPro 325e EasePro

Référence : N1103A4-EPro

Boîtier 3G de supervision et d'alarme  
- Equipé de l'application EasePro  
- Transmetteur d'alarme sur évènement  
- Enregistreur de données  
- Configurable à distance  
- Logiciel de configuration  
- Boîtier industriel compact et robuste



### Descriptif

Réseaux 2G/3G  
Alimentation 7.2 à 32 VDC  
1 port série RS232C  
3 entrées / 1 sortie  
1 entrée analogique 0-10volts  
Décodage DTMF  
Options:  
- Batterie de secours  
- 2<sup>ème</sup> entrée analogique 0-10volts

#### Contenu du package livré

- 1 GenPro 325e chargé avec l'application EasePro
- 1 cordon 4 fils (alim + 1IN + 1OUT) / Micro-Fit 4pts
- 1 cordon 2 fils (2IN) / Micro-Fit 2pts
- 2 brides de fixation
- 1 Notice de mise en service

### Caractéristiques

#### Fonctions principales

- Envoi d'alarmes par SMS & Mails
- Pilotage de sorties à distance
- Télé-relève de sondes, capteurs, compteurs
- Enregistreur de données (capteurs, sondes...)

#### Réseaux

- 2G
- 3G

#### Interfaces

- Antenne externe
- Entrées / Sorties logiques
- Entrées Analogiques 0/10V (Standard)
- Entrées Analogique 0/10V (Option)
- RS232

#### Fonctionnalités

- SMS
- GSM DATA (CSD)
- Stack TCP/IP embarquée
- Protocole PPP
- Connexion permanente entre machines
- Connexion cyclique programmable
- Configurable à distance
- Mise à jour du logiciel embarqué à distance
- Mode faible consommation
- Batterie interne (Option)

#### Applications et protocoles embarqués

- EasePro
- Envoi de fichiers (FTP)
- Envoi de eMail (SMTP)
- Protocole UDP/TCP-IP UDP
- Mise à l'heure NTP

## ANNEXE 5 : PROCEDURE D'ETALONNAGE HSM

Etalonnage en salle : T° constante, pas de vent

### Mettre le pluviomètre de niveau

#### Calibration statique :

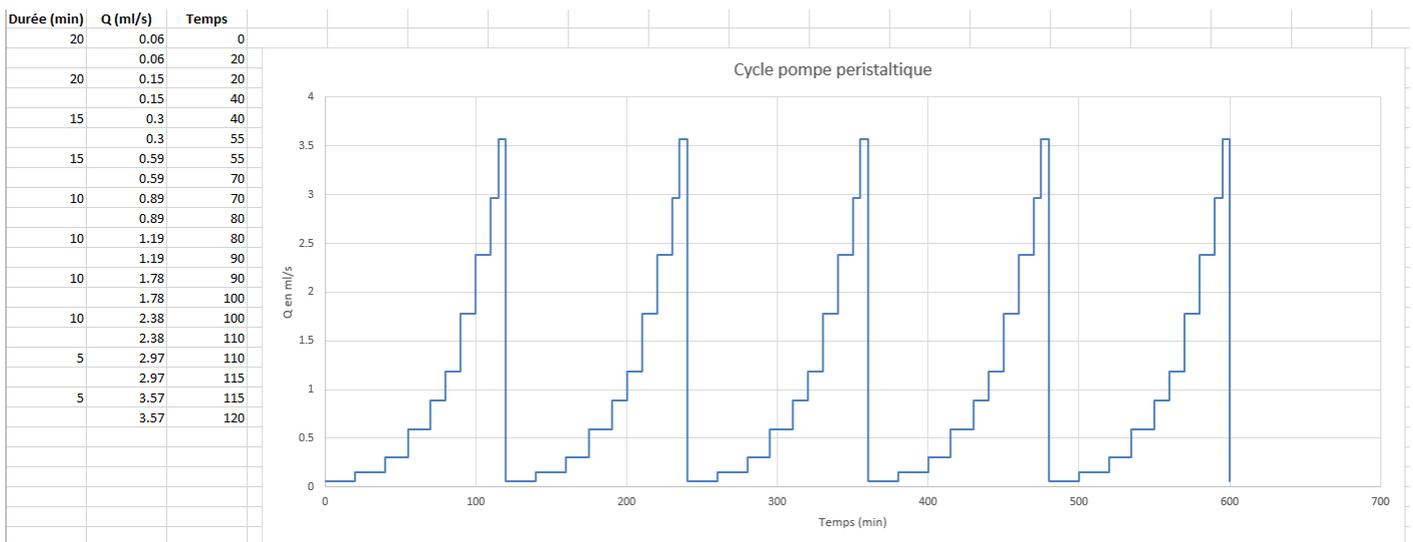
Pour une section de 214 cm<sup>2</sup>, une lame d'eau de 0.2 mm correspond à un volume de 4,28 mL. ( $V = 0.2 * S = 0.2 * 214 \times 10^{-4} * 103 = 4,28 \text{ mL}$ ). Les augets sont normalement calibrés de manière à basculer pour ce volume d'eau précis. La calibration statique ou volumétrique consiste à régler les augets à l'aide des vis de réglage et permettre un basculement au volume correspondant à une lame d'eau de 0,2 mm soit 4,28 ml.

#### Calibration dynamique :

La seconde étape est la calibration dynamique. Elle permet d'estimer les volumes sous comptés ou sur comptés causés par le système en lui-même et le caractère dynamique de l'écoulement.

10 intensités différentes comprises entre 10 et 600 mm/h

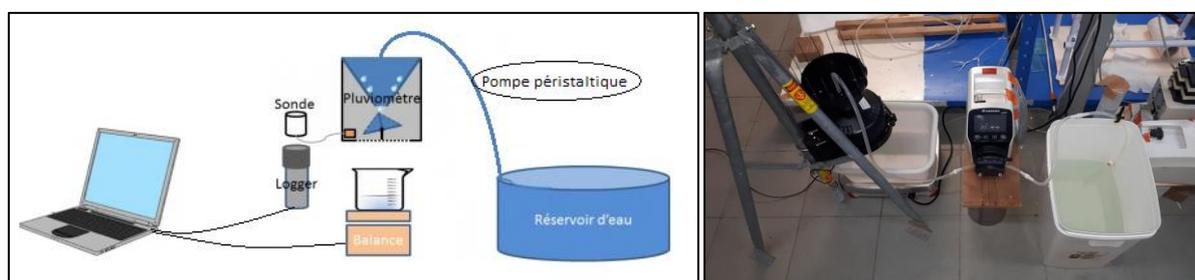
Débit (ml/s)	Intensité (mm/h)
0.06	10
0.15	25
0.30	50
0.59	100
0.89	150
1.19	200
1.78	300
2.38	400
2.97	500
3.57	600



En pratique nous ne faisons qu'un seul essai (2h) et non pas cinq (10h)

## **Fonctionnement du banc d'essai pour l'étalonnage des pluviographes DAVIS 6465M**

Le protocole expérimental utilisé pour la réalisation des tests de calibration fait intervenir différents appareils et matériels : Le réservoir d'eau, la balance, la pompe péristaltique, le pluviographe à étalonner, un bac de récupération des eaux, un enregistreur de basculement, une antenne émettrice et un ordinateur. Le schéma et la photographie ci-dessous représentent le dispositif de calibration utilisé.



*Figure 15 : Schéma et photographie du banc d'essai*

Le protocole de calibration consiste à injecter différentes intensités de pluie différentes dans le pluviographe. A chaque intensité correspond un temps d'expérience spécifique et une vitesse de pompe. Le tableau ci-dessous est un exemple de paramétrage pour un test de calibration.

Intensité injectée (mm/h)	Temps d'expérience minimum (min)	Vitesse de pompe (rpm)
10	20	1,1
25	20	2,7
50	15	5,4
100	15	10,7
150	10	15,7
200	10	21,0
300	10	31,4
400	10	41,9
500	5	52,4
600	5	62,9
800	5	83,8

*Figure 16 : Exemple d'expériences de calibration*

L'utilisation du banc d'essai pour la réalisation de ce type de protocole est simple. Il suffit de suivre les étapes suivantes :

1. Allumer la pompe péristaltique, l'ordinateur, et la console d'enregistrement CR1000 reliée à la balance. Cette dernière s'allume en branchant simplement la prise d'alimentation.

- Ouvrir le logiciel PC400 permettant la lecture des mesures réalisées par la balance et se trouvant sur le bureau de l'ordinateur du laboratoire ;
- Sur la fenêtre d'accueil du logiciel connecter la console à la balance en appuyant sur le bouton « Connect » après avoir sélectionné la console CR1000. L'image ci-dessous permet de repérer les menus et boutons de cette étape.

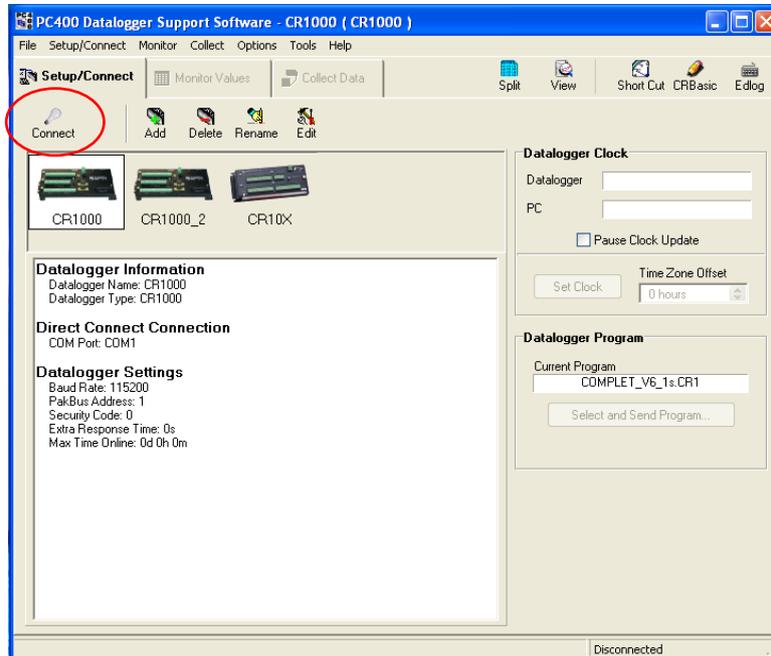


Figure 17 : Fenêtre d'accueil du logiciel PC400

- Synchroniser l'heure de l'enregistreur de basculement avec l'heure de la console d'enregistrement de la balance. La synchronisation doit se faire à partir de l'heure indiquée en face de la case « Datalogger » et l'heure du réseau téléphonique mobile. Il faut donc modifier l'heure de la case « Datalogger » pour qu'elle soit égale à celle du réseau téléphonique (Cf. Figure 4) ;

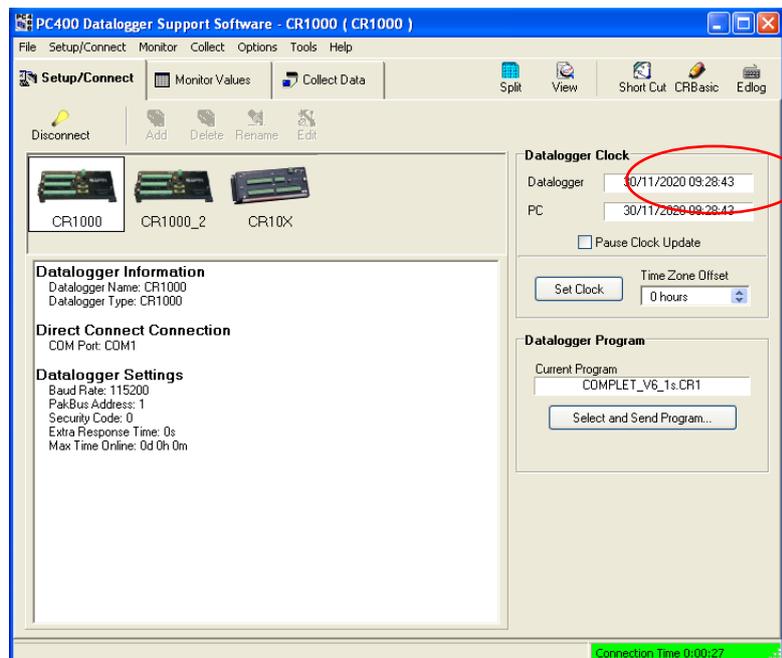


Figure 18 : Photo d'aide à la synchronisation

5. Fixer le pluviographe à calibrer sur le trépied en vérifiant l'horizontalité de l'appareil grâce au niveau à bulle présent dans le pluviographe. Placer le tout au-dessus du bac de récupération des eaux, lui-même situé sur la balance.
6. Connecter le pluviographe à l'enregistreur de basculements ;
7. Remplir le réservoir d'eau permettant de fournir le volume nécessaire pour créer la pluie injectée.
8. Fixer les tuyaux d'alimentation et d'injection de la pompe dans le réservoir et dans le collecteur du pluviographe respectivement ;
9. Régler la pompe sur la vitesse de rotation correspondant à l'intensité de pluie testée.
10. Laisser le régime permanent s'établir 10 secondes et démarrer un chronomètre après le premier basculement. Noter l'heure de démarrage du chronomètre.
11. Attendre le temps indiqué pour l'intensité testée. Lorsque ce temps est atteint, attendre le basculement suivant, noter l'heure correspondante et reprendre à l'étape 9 du protocole jusqu'à ce que le cycle entier ait été effectué.
12. Récupérer les données de basculement à partir de l'enregistreur ainsi que les données de masse enregistrées par la balance.

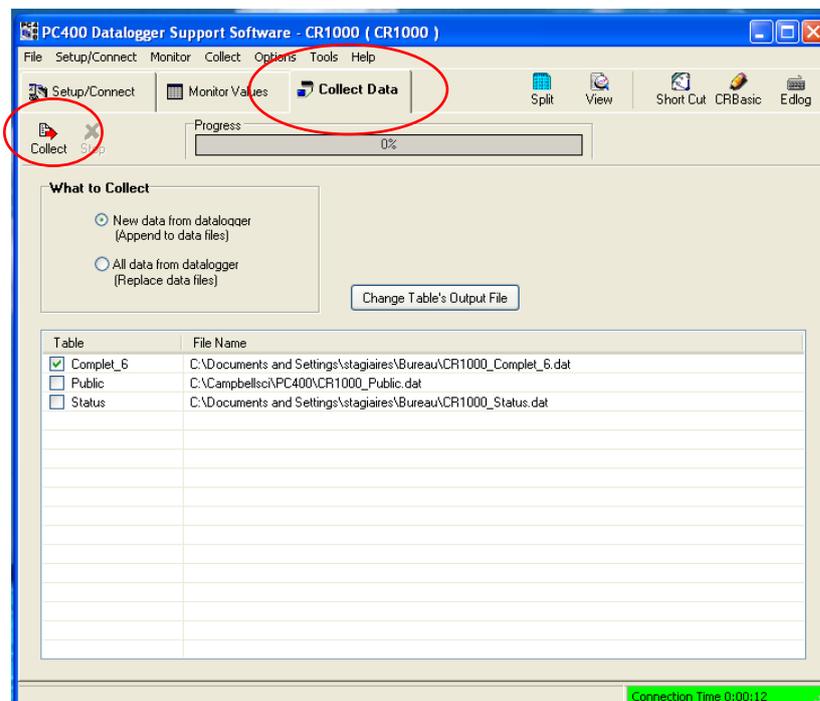


Figure 19 : Photo d'aide à la collecte des données

Pour récupérer les données il suffit de cliquer sur le menu « Collect Data » et de cliquer sur le bouton collect situé en haut à gauche de la fenêtre du logiciel (Cf. Figure 5). Les données se téléchargent sur le bureau de l'ordinateur automatiquement. Il faut ensuite les traiter sous Excel.

Lorsque la manipulation est terminée, vider le bac de récupération des eaux, éteindre la pompe, fermer le logiciel PC400 et éteindre l'ordinateur, puis débrancher la console d'enregistrement.

## ANNEXE 7 : Traitement des données sous Excel

# Traitement des données de calibration sous Excel

Après avoir réalisé le protocole de calibration, il faut traiter deux types de données. Premièrement, les données de basculement, puis les données de masse d'eau. Il faut également prendre en compte l'heure et le temps noté pour chaque intensité testée.

Les heures correspondant au début et à la fin des manipulations correspondant à une intensité donnée peuvent être représentées dans un tableau, sur la première feuille Excel nommée « consignes ». On obtient par exemple un tableau comme ceci :

Tableau 7 : Tableau des conditions expérimentales

I injecté (mm/h)	Heure de début	Heure de fin	Temps d'expérience minimum	Vitesse de pompe (rpm)
10	09:27:45	09:50:09	20	1,1
25	09:50:57	10:11:13	20	2,7
50	10:11:59	10:27:25	15	5,4
100	10:27:52	10:43:18	15	10,7
150	10:43:40	10:54:15	10	15,7
200	10:54:35	10:04:55	10	21,0
300	11:05:12	11:15:40	10	31,4
400	11:16:00	11:26:07	10	41,9
500	11:26:25	11:31:30	5	52,4
600	11:31:38	11:36:43	5	62,9
800	11:36:57	11:42:05	5	83,8

Les données brutes recueillies après une calibration sont composées du temps, de la masse mesurée par la balance au temps t, et des basculements horodatés. Ces données sont placées dans la deuxième feuille du tableur Excel « Données brutes ». L'horodatage est converti en date et heure. On obtient le tableau suivant :

Tableau 8 : Données brutes

Mesure de masse		Mesure des basculements			
Heure (h:min:s)	Mesure balance (g)	ID	Horodatage	Temps TU	Temps France
09:26:03	-7,3	LABO	1606983963	03/12/2020 08:26:03	03/12/2020 09:26:03
09:26:04	-7,3	LABO	1606983963	03/12/2020 08:26:03	03/12/2020 09:26:03
09:26:05	-4,2	LABO	1606983963	03/12/2020 08:26:03	03/12/2020 09:26:03
09:26:06	9,7	LABO	1606983964	03/12/2020 08:26:04	03/12/2020 09:26:04
09:26:07	24,9	LABO	1606983964	03/12/2020 08:26:04	03/12/2020 09:26:04

.....

L'étape suivante consiste à déterminer le premier et le dernier basculement pour chaque intensité testée. Ces derniers sont repérés à partir de l'heure de début et de fin d'expérience notée dans la feuille « Consigne ». On

obtient ainsi le tableau suivant, avec en jaune le premier basculement et en orange le dernier basculement d'une intensité donnée.

Tableau 9 : Repérage des basculements

Horodatage	Temps écoulé (s)	Temps écoulé (min)	Temps TU	Temps France
1606984149	186	3,1	03/12/2020 08:29:09	03/12/2020 09:29:09
1606984239	276	4,6	03/12/2020 08:30:39	03/12/2020 09:30:39
1606984321	358	6,0	03/12/2020 08:32:01	03/12/2020 09:32:01
1606984412	449	7,5	03/12/2020 08:33:32	03/12/2020 09:33:32
1606984502	539	9,0	03/12/2020 08:35:02	03/12/2020 09:35:02
1606984590	627	10,5	03/12/2020 08:36:30	03/12/2020 09:36:30
1606984680	717	12,0	03/12/2020 08:38:00	03/12/2020 09:38:00
1606984772	809	13,5	03/12/2020 08:39:32	03/12/2020 09:39:32
1606984861	898	15,0	03/12/2020 08:41:01	03/12/2020 09:41:01
1606984953	990	16,5	03/12/2020 08:42:33	03/12/2020 09:42:33
1606985043	1080	18,0	03/12/2020 08:44:03	03/12/2020 09:44:03
1606985133	1170	19,5	03/12/2020 08:45:33	03/12/2020 09:45:33
1606985225	1262	21,0	03/12/2020 08:47:05	03/12/2020 09:47:05
1606985315	1352	22,5	03/12/2020 08:48:35	03/12/2020 09:48:35
1606985404	1441	24,0	03/12/2020 08:50:04	03/12/2020 09:50:04

Ensuite, afin de dresser le tableau de calibration permettant par la suite de créer la courbe de calibration, il faut réaliser plusieurs calculs à partir des données brutes. Les étapes suivantes indiquent la marche à suivre :

- Déterminer le temps d'expérience pour chaque intensité du cycle réalisé. Pour cela, faire la différence entre les horodatages du premier et du dernier basculement de chaque intensité.
- Calculer le cumul de masse d'eau pour chaque intensité en faisant la différence de masse indiquée par la balance au premier basculement et au dernier.
- Calculer le débit injecté en ml/s en divisant la masse d'eau calculée par le temps d'expérience, puis convertir ce débit en intensité injectée (mm/h). Pour cela, diviser le débit (ml/s) par la section du collecteur du pluviographe.
- Calculer ensuite l'intensité mesurée en multipliant le nombre de basculement par la résolution de l'augé (0,2 mm) et en divisant par le temps d'expérience.

Le tableau suivant indique les résultats obtenus à partir des calculs effectués :

Tableau 10 : tableau de calcul des intensités injectées et mesurées

Intensité théorique de la pompe (mm/h)	Temps d'expérience (min)	Poids d'eau injecté (g)	Débit injecté (mL/s)	Intensité injectée (mm/h)	Nombre de basculements	Intensité mesurée (mm/h)
10	20,9	72,10	0,1	9,7	15,0	8,6
25	19,0	164,30	0,1	24,3	34,0	21,5
50	15,0	258,30	0,3	48,4	53,0	42,5
100	15,3	523,70	0,6	95,9	105,0	82,3
150	10,5	524,90	0,8	140,6	101,0	115,8
200	10,3	688,00	1,1	187,3	125,0	145,6
300	10,4	1036,50	1,7	279,4	180,0	207,7
400	10,1	1334,40	2,2	370,4	224,0	266,1
500	5,1	848,90	2,8	471,3	136,0	323,2
600	5,1	1028,70	3,4	571,1	160,0	380,2
800	5,1	1425	4,6	778,3	207,0	483,9

A partir des données obtenues on peut ensuite calculer des données d'interprétation permettant d'apporter des informations supplémentaires et de comprendre le fonctionnement des pluviographes. Ces données sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 11 : Données d'interprétation

Erreur relative (%)	Poids d'eau moyen par basculement (g)	Lame d'eau moyenne par basculement (mm)	Temps moyen entre les basculements (s)	Ecart type temps entre basculements (s)	Minimum temps entre basculements (s)	Maximum temps entre basculements (s)
-11,0	4,8	0,22	90	2	82	92
-11,4	4,8	0,23	35	3	29	38
-12,2	4,9	0,23	17	2	13	21
-14,2	5,0	0,23	9	1	7	11
-17,6	5,2	0,24	6	1	5	7
-22,2	5,5	0,26	5	0	4	6
-25,7	5,8	0,27	3	1	3	4
-28,2	6,0	0,28	3	0	2	3
-31,4	6,2	0,29	2	0	2	3
-33,4	6,4	0,30	2	0	1	3
-37,8	6,9	0,32	1	1	1	2

Les calculs sont réalisés en suivant les étapes suivantes :

- L'erreur relative est calculée en divisant par l'intensité injectée, la différence de l'intensité injectée et de l'intensité mesurée. Le résultat est exprimé en pourcentage.
- Le poids d'eau moyen par basculement est obtenu en divisant le poids d'eau par le nombre de basculement.

- La lame d'eau moyenne par basculement est calculée en multipliant le poids d'eau moyen par basculement par la résolution de l'auget (0,2 mm/h) et en divisant le tout par le volume d'un basculement (4,28 ml).
- Le temps moyen entre les basculements est calculé par une simple moyenne des temps entre les basculements.

A partir de ces données on peut ensuite créer une courbe de calibration (Intensité mesurée = f(Intensité injectée)). La résolution de l'auget en fonction de l'intensité injectée est également un graphique intéressant permettant de corriger les intensités mesurées selon une autre méthode que par la courbe de calibration. Enfin le graphique de l'erreur relative en fonction de l'intensité injectée est créé. Il permet aussi la correction des intensités mesurées à partir d'une autre correction mathématique.

**ANNEXE 8 : Résultats de la calibration de la pompe péristaltique**

Calibration de la pompe				
Vitesse de pompe (rpm)	Masse d'eau (g)	Temps d'expérience (s)	Débit moyen (ml/s)	Intensité moyenne (mm/h)
0,5	7,4	300	0,02	4,15
1	16,0	300	0,05	8,97
2	32,0	300	0,11	17,94
3	46,6	300	0,16	26,13
4	64,2	300	0,21	36,00
5	80,9	300	0,27	45,36
6	97,1	300	0,32	54,45
7	113,0	300	0,38	63,36
8	129,8	300	0,43	72,79
9	145,7	300	0,49	81,70
10	161,8	300	0,54	90,73
15	242,7	300	0,81	136,09
20	319,4	300	1,06	179,10
25	404,2	300	1,35	226,65
30	482,9	300	1,61	270,79
35	561,4	300	1,87	314,80
40	641,8	300	2,14	359,89
45	722,9	300	2,41	405,36
50	802,3	300	2,67	449,89
55	896,9	300	2,99	502,93
60	980,6	300	3,27	549,87
65	1066,8	300	3,56	598,21
70	1118,6	300	3,73	627,25
75	1258,4	300	4,19	705,64
80	1360,5	300	4,54	762,90
85	1425,0	300	4,75	799,07
90	1514,1	300	5,05	849,03
95	1588,9	300	5,30	890,97
100	1683,3	300	5,61	943,91
110	1878,7	300	6,26	1053,48
120	2098,1	300	6,99	1176,50
130	2307,8	300	7,69	1294,09
140	2469,6	300	8,23	1384,82
150	2623,8	300	8,75	1471,29
160	2792,3	300	9,31	1565,78
170	2944,4	300	9,81	1651,07
180	3081,2	300	10,27	1727,78
190	3219,9	300	10,73	1805,55
200	3393,1	300	11,31	1902,67
220	3737,3	300	12,46	2095,68
240	4091,5	300	13,64	2294,30
260	4446,9	300	14,82	2493,59
280	4725,3	300	15,75	2649,70
300	5054,2	300	16,85	2834,13
350	5852,4	300	19,51	3281,72

**ANNEXE 9 : Tests de la précision de la seringue**

<b>Volume prélevé seringue (ml)</b>	<b>masse mesurée (g)</b>
4,28	4,32
4,28	4,24
4,28	4,28
4,28	4,32
4,28	4,27
4,28	4,28
4,28	4,3
4,28	4,26
4,28	4,28
4,28	4,28
4,28	4,32
4,28	4,29
4,28	4,27
4,28	4,3
4,28	4,3
4,28	4,33
4,28	4,29
4,28	4,27
4,28	4,27
4,28	4,28
4,28	4,25
4,28	4,3
4,28	4,26
4,28	4,31
4,28	4,28
4,28	4,3
4,28	4,26
4,28	4,26
4,28	4,28
4,28	4,31

<b>Moyenne (g)</b>	4,285
<b>Ecart type (g)</b>	0,02
<b>Coefficient de variation (%)</b>	0,53
<b>Max (g)</b>	4,33
<b>Min (g)</b>	4,24

**ANNEXE 10 : Comparaison des deux méthodes de détection des basculements**

Calibration du pluviographe n°5 avec enregistrement des basculements											
Conditions opératoires			Mesure de la pluie injectée			Mesure de la pluie enregistrée par le pluviographe		Résultats d'interprétation			
Cycles	Intensité théorique de la pompe (mm/h)	Temps d'expérience (min)	Poids d'eau injecté (g)	Débit injecté (mL/s)	Intensité injectée (mm/h)	Nombre de basculements	Intensité mesurée (mm/h)	Erreur relative (%)	Poids d'eau moyen par basculement (g)	Lame d'eau moyenne par basculement (mm)	Temps moyen entre les basculements (s)
Cyle n°1	10	19,52	67,20	0,1	9,7	17	10,5	8,3	4,0	0,18	73,0
	25	23,60	203,70	0,1	24,2	47	23,9	-1,2	4,3	0,20	31,0
	50	15,43	266,00	0,3	48,3	60	46,7	-3,5	4,4	0,21	16,0
	100	16,57	576,90	0,6	97,6	121	87,6	-10,2	4,8	0,22	8,0
	150	10,78	549,40	0,8	142,8	110	122,4	-14,3	5,0	0,23	6,0
	200	10,62	724,10	1,1	191,2	137	154,9	-19,0	5,3	0,25	5,0
	300	11,08	1123,50	1,7	284,2	201	217,6	-23,4	5,6	0,26	3,0
	400	11,38	1529,50	2,2	376,7	267	281,5	-25,3	5,7	0,27	3,0
	500	5,60	959,20	2,9	480,2	160	342,9	-28,6	6,0	0,28	2,0
600	5,32	1095,20	3,4	577,6	175	395,0	-31,6	6,3	0,29	2,0	

Calibration du pluviographe n°5 sans enregistrement des basculements											
Conditions opératoires			Mesure de la pluie injectée			Mesure de la pluie enregistrée par le pluviographe		Résultats d'interprétation			
Cycles	Intensité théorique de la pompe (mm/h)	Temps d'expérience (min)	Poids d'eau injecté (g)	Débit injecté (mL/s)	Intensité injectée (mm/h)	Nombre de basculements	Intensité mesurée (mm/h)	Erreur relative (%)	Poids d'eau moyen par basculement (g)	Lame d'eau moyenne par basculement (mm)	Temps moyen entre les basculements (s)
Cyle n°1	10	18,30	63,50	0,1	9,7	17	11,1	14,6	3,7	0,17	68
	25	23,15	200,60	0,1	24,3	46	23,8	-1,9	4,4	0,20	31
	50	15,13	264,60	0,3	49,0	59	46,8	-4,6	4,5	0,21	16
	100	16,43	572,00	0,6	97,6	121	88,4	-9,5	4,7	0,22	8
	150	10,68	544,80	0,8	143,0	109	122,4	-14,4	5,0	0,23	6
	200	10,57	717,50	1,1	190,4	135	153,3	-19,5	5,3	0,25	5
	300	11,05	1118,80	1,7	283,9	200	217,2	-23,5	5,6	0,26	3
	400	11,33	1523,20	2,2	376,8	266	281,6	-25,3	5,7	0,27	3
	500	5,57	953,70	2,9	480,3	158	340,6	-29,1	6,0	0,28	2
600	5,40	1108,40	3,4	575,5	178	395,6	-31,3	6,2	0,29	2	

	Différence intensité injectée (mm/h)			Différence intensité mesurée (mm/h)			Différence de temps moyen entre les basculements (s)		
	-0,1			-0,7			4,6		
	-0,1			0,1			0,2		
	-0,7			-0,1			0,3		
	0,0			-0,7			-0,2		
	-0,1			0,0			0,1		
	0,8			1,5			0,3		
	0,3			0,4			-0,3		
	-0,1			-0,2			0,4		
	-0,1			2,3			-0,1		
	2,1			-0,6			0,2		
<b>Moyenne</b>	<b>0,2</b>			<b>0,2</b>			<b>0,5</b>		
<b>Min</b>	<b>-0,7</b>			<b>-0,7</b>			<b>-0,3</b>		
<b>Max</b>	<b>2,1</b>			<b>2,3</b>			<b>4,6</b>		

**ANNEXE 11 : Synthèse de la calibration des 12 pluviographes**

Calibration des 12 pluviographes														
Conditions opératoires			Mesure de la pluie injectée			Mesure de la pluie enregistrée par le pluviographe		Résultats d'interprétation						
Cycles	Intensité théorique de la pompe (mm/h)	Temps d'expérience (min)	Poids d'eau injecté (g)	Débit injecté (mL/s)	Intensité injectée (mm/h)	Nombre de basculements	Intensité mesurée (mm/h)	Erreur relative (%)	Poids d'eau moyen par basculement (g)	Lame d'eau moyenne par basculement (mm)	Temps moyen entre les basculements (s)	Ecart type temps entre basculements (s)	Minimum temps entre basculements (s)	Maximum temps entre basculements (s)
<b>P1</b>	10	15,7	56,2	0,1	10	14	11	6,6	4,0	0,19	73,3	14,3	57,0	96,0
	25	18,7	178,8	0,2	27	41	26	-1,9	4,4	0,20	27,9	4,6	22,0	34,0
	50	14,2	252,3	0,3	50	57	48	-3,3	4,4	0,21	15,1	2,3	11,0	19,0
	100	14,9	503,8	0,6	95	101	81	-14,2	5,0	0,23	8,8	1,5	6,0	17,0
	150	9,5	474,1	0,8	140	87	110	-21,5	5,4	0,25	6,6	0,6	5,0	8,0
	200	9,7	601,6	1,0	174	107	133	-23,9	5,6	0,26	5,5	0,5	5,0	7,0
	300	9,8	928,4	1,6	267	162	199	-25,3	5,7	0,27	3,7	0,6	2,0	6,0
	400	9,8	1244,6	2,1	355	214	262	-26,4	5,8	0,27	2,8	0,5	2,0	4,0
	500	4,9	763,8	2,6	440	129	318	-27,7	5,9	0,28	2,3	0,5	1,0	4,0
	600	4,9	932,6	3,2	534	148	362	-32,1	6,3	0,29	2,0	0,4	1,0	3,0
<b>P2</b>	10	16,4	63,7	0,1	11	16	12	7,5	4,0	0,19	64,9	9,0	54,0	79,0
	25	18,7	186,2	0,2	28	44	28	1,1	4,2	0,20	26,2	3,3	21,0	32,0
	50	14,2	262,2	0,3	52	59	50	-3,7	4,4	0,21	14,7	2,0	12,0	18,0
	100	14,5	515,4	0,6	100	111	92	-7,8	4,6	0,22	7,9	0,9	6,0	10,0
	150	9,5	509,2	0,9	150	102	128	-14,3	5,0	0,23	5,7	0,7	4,0	7,0
	200	9,8	655,1	1,1	188	127	156	-17,0	5,2	0,24	4,7	0,6	3,0	6,0
	300	9,8	986,2	1,7	283	179	220	-22,3	5,5	0,26	3,3	0,5	2,0	5,0
	400	9,8	1319,8	2,2	376	224	273	-27,4	5,9	0,28	2,7	0,5	2,0	4,0
	500	4,9	799,1	2,7	459	133	327	-28,8	6,0	0,28	2,2	0,4	2,0	3,0
	600	4,9	959,0	3,3	551	156	383	-30,4	6,1	0,29	1,9	0,5	1,0	4,0
<b>P3</b>	10	16,8	67,3	0,1	11	20	14	27,2	3,4	0,16	53,5	8,8	42,0	81,0
	25	18,6	182,4	0,2	27	50	32	17,3	3,6	0,17	22,8	3,6	18,0	31,0
	50	14,3	260,1	0,3	51	69	58	13,5	3,8	0,18	12,6	1,6	9,0	17,0
	100	14,6	514,4	0,6	99	131	108	9,0	3,9	0,18	6,7	0,8	6,0	9,0
	150	9,6	507,4	0,9	148	123	153	3,8	4,1	0,19	4,8	0,7	4,0	7,0
	200	9,8	648,7	1,1	185	153	187	0,9	4,2	0,20	3,9	0,6	3,0	5,0
	300	9,8	978,8	1,7	280	215	263	-6,0	4,6	0,21	2,8	0,5	2,0	4,0
	400	9,9	1310,4	2,2	372	255	310	-16,7	5,1	0,24	2,3	0,5	1,0	4,0
	500	4,9	794,1	2,7	456	140	344	-24,5	5,7	0,27	2,1	0,4	1,0	3,0
	600	4,9	949,6	3,2	545	160	393	-27,9	5,9	0,28	1,8	0,4	1,0	3,0
<b>P4</b>	10	16,3	58,2	0,1	10	16	12	17,7	3,6	0,17	64,8	9,8	52,0	82,0
	25	18,9	181,4	0,2	27	47	30	10,9	3,9	0,18	24,7	3,1	21,0	30,0
	50	14,1	251,1	0,3	50	62	53	5,7	4,1	0,19	13,8	1,9	11,0	18,0
	100	14,6	502,7	0,6	97	115	95	-2,1	4,4	0,20	7,7	1,0	6,0	10,0

	150	9,6	497,2	0,9	145	105	131	-9,6	4,7	0,22	5,5	0,7	4,0	7,0
	200	9,7	634,2	1,1	183	130	160	-12,3	4,9	0,23	4,5	0,6	3,0	6,0
	300	9,8	959,9	1,6	275	189	231	-15,7	5,1	0,24	3,1	0,6	2,0	5,0
	400	9,8	1290,2	2,2	367	231	281	-23,4	5,6	0,26	2,6	0,5	2,0	4,0
	500	4,8	774,4	2,7	448	132	327	-27,0	5,9	0,27	2,2	0,4	2,0	3,0
	600	4,9	937,5	3,2	536	158	387	-27,9	5,9	0,28	1,9	0,4	1,0	3,0
<b>P5</b>	10	19,5	67,2	0,1	10	17	10	8,3	4,0	0,18	72,8	7,4	59,0	85,0
	25	23,6	203,7	0,1	24	47	24	-1,2	4,3	0,20	0,0	0,0	0,0	0,0
	50	15,4	266,0	0,3	48	60	47	-3,5	4,4	0,21	0,0	0,0	0,0	0,0
	100	16,6	576,9	0,6	98	121	88	-10,2	4,8	0,22	0,0	0,0	0,0	0,0
	150	10,8	549,4	0,8	143	110	122	-14,3	5,0	0,23	0,0	0,0	0,0	0,0
	200	10,6	724,1	1,1	191	137	155	-19,0	5,3	0,25	0,0	0,0	0,0	0,0
	300	11,1	1123,5	1,7	284	201	218	-23,4	5,6	0,26	0,0	0,0	0,0	0,0
	400	11,4	1529,5	2,2	377	267	281	-25,3	5,7	0,27	0,0	0,0	0,0	0,0
	500	5,6	959,2	2,9	480	160	343	-28,6	6,0	0,28	0,0	0,0	0,0	0,0
	600	5,3	1095,2	3,4	578	175	395	-31,6	6,3	0,29	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>P6</b>	10	18,4	63,6	0,1	10	16	10	7,7	4,0	0,19	74,5	12,0	59,0	90,0
	25	20,4	175,6	0,1	24	44	26	7,2	4,0	0,19	28,5	2,1	24,0	34,0
	50	15,0	259,9	0,3	48	62	49	2,1	4,2	0,20	14,8	1,0	13,0	19,0
	100	15,4	524,9	0,6	96	121	95	-1,3	4,3	0,20	7,7	0,8	6,0	10,0
	150	10,2	492,7	0,8	136	109	129	-5,3	4,5	0,21	5,6	0,7	4,0	7,0
	200	10,2	682,6	1,1	188	141	166	-11,6	4,8	0,23	4,4	0,5	3,0	5,0
	300	10,2	1020,6	1,7	281	198	233	-17,0	5,2	0,24	3,1	0,5	1,0	5,0
	400	10,2	1354,6	2,2	373	244	288	-22,9	5,6	0,26	2,5	0,5	2,0	3,0
	500	5,2	872,8	2,8	469	148	340	-27,4	5,9	0,28	2,1	0,4	1,0	3,0
	600	5,2	1068,2	3,4	572	170	390	-31,9	6,3	0,29	1,9	0,4	1,0	3,0
<b>P7</b>	10	19,5	68,2	0,1	10	17	10	6,7	4,0	0,19	73,2	10,0	54,0	90,0
	25	20,3	174,8	0,1	24	41	24	0,4	4,3	0,20	30,3	3,8	23,0	36,0
	50	15,2	261,9	0,3	48	59	47	-3,6	4,4	0,21	15,7	1,8	12,0	19,0
	100	16,1	551,0	0,6	96	117	87	-9,1	4,7	0,22	8,3	1,1	6,0	10,0
	150	10,4	520,0	0,8	141	106	123	-12,8	4,9	0,23	5,9	0,7	5,0	8,0
	200	10,9	726,8	1,1	188	140	155	-17,6	5,2	0,24	4,7	0,5	4,0	6,0
	300	10,1	1012,4	1,7	280	184	218	-22,2	5,5	0,26	3,3	0,5	3,0	4,0
	400	10,3	1368,3	2,2	372	229	267	-28,4	6,0	0,28	2,7	0,5	2,0	3,0
	500	5,3	882,1	2,8	470	143	326	-30,6	6,2	0,29	2,2	0,4	2,0	3,0
	600	5,2	1054,6	3,4	574	163	380	-33,8	6,5	0,30	1,9	0,3	1,0	3,0
<b>P8</b>	10	18,2	62,0	0,1	10	16,00	11	10,5	3,9	0,18	68,2	16,4	28,0	87,0
	25	20,0	170,7	0,1	24	41,00	25	2,8	4,2	0,19	27,6	6,5	13,0	36,0
	50	15,6	269,6	0,3	49	61,00	47	-3,2	4,4	0,21	14,9	2,8	7,0	18,0
	100	15,3	522,5	0,6	96	113,00	89	-7,4	4,6	0,22	8,0	1,1	5,0	10,0
	150	10,2	510,7	0,8	141	105,00	124	-12,0	4,9	0,23	5,7	0,8	4,0	7,0
	200	10,2	680,2	1,1	188	137,00	162	-13,8	5,0	0,23	4,3	0,7	2,0	6,0

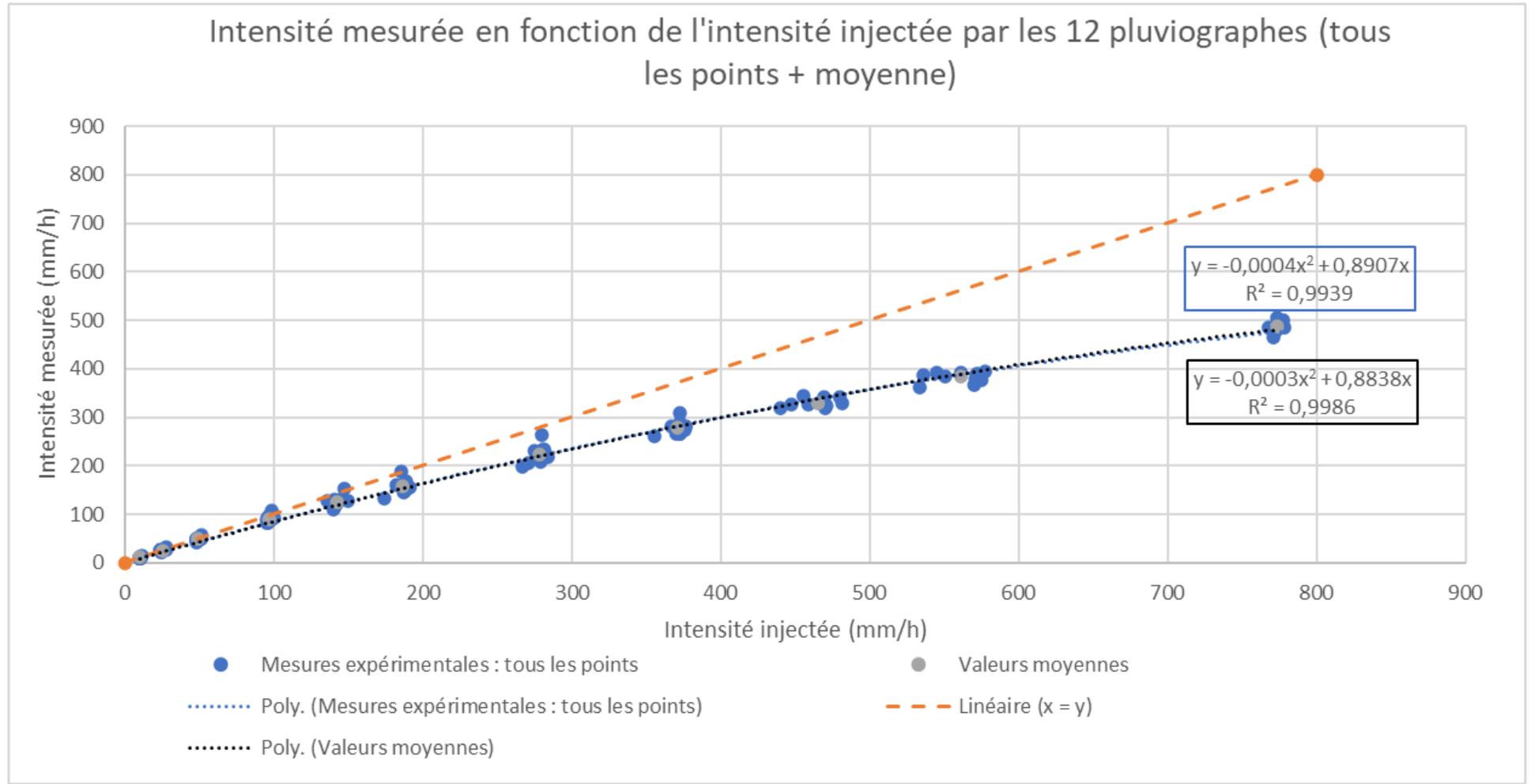
	300	10,2	1021,1	1,7	280	190,00	223	-20,4	5,4	0,25	3,2	0,5	2,0	4,0
	400	10,3	1370,2	2,2	373	239,0	278	-25,3	5,7	0,27	2,6	0,5	2,0	3,0
	500	5,2	860,5	2,8	468	140,00	326	-30,4	6,1	0,29	2,1	0,4	1,0	3,0
	600	5,6	1155,7	3,4	575	177,00	377	-34,5	6,5	0,31	1,8	0,4	1,0	2,0
	800	5,3	1466,5	4,6	771	207,00	466	-39,6	7,1	0,33	1,8	0,4	1,0	2,0
<b>P9</b>	10	18,5	63,2	0,1	10	16	10	8,4	4,0	0,18	74,1	5,2	67,0	86,0
	25	19,7	174,5	0,1	25	40	24	-1,9	4,4	0,20	30,4	2,6	25,0	35,0
	50	15,1	260,6	0,3	49	60	48	-1,5	4,3	0,20	15,3	1,2	13,0	18,0
	100	15,2	520,1	0,6	96	108	85	-11,1	4,8	0,23	8,5	0,8	7,0	10,0
	150	10,5	529,9	0,8	141	102	116	-17,6	5,2	0,24	6,3	0,7	5,0	7,0
	200	10,2	684,4	1,1	188	126	148	-21,2	5,4	0,25	4,9	0,5	4,0	6,0
	300	10,5	1010,4	1,6	271	180	207	-23,8	5,6	0,26	3,4	0,5	3,0	4,0
	400	10,4	1381,6	2,2	372	231	267	-28,4	6,0	0,28	2,7	0,5	2,0	3,0
	500	5,3	880,1	2,8	470	139	318	-32,4	6,3	0,30	2,3	0,5	2,0	3,0
	600	5,3	1081,2	3,4	570	163	368	-35,5	6,6	0,31	2,0	0,3	1,0	3,0
	800	5,3	1464,9	4,6	773	212	478	-38,1	6,9	0,32	1,5	0,5	1,0	2,0
<b>P10</b>	10	20,9	72,1	0,1	10	15,0	9	-11,0	4,8	0,22	89,6	2,4	82,0	92,0
	25	19,0	164,3	0,1	24	34,0	22	-11,4	4,8	0,23	34,6	2,8	29,0	38,0
	50	15,0	258,3	0,3	48	53,0	42	-12,2	4,9	0,23	17,3	2,3	13,0	21,0
	100	15,3	523,7	0,6	96	105,0	82	-14,2	5,0	0,23	8,8	0,8	7,0	11,0
	150	10,5	524,9	0,8	141	101,0	116	-17,6	5,2	0,24	6,3	0,6	5,0	7,0
	200	10,3	688,0	1,1	187	125,0	146	-22,2	5,5	0,26	5,0	0,4	4,0	6,0
	300	10,4	1036,5	1,7	279	180,0	208	-25,7	5,8	0,27	3,5	0,5	3,0	4,0
	400	10,1	1334,4	2,2	370	224,0	266	-28,2	6,0	0,28	2,7	0,5	2,0	3,0
	500	5,1	848,9	2,8	471	136,0	323	-31,4	6,2	0,29	2,2	0,4	2,0	3,0
	600	5,1	1028,7	3,4	571	160,0	380	-33,4	6,4	0,30	1,9	0,3	1,0	3,0
	800	5,1	1425,0	4,6	778	207,0	484	-37,8	6,9	0,32	1,5	0,5	1,0	2,0
<b>P11</b>	10	20,5	75,8	0,1	10	18	11	1,6	4,2	0,20	73,1	5,2	62,0	88,0
	25	20,1	173,7	0,1	24	39	23	-3,9	4,5	0,21	31,7	2,1	27,0	36,0
	50	15,3	264,1	0,3	48	59	46	-4,4	4,5	0,21	15,8	1,2	12,0	18,0
	100	15,4	524,2	0,6	96	115	90	-6,1	4,6	0,21	8,1	0,6	6,0	10,0
	150	10,4	519,1	0,8	140	109	126	-10,1	4,8	0,22	5,8	0,5	5,0	7,0
	200	10,6	712,2	1,1	188	140	158	-15,9	5,1	0,24	4,6	0,5	4,0	5,0
	300	10,3	1033,3	1,7	281	190	221	-21,3	5,4	0,25	3,3	0,5	2,0	4,0
	400	10,3	1360,7	2,2	372	234	274	-26,4	5,8	0,27	2,6	0,5	2,0	3,0
	500	5,4	892,9	2,9	481	147	330	-31,5	6,1	0,28	2,2	0,4	2,0	3,0
	600	5,2	1053,9	3,3	561	170	392	-30,1	6,2	0,29	1,8	0,4	1,0	2,0
	800	5,3	1459,9	4,6	777	220	501	-35,5	6,6	0,31	1,4	0,5	1,0	2,0
<b>P12</b>	10	20,8	72,9	0,1	10	18	10	5,7	4,1	0,19	73,6	7,7	59,0	84,0
	25	20,0	171,5	0,1	24	42	25	4,8	4,1	0,19	29,2	2,4	24,0	33,0
	50	15,1	260,6	0,3	48	63	50	3,5	4,1	0,19	14,5	1,8	12,0	18,0
	100	15,1	521,0	0,6	97	116	92	-4,7	4,5	0,21	7,9	0,8	6,0	10,0
	150	10,5	528,8	0,8	141	113	129	-8,5	4,7	0,22	5,6	0,6	4,0	7,0
	200	10,3	691,7	1,1	189	145	169	-10,3	4,8	0,22	4,3	0,5	3,0	5,0

	300	10,3	1034,8	1,7	281	200	233	-17,3	5,2	0,24	3,1	0,5	2,0	4,0
	400	10,3	1372,2	2,2	372	246	286	-23,3	5,6	0,26	2,5	0,5	2,0	3,0
	500	5,3	882,3	2,8	470	149	339	-27,7	5,9	0,28	2,1	0,4	1,0	3,0
	600	5,2	1067,6	3,4	572	170	390	-31,8	6,3	0,29	1,9	0,4	1,0	3,0
	800	5,2	1425,6	4,6	774	218	506	-34,6	6,5	0,31	1,4	0,5	1,0	2,0
<b>Moyenne</b>	10	18,5	65,9	0,1	10	16,6	11	8,1	4,0	0,19	71,3	9,0	56,3	86,7
	25	19,8	178,1	0,2	25	42,5	26	2,0	4,2	0,20	26,2	3,1	20,6	31,3
	50	14,9	260,6	0,3	49	60,3	49	-0,9	4,3	0,20	13,7	1,7	10,4	16,9
	100	15,2	525,1	0,6	97	114,5	90	-6,6	4,6	0,22	7,4	0,9	5,6	9,8
	150	10,1	513,6	0,8	142	106,0	126	-11,7	4,9	0,23	5,3	0,6	4,1	6,6
	200	10,2	677,5	1,1	186	134,0	158	-15,3	5,1	0,24	4,2	0,5	3,2	5,3
	300	10,2	1012,2	1,7	278	189,0	223	-20,0	5,4	0,25	3,0	0,5	2,0	4,1
	400	10,2	1353,0	2,2	371	236,5	278	-25,2	5,7	0,27	2,4	0,4	1,8	3,1
	500	5,1	850,9	2,8	465	141,3	330	-29,0	6,0	0,28	2,0	0,4	1,4	2,8
	600	5,1	1032,0	3,3	562	164,2	383	-31,7	6,3	0,29	1,7	0,3	0,9	2,7
	800	5,2	1445,7	4,6	773	212,5	487	-37,1	6,8	0,32	1,5	0,5	1,0	2,0

**ANNEXE 12 : Ecart-type et extremums pour chaque intensité de pluie testée**

Intensité injectée							Intensité mesurée							
Moyen ne	Ecart- type	Min	Max	Coef de variation	Moyenne - écart type	Moyenne + écart type	Moyen ne	Ecar t- type	Min	Max	Coef de variation	Moyenne - écart type	Moyenne + écart type	
10,0	0,6	9,5	11,3	5,5	9,5	10,6	10,9	1,3	8,6	14,3	12,4	9,5	12,2	
25,3	1,5	23,9	27,9	6,1	23,7	26,8	25,8	3,0	21,5	32,2	11,6	22,8	28,8	
49,2	1,2	48,3	51,6	2,4	48,0	50,4	48,8	3,9	42,5	58,0	7,9	44,9	52,7	
96,6	1,4	94,9	99,8	1,4	95,2	98,0	90,3	6,9	81,4	107,5	7,7	83,4	97,2	
142,2	3,7	136,1	149,8	2,6	138,5	145,9	125,7	10,8	110,1	153,2	8,6	114,9	136,4	
186,4	4,3	174,2	191,2	2,3	182,1	190,7	157,9	13,4	132,6	187,0	8,5	144,5	171,3	
278,4	5,1	266,5	284,2	1,8	273,3	283,6	222,7	16,5	199,0	262,8	7,4	206,2	239,2	
371,1	5,4	355,5	376,7	1,5	365,6	376,5	277,7	13,2	261,6	310,1	4,8	264,5	290,9	
465,2	12,4	440,0	481,4	2,7	452,8	477,6	330,1	9,3	317,7	344,0	2,8	320,8	339,4	
561,6	15,9	533,6	577,6	2,8	545,7	577,5	383,1	10,2	362,4	395,0	2,7	372,9	393,4	
773,3	4,0	767,5	778,3	0,5	769,3	777,4	486,6	15,0	465,7	506,3	3,1	471,6	501,6	

**ANNEXE 13 : Graphique comparatif des deux courbes de calibration uniques**



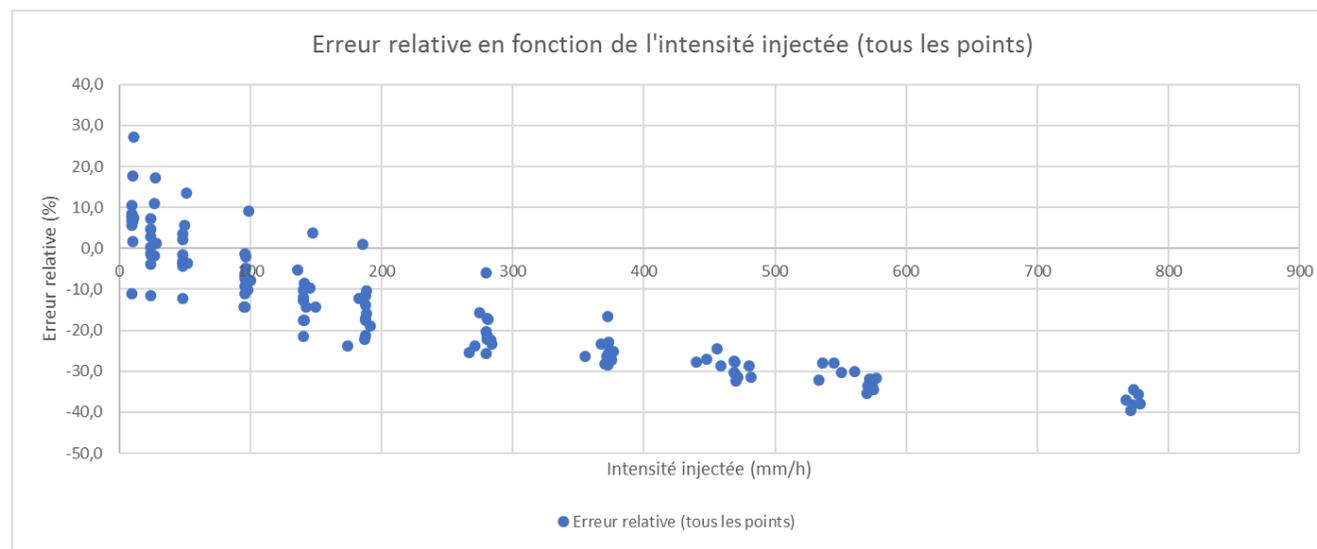
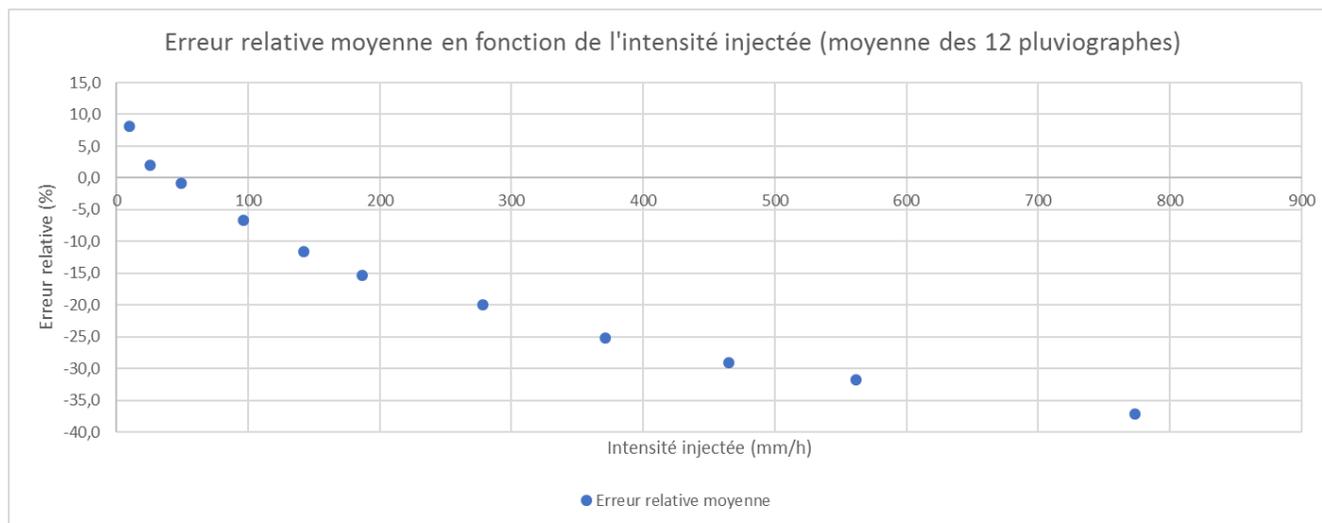
**ANNEXE 14 : calculs des SCE et des moyennes des résidus pour le choix de la courbe de calibration unique**

<b>Ajustement polynomiale valeurs moyennes</b>				<b>Ajustement polynomiale tous les points</b>			
<b>Equation</b>	<b><math>y = -0,0003x^2 + 0,8838x</math></b>			<b>Equation</b>	<b><math>y = -0,0004x^2 + 0,8838x</math></b>		
<b>Coefficients</b>	<b>a</b>	<b>-0,0003</b>		<b>Coefficients</b>	<b>a</b>	<b>-0,0004</b>	
	<b>b</b>	<b>0,8838</b>			<b>b</b>	<b>0,8907</b>	
<b>Ajustement</b>	<b>Expérience</b>	<b>Résidus</b>	<b>Résidus<sup>2</sup></b>	<b>Ajustement</b>	<b>Expérience</b>	<b>Résidus</b>	<b>Résidus<sup>2</sup></b>
8,9	10,7	1,9	3,5	8,9	10,7	1,8	3,3
23,5	26,4	2,8	8,1	23,7	26,4	2,7	7,4
43,4	48,3	4,9	24,1	43,5	48,3	4,8	23,1
81,2	81,4	0,3	0,1	80,9	81,4	0,5	0,3
118,0	110,1	-7,9	62,4	117,0	110,1	-6,9	47,6
144,8	132,6	-12,2	150,0	143,0	132,6	-10,4	108,5
214,2	199,0	-15,2	230,9	209,0	199,0	-9,9	98,6
276,3	261,6	-14,7	214,9	266,1	261,6	-4,5	20,1
330,8	318,1	-12,7	162,1	314,5	318,1	3,6	12,9
386,2	362,4	-23,7	563,7	361,4	362,4	1,1	1,1
9,6	11,7	2,1	4,5	9,7	11,7	2,1	4,2
24,4	28,2	3,8	14,4	24,6	28,2	3,7	13,5
44,8	49,7	4,9	24,0	44,9	49,7	4,8	23,1
85,2	92,0	6,8	45,9	84,9	92,0	7,1	50,2
125,6	128,4	2,8	7,7	124,4	128,4	4,0	15,8
155,4	155,8	0,4	0,2	153,1	155,8	2,7	7,0
226,2	219,9	-6,2	38,9	220,1	219,9	-0,2	0,0
289,7	272,9	-16,8	281,8	278,2	272,9	-5,3	27,7
342,3	326,8	-15,5	240,6	324,5	326,8	2,4	5,6
395,7	383,3	-12,3	152,0	369,2	383,3	14,2	201,3
9,9	14,3	4,4	19,4	10,0	14,3	4,3	18,8
24,1	32,2	8,2	66,9	24,2	32,2	8,1	65,0
44,4	58,0	13,6	186,2	44,5	58,0	13,6	183,7
84,3	107,5	23,3	541,2	84,0	107,5	23,6	554,9
124,0	153,2	29,2	855,2	122,8	153,2	30,4	924,5
153,4	187,0	33,6	1127,7	151,3	187,0	35,7	1277,0
223,6	262,8	39,2	1536,1	217,7	262,8	45,1	2032,1
287,5	310,1	22,6	512,3	276,2	310,1	33,9	1151,3
340,6	344,0	3,4	11,8	322,9	344,0	21,1	444,4
392,7	393,2	0,5	0,2	366,7	393,2	26,5	700,0
8,8	11,8	3,0	8,7	8,9	11,8	2,9	8,4
23,5	29,8	6,3	39,3	23,7	29,8	6,2	37,9
43,5	52,9	9,4	88,5	43,6	52,9	9,3	86,8
82,6	94,6	12,0	144,3	82,3	94,6	12,3	150,8
122,0	131,3	9,2	85,4	120,9	131,3	10,3	107,0
151,4	160,3	8,8	78,0	149,4	160,3	10,9	118,9
220,1	231,4	11,3	128,6	214,4	231,4	17,0	288,6

284,1	281,4	-2,7	7,2	273,2	281,4	8,3	68,3
335,5	326,6	-8,9	79,8	318,6	326,6	8,0	64,3
387,8	386,9	-0,8	0,7	362,7	386,9	24,2	587,8
8,5	10,5	1,9	3,8	8,6	10,5	1,9	3,6
21,2	23,9	2,7	7,2	21,3	23,9	2,6	6,6
42,0	46,7	4,6	21,6	42,1	46,7	4,5	20,7
83,4	87,6	4,2	17,8	83,1	87,6	4,5	20,2
120,1	122,4	2,3	5,2	119,1	122,4	3,3	11,1
158,0	154,9	-3,2	10,1	155,7	154,9	-0,8	0,7
227,0	217,6	-9,3	87,0	220,8	217,6	-3,2	10,3
290,4	281,5	-8,9	79,3	278,8	281,5	2,7	7,2
355,2	342,9	-12,4	153,5	335,5	342,9	7,4	54,2
410,4	395,0	-15,4	236,7	381,0	395,0	14,0	195,6
8,5	10,4	1,9	3,6	8,6	10,4	1,8	3,4
21,2	25,9	4,7	22,3	21,3	25,9	4,6	21,3
42,1	49,5	7,4	54,1	42,2	49,5	7,3	52,7
82,0	94,6	12,6	159,2	81,7	94,6	12,9	165,7
114,7	128,9	14,1	199,9	113,8	128,9	15,1	226,6
155,5	166,2	10,7	113,4	153,3	166,2	12,9	166,0
224,3	232,9	8,6	74,2	218,4	232,9	14,5	211,6
287,9	287,5	-0,4	0,1	276,6	287,5	11,0	120,4
348,6	340,4	-8,1	66,0	329,8	340,4	10,6	113,3
407,5	389,8	-17,7	314,1	378,7	389,8	11,1	122,7
8,6	10,5	1,8	3,3	8,7	10,5	1,8	3,1
21,2	24,3	3,1	9,5	21,3	24,3	3,0	8,8
42,1	46,7	4,6	21,2	42,2	46,7	4,5	20,3
82,1	87,3	5,2	26,7	81,9	87,3	5,4	29,5
118,4	122,7	4,3	18,8	117,4	122,7	5,3	28,6
155,4	154,8	-0,6	0,3	153,2	154,8	1,7	2,8
224,0	217,9	-6,1	37,6	218,1	217,9	-0,2	0,0
287,6	266,8	-20,8	431,3	276,3	266,8	-9,5	89,6
348,9	325,8	-23,0	531,2	330,1	325,8	-4,2	17,9
408,5	379,8	-28,7	825,3	379,5	379,8	0,3	0,1
501,6	483,8	-17,8	315,4	448,0	483,8	35,8	1284,8
8,4	10,5	2,1	4,5	8,5	10,5	2,1	4,3
21,0	24,6	3,6	13,1	21,1	24,6	3,5	12,4
42,2	47,0	4,8	23,1	42,3	47,0	4,7	22,2
82,0	88,8	6,8	45,9	81,8	88,8	7,0	49,5
118,3	123,7	5,4	29,1	117,3	123,7	6,4	41,0
155,5	162,0	6,5	42,3	153,2	162,0	8,7	76,3
223,8	222,8	-1,0	0,9	217,9	222,8	4,9	24,2
287,9	278,4	-9,5	89,5	276,6	278,4	1,9	3,5
348,2	326,2	-22,0	483,1	329,5	326,2	-3,3	10,7
409,1	377,0	-32,1	1028,0	380,0	377,0	-2,9	8,7
503,1	465,7	-37,3	1391,5	448,9	465,7	16,8	282,7
8,4	10,4	1,9	3,8	8,5	10,4	1,9	3,5

21,8	24,4	2,6	6,8	21,9	24,4	2,5	6,2
42,2	47,8	5,6	31,8	42,3	47,8	5,5	30,7
82,2	85,5	3,2	10,6	81,9	85,5	3,5	12,3
118,7	116,2	-2,5	6,2	117,7	116,2	-1,5	2,2
155,4	148,0	-7,4	55,0	153,2	148,0	-5,2	26,9
217,5	206,7	-10,8	117,6	212,1	206,7	-5,4	28,8
287,6	266,5	-21,0	442,2	276,3	266,5	-9,7	94,6
349,1	317,7	-31,4	986,6	330,3	317,7	-12,6	157,8
406,4	367,9	-38,5	1481,3	377,8	367,9	-9,9	98,3
503,7	478,5	-25,2	636,0	449,4	478,5	29,1	848,5
8,5	8,6	0,1	0,0	8,6	8,6	0,0	0,0
21,3	21,5	0,2	0,0	21,4	21,5	0,1	0,0
42,1	42,5	0,4	0,2	42,2	42,5	0,3	0,1
82,0	82,3	0,3	0,1	81,7	82,3	0,6	0,3
118,3	115,8	-2,5	6,5	117,3	115,8	-1,5	2,4
155,0	145,6	-9,4	87,7	152,8	145,6	-7,1	51,1
223,5	207,7	-15,8	251,0	217,7	207,7	-10,0	99,3
286,2	266,1	-20,1	403,2	275,1	266,1	-8,9	79,5
349,9	323,2	-26,7	714,6	330,9	323,2	-7,8	60,4
406,9	380,2	-26,7	713,4	378,2	380,2	2,0	3,9
506,1	483,9	-22,2	494,8	450,9	483,9	33,0	1086,5
9,2	10,6	1,4	2,0	9,2	10,6	1,3	1,8
21,2	23,3	2,0	4,2	21,3	23,3	1,9	3,8
42,1	46,3	4,2	17,7	42,2	46,3	4,1	16,8
81,7	89,7	8,0	64,1	81,4	89,7	8,3	68,3
118,2	126,2	8,0	64,1	117,2	126,2	9,0	81,2
155,8	158,5	2,6	7,0	153,6	158,5	4,9	24,0
224,5	221,0	-3,5	12,4	218,6	221,0	2,4	5,9
287,0	273,5	-13,5	181,8	275,7	273,5	-2,2	5,0
356,0	329,7	-26,2	688,4	336,1	329,7	-6,4	40,7
401,4	392,3	-9,1	83,1	373,8	392,3	18,5	341,9
505,7	501,3	-4,4	19,4	450,6	501,3	50,6	2563,8
8,6	10,4	1,7	3,0	8,7	10,4	1,7	2,8
21,1	25,2	4,1	17,0	21,2	25,2	4,0	16,1
42,2	50,2	8,0	64,4	42,3	50,2	7,9	62,8
82,6	92,1	9,5	89,9	82,3	92,1	9,7	95,0
118,8	129,1	10,3	106,7	117,8	129,1	11,3	128,8
156,0	169,2	13,2	174,2	153,8	169,2	15,5	238,8
224,8	232,6	7,8	61,0	218,9	232,6	13,8	189,9
287,5	285,7	-1,8	3,2	276,2	285,7	9,5	90,3
348,9	339,5	-9,4	89,1	330,1	339,5	9,4	88,0
407,4	389,8	-17,5	308,0	378,6	389,8	11,2	125,9
504,2	506,3	2,1	4,6	449,7	506,3	56,7	3209,9
<b>SCE</b>		<b>23263</b>		<b>SCE</b>		<b>23192</b>	
<b>Moyenne des résidus</b>		<b>-2,2</b>		<b>Moyenne des résidus</b>		<b>6,7</b>	

**ANNEXE 15 : graphique des erreurs relatives**



**ANNEXE 16 : Choix de l'ajustement**

<b>Linéaire</b>			
Equation	$y = 0,6862x$		
Coefficients	a	0,6862	
Ajustement	Expérience	Résidus	Résidus <sup>2</sup>
6,9	10,7	3,8	14,6
18,4	26,4	7,9	63,0
34,3	48,3	14,0	197,0
65,1	81,4	16,3	266,0
96,2	110,1	13,9	193,4
119,5	132,6	13,1	170,8
182,9	199,0	16,2	261,1
243,9	261,6	17,7	312,3
302,0	318,1	16,1	260,2
366,2	362,4	-3,7	13,9
7,5	11,7	4,2	18,0
19,2	28,2	9,1	82,4
35,4	49,7	14,3	204,5
68,5	92,0	23,5	552,4
102,8	128,4	25,6	656,9
128,8	155,8	26,9	726,2
194,3	219,9	25,7	658,5
257,8	272,9	15,1	228,2
314,8	326,8	12,0	144,0
377,8	383,3	5,5	30,5

<b>Polynome 2</b>			
Equation	$y = -0,0003x^2 + 0,8838x$		
Coefficients	a	-0,0003	
	b	0,8838	
Ajustement	Expérience	Résidus	Résidus <sup>2</sup>
8,9	10,7	1,9	3,5
23,5	26,4	2,8	8,1
43,4	48,3	4,9	24,1
81,2	81,4	0,3	0,1
118,0	110,1	-7,9	62,4
144,8	132,6	-12,2	150,0
214,2	199,0	-15,2	230,9
276,3	261,6	-14,7	214,9
330,8	318,1	-12,7	162,1
386,2	362,4	-23,7	563,7
9,6	11,7	2,1	4,5
24,4	28,2	3,8	14,4
44,8	49,7	4,9	24,0
85,2	92,0	6,8	45,9
125,6	128,4	2,8	7,7
155,4	155,8	0,4	0,2
226,2	219,9	-6,2	38,9
289,7	272,9	-16,8	281,8
342,3	326,8	-15,5	240,6
395,7	383,3	-12,3	152,0

<b>Puissance</b>			
Equation	$y = 1,5533x^{0,8759}$		
Coefficients	a	1,5533	
	b	0,8759	
Ajustement	Expérience	Résidus	Résidus <sup>2</sup>
11,7	10,7	-1,0	1,0
27,8	26,4	-1,4	1,9
47,8	48,3	0,6	0,3
83,8	81,4	-2,4	5,5
117,9	110,1	-7,8	61,0
142,6	132,6	-10,0	100,3
207,0	199,0	-7,9	63,1
266,4	261,6	-4,8	22,9
321,1	318,1	-3,1	9,3
380,2	362,4	-17,8	316,0
12,6	11,7	-0,9	0,8
28,7	28,2	-0,5	0,2
49,2	49,7	0,6	0,3
87,5	92,0	4,4	19,6
124,9	128,4	3,5	12,0
152,3	155,8	3,5	12,2
218,2	219,9	1,7	2,9
279,6	272,9	-6,7	44,9
333,1	326,8	-6,3	39,3
390,8	383,3	-7,5	55,6

7,7	14,3	6,6	43,4	9,9	14,3	4,4	19,4	12,9	14,3	1,4	1,9
18,8	32,2	13,4	179,0	24,1	32,2	8,2	66,9	28,3	32,2	3,9	15,6
35,1	58,0	23,0	527,2	44,4	58,0	13,6	186,2	48,7	58,0	9,3	86,7
67,7	107,5	39,8	1587,3	84,3	107,5	23,3	541,2	86,7	107,5	20,9	435,1
101,3	153,2	51,9	2691,8	124,0	153,2	29,2	855,2	123,4	153,2	29,8	888,4
127,1	187,0	59,9	3587,2	153,4	187,0	33,6	1127,7	150,5	187,0	36,5	1331,8
191,8	262,8	71,0	5039,2	223,6	262,8	39,2	1536,1	215,8	262,8	47,0	2207,7
255,5	310,1	54,6	2983,0	287,5	310,1	22,6	512,3	277,4	310,1	32,7	1069,0
312,9	344,0	31,2	971,5	340,6	344,0	3,4	11,8	331,3	344,0	12,8	162,7
374,1	393,2	19,1	363,0	392,7	393,2	0,5	0,2	387,4	393,2	5,7	32,8
6,9	11,8	4,9	24,0	8,8	11,8	3,0	8,7	11,7	11,8	0,1	0,0
18,4	29,8	11,4	129,2	23,5	29,8	6,3	39,3	27,8	29,8	2,1	4,2
34,3	52,9	18,5	344,0	43,5	52,9	9,4	88,5	47,8	52,9	5,1	25,6
66,3	94,6	28,3	801,4	82,6	94,6	12,0	144,3	85,1	94,6	9,5	90,2
99,6	131,3	31,6	999,0	122,0	131,3	9,2	85,4	121,6	131,3	9,6	93,0
125,4	160,3	34,9	1219,1	151,4	160,3	8,8	78,0	148,7	160,3	11,6	134,2
188,4	231,4	43,0	1847,5	220,1	231,4	11,3	128,6	212,5	231,4	18,9	358,5
252,0	281,4	29,4	865,3	284,1	281,4	-2,7	7,2	274,1	281,4	7,3	53,7
307,2	326,6	19,4	376,5	335,5	326,6	-8,9	79,8	326,0	326,6	0,6	0,3
368,1	386,9	18,8	355,0	387,8	386,9	-0,8	0,7	382,0	386,9	5,0	24,6
6,6	10,5	3,8	14,7	8,5	10,5	1,9	3,8	11,3	10,5	-0,9	0,7
16,6	23,9	7,3	53,2	21,2	23,9	2,7	7,2	25,3	23,9	-1,4	2,0
33,2	46,7	13,5	182,1	42,0	46,7	4,6	21,6	46,4	46,7	0,3	0,1
67,0	87,6	20,6	426,4	83,4	87,6	4,2	17,8	85,9	87,6	1,8	3,1
98,0	122,4	24,4	594,8	120,1	122,4	2,3	5,2	119,9	122,4	2,5	6,5
131,2	154,9	23,6	558,4	158,0	154,9	-3,2	10,1	154,8	154,9	0,1	0,0
195,0	217,6	22,6	510,7	227,0	217,6	-9,3	87,0	219,0	217,6	-1,4	1,8
258,5	281,5	23,0	527,1	290,4	281,5	-8,9	79,3	280,3	281,5	1,2	1,4
329,5	342,9	13,3	177,3	355,2	342,9	-12,4	153,5	346,7	342,9	-3,8	14,7
396,3	395,0	-1,3	1,8	410,4	395,0	-15,4	236,7	407,5	395,0	-12,5	156,8

6,6	10,4	3,8	14,3	8,5	10,4	1,9	3,6	11,3	10,4	-0,9	0,9
16,6	25,9	9,3	86,9	21,2	25,9	4,7	22,3	25,3	25,9	0,6	0,4
33,3	49,5	16,2	263,4	42,1	49,5	7,4	54,1	46,5	49,5	3,0	8,9
65,8	94,6	28,8	829,6	82,0	94,6	12,6	159,2	84,5	94,6	10,1	101,2
93,4	128,9	35,5	1258,6	114,7	128,9	14,1	199,9	114,9	128,9	14,0	195,2
129,0	166,2	37,2	1383,2	155,5	166,2	10,7	113,4	152,4	166,2	13,7	188,4
192,5	232,9	40,4	1635,0	224,3	232,9	8,6	74,2	216,5	232,9	16,4	270,4
255,9	287,5	31,6	998,9	287,9	287,5	-0,4	0,1	277,8	287,5	9,7	94,2
321,9	340,4	18,6	344,3	348,6	340,4	-8,1	66,0	339,6	340,4	0,8	0,7
392,7	389,8	-2,9	8,4	407,5	389,8	-17,7	314,1	404,2	389,8	-14,4	208,5
6,7	10,5	3,7	14,0	8,6	10,5	1,8	3,3	11,5	10,5	-1,0	1,0
16,6	24,3	7,7	59,1	21,2	24,3	3,1	9,5	25,3	24,3	-1,0	1,0
33,3	46,7	13,5	181,5	42,1	46,7	4,6	21,2	46,5	46,7	0,2	0,0
65,9	87,3	21,4	457,3	82,1	87,3	5,2	26,7	84,7	87,3	2,6	6,9
96,5	122,7	26,2	686,2	118,4	122,7	4,3	18,8	118,2	122,7	4,5	19,9
128,9	154,8	26,0	674,0	155,4	154,8	-0,6	0,3	152,3	154,8	2,5	6,3
192,2	217,9	25,7	659,4	224,0	217,9	-6,1	37,6	216,2	217,9	1,7	2,8
255,6	266,8	11,2	125,7	287,6	266,8	-20,8	431,3	277,5	266,8	-10,7	114,6
322,2	325,8	3,6	12,9	348,9	325,8	-23,0	531,2	339,9	325,8	-14,1	199,6
394,0	379,8	-14,2	200,8	408,5	379,8	-28,7	825,3	405,4	379,8	-25,6	654,8
526,6	483,8	-42,8	1832,4	501,6	483,8	-17,8	315,4	522,7	483,8	-38,9	1513,5
6,5	10,5	4,0	15,9	8,4	10,5	2,1	4,5	11,2	10,5	-0,7	0,4
16,4	24,6	8,2	66,9	21,0	24,6	3,6	13,1	25,1	24,6	-0,5	0,2
33,3	47,0	13,7	187,4	42,2	47,0	4,8	23,1	46,5	47,0	0,4	0,2
65,8	88,8	23,0	527,8	82,0	88,8	6,8	45,9	84,6	88,8	4,2	17,8
96,5	123,7	27,2	742,3	118,3	123,7	5,4	29,1	118,2	123,7	5,5	30,3
128,9	162,0	33,0	1091,6	155,5	162,0	6,5	42,3	152,4	162,0	9,6	91,7
192,0	222,8	30,8	950,4	223,8	222,8	-1,0	0,9	216,0	222,8	6,8	46,6
255,9	278,4	22,5	506,6	287,9	278,4	-9,5	89,5	277,8	278,4	0,6	0,4
321,5	326,2	4,7	22,6	348,2	326,2	-22,0	483,1	339,2	326,2	-13,0	169,6

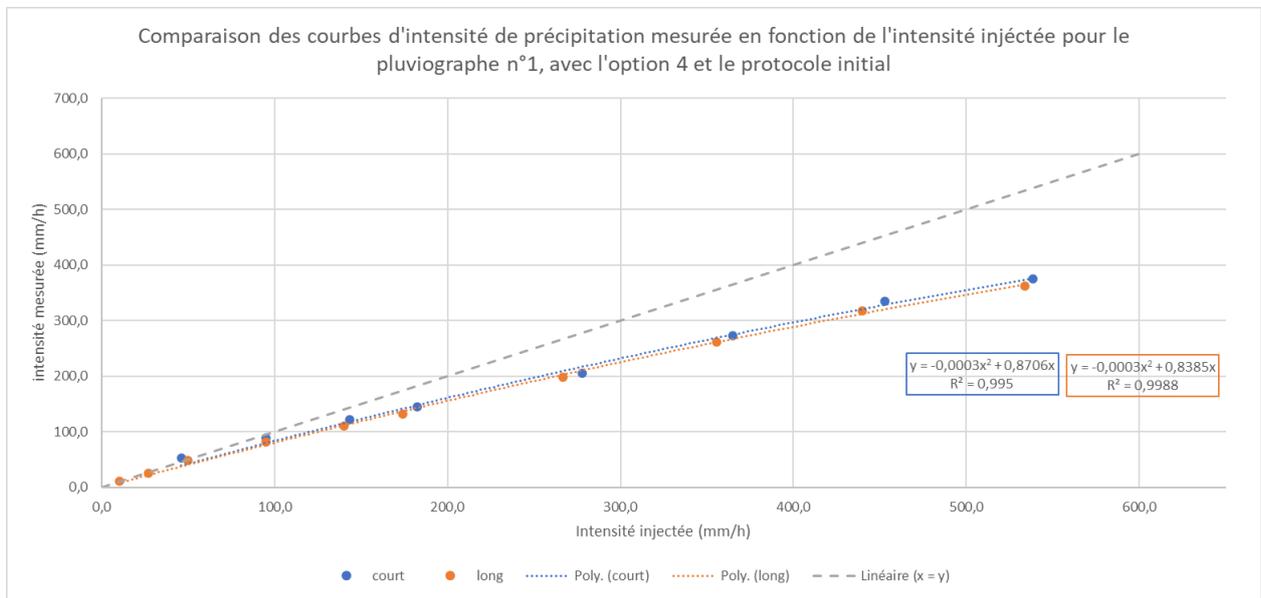
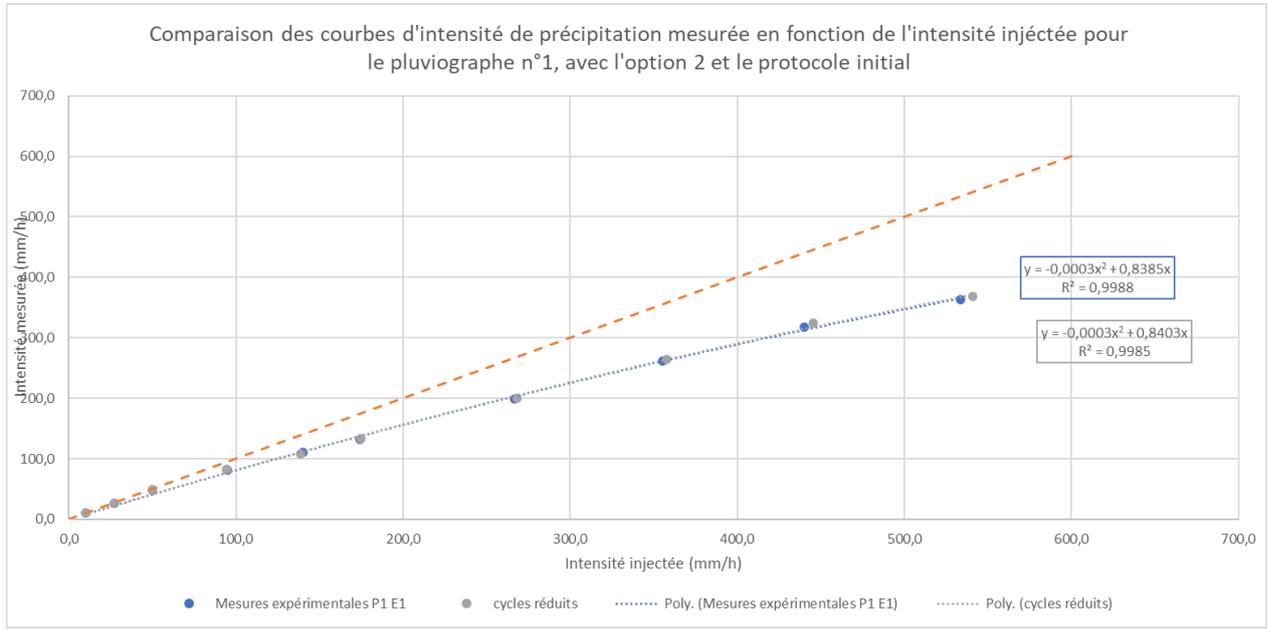
394,7	377,0	-17,7	311,8	409,1	377,0	-32,1	1028,0	406,0	377,0	-29,0	841,5
529,0	465,7	-63,3	4003,0	503,1	465,7	-37,3	1391,5	524,8	465,7	-59,1	3487,3
6,6	10,4	3,8	14,4	8,4	10,4	1,9	3,8	11,2	10,4	-0,9	0,7
17,1	24,4	7,3	53,7	21,8	24,4	2,6	6,8	25,9	24,4	-1,5	2,3
33,3	47,8	14,5	211,0	42,2	47,8	5,6	31,8	46,6	47,8	1,3	1,6
66,0	85,5	19,5	379,3	82,2	85,5	3,2	10,6	84,7	85,5	0,7	0,5
96,8	116,2	19,4	377,0	118,7	116,2	-2,5	6,2	118,5	116,2	-2,3	5,5
128,9	148,0	19,1	365,3	155,4	148,0	-7,4	55,0	152,3	148,0	-4,3	18,9
186,0	206,7	20,7	427,5	217,5	206,7	-10,8	117,6	210,1	206,7	-3,4	11,6
255,6	266,5	11,0	120,0	287,6	266,5	-21,0	442,2	277,5	266,5	-11,0	120,3
322,5	317,7	-4,8	23,1	349,1	317,7	-31,4	986,6	340,2	317,7	-22,5	506,4
391,3	367,9	-23,4	545,3	406,4	367,9	-38,5	1481,3	402,9	367,9	-35,0	1227,8
530,1	478,5	-51,6	2662,9	503,7	478,5	-25,2	636,0	525,7	478,5	-47,2	2232,2
6,6	8,6	2,0	3,9	8,5	8,6	0,1	0,0	11,3	8,6	-2,7	7,4
16,7	21,5	4,8	23,5	21,3	21,5	0,2	0,0	25,4	21,5	-3,9	15,1
33,2	42,5	9,3	86,3	42,1	42,5	0,4	0,2	46,4	42,5	-3,9	15,6
65,8	82,3	16,5	271,6	82,0	82,3	0,3	0,1	84,5	82,3	-2,3	5,1
96,5	115,8	19,3	373,0	118,3	115,8	-2,5	6,5	118,2	115,8	-2,4	5,9
128,5	145,6	17,1	293,1	155,0	145,6	-9,4	87,7	152,0	145,6	-6,3	40,1
191,7	207,7	15,9	254,3	223,5	207,7	-15,8	251,0	215,7	207,7	-8,1	64,9
254,2	266,1	12,0	142,8	286,2	266,1	-20,1	403,2	276,2	266,1	-10,0	100,7
323,4	323,2	-0,2	0,1	349,9	323,2	-26,7	714,6	341,0	323,2	-17,9	319,3
391,9	380,2	-11,7	137,2	406,9	380,2	-26,7	713,4	403,5	380,2	-23,3	544,5
534,1	483,9	-50,2	2518,1	506,1	483,9	-22,2	494,8	529,2	483,9	-45,3	2052,0
7,1	10,6	3,4	11,8	9,2	10,6	1,4	2,0	12,1	10,6	-1,5	2,3
16,6	23,3	6,7	44,3	21,2	23,3	2,0	4,2	25,3	23,3	-2,1	4,2
33,2	46,3	13,1	170,7	42,1	46,3	4,2	17,7	46,4	46,3	-0,2	0,0
65,6	89,7	24,1	583,1	81,7	89,7	8,0	64,1	84,3	89,7	5,4	29,5
96,3	126,2	29,8	890,1	118,2	126,2	8,0	64,1	118,1	126,2	8,1	65,8
129,3	158,5	29,2	854,1	155,8	158,5	2,6	7,0	152,7	158,5	5,7	33,1

192,7	221,0	28,3	801,1
255,0	273,5	18,5	342,9
330,4	329,7	-0,6	0,4
385,0	392,3	7,3	53,5
533,3	501,3	-32,0	1026,5
6,7	10,4	3,6	13,2
16,5	25,2	8,7	75,7
33,3	50,2	16,9	285,6
66,3	92,1	25,8	664,4
96,9	129,1	32,3	1040,1
129,4	169,2	39,8	1583,6
193,0	232,6	39,7	1572,6
255,5	285,7	30,2	911,6
322,3	339,5	17,2	295,4
392,5	389,8	-2,7	7,1
530,9	506,3	-24,5	601,8
<b>SCE</b>		<b>74299</b>	
<b>Moyenne des résidus</b>		<b>14,4</b>	

224,5	221,0	-3,5	12,4
287,0	273,5	-13,5	181,8
356,0	329,7	-26,2	688,4
401,4	392,3	-9,1	83,1
505,7	501,3	-4,4	19,4
8,6	10,4	1,7	3,0
21,1	25,2	4,1	17,0
42,2	50,2	8,0	64,4
82,6	92,1	9,5	89,9
118,8	129,1	10,3	106,7
156,0	169,2	13,2	174,2
224,8	232,6	7,8	61,0
287,5	285,7	-1,8	3,2
348,9	339,5	-9,4	89,1
407,4	389,8	-17,5	308,0
504,2	506,3	2,1	4,6
<b>SCE</b>		<b>23263</b>	
<b>Moyenne des résidus</b>		<b>-2,2</b>	

216,7	221,0	4,3	18,6
276,9	273,5	-3,4	11,8
347,4	329,7	-17,7	314,3
397,3	392,3	-5,0	24,8
528,5	501,3	-27,3	743,1
11,5	10,4	-1,1	1,2
25,2	25,2	0,0	0,0
46,5	50,2	3,6	13,3
85,1	92,1	7,0	48,5
118,7	129,1	10,5	109,9
152,9	169,2	16,3	266,1
217,0	232,6	15,7	245,6
277,4	285,7	8,3	68,4
340,0	339,5	-0,5	0,3
404,0	389,8	-14,2	202,8
526,4	506,3	-20,1	403,0
<b>SCE</b>		<b>26153</b>	
<b>Moyenne des résidus</b>		<b>-1,4</b>	

**ANNEXE 17 : Résultats des tests de calibration en cycle court**





# Résumé

De nos jours, l'augmentation des phénomènes météorologiques violents constituent une problématique importante, surtout en zone urbaine et dans les zones rurales exposées aux risques. L'un des risques les plus préoccupant et présent en France est le risque inondation. Pour faire face à ce risque, la quantification précise des pluies est aujourd'hui essentielle, notamment pour la réalisation de modèles de prévision de crue et d'inondations. L'unité de recherche HydroSciences Montpellier a mis en place un réseau d'une dizaine de pluviographes à augets sur un espace réduit afin de discrétiser les événements pluvieux avec un petit pas de temps et d'espace. Afin de calculer précisément les intensités des événements pluvieux, un travail de calibration des pluviographes a été entrepris. Plusieurs expériences de calibration ont été réalisées et ont permis d'aboutir à une calibration complète des pluviographes et à une proposition de correction dynamique des intensités de pluie mesurées. D'autres expériences ont également permis d'aboutir à une meilleure compréhension du matériel utilisé et de son fonctionnement, a aussi permis de déterminer les points clés de la calibration des pluviographes à augets. Le présent rapport traite dans un premier temps des règles et recommandations pour la calibration de ce type de pluviographes. Dans un second temps, sont présentés le matériel et les différentes étapes d'une calibration complète. Enfin, les résultats des différentes expériences de calibration sont exposés, et discutés. Ces résultats ont permis d'établir une calibration pour chaque pluviographe mais également de démontrer la possibilité d'une calibration unique pour tous les pluviographes. Une correction dynamique réalisée par le biais d'une relation mathématique a également été étudiée et proposée afin de faciliter le traitement des futures données pluviométriques.

# Abstract

Nowadays, the increase in severe weather phenomena is a major problem, especially in urban areas and in rural areas at risk. One of the most worrying risks present in France is the risk of flooding. To cope with this risk, the precise quantification of rainfall is essential today, in particular for the realization of flood and flood forecasting models. The HydroSciences Montpellier research unit has set up a network of around ten bucket pluviographs in a small space in order to discretize rainy events with a small amount of time and space. In order to precisely calculate the intensities of the rain events, a calibration work of the pluviographs was undertaken. Several calibration experiments were carried out and led to a complete calibration of the pluviographs and a proposal for dynamic correction of the measured rainfall intensities. Other experiments have also led to a better understanding of the equipment used and its operation, also made it possible to determine the key points in the calibration of bucket pluviographs. This report first deals with the rules and recommendations for the calibration of this type of rain gauge. Secondly, the equipment and the different stages of a complete calibration are presented. Finally, the results of the various calibration experiments are presented and discussed. These results made it possible to establish a calibration for each pluviograph but also to demonstrate the possibility of a single calibration for all the pluviographs. A dynamic correction made through a mathematical formula has also been studied and proposed in order to facilitate the processing of future rainfall data.