

---

## Dimensionnement et évaluation de l'efficacité du système d'irrigation par bande perforée dans la région d'Athiémé (Bénin)

**Auteur :** Magradze, Margarita

**Promoteur(s) :** Wellens, Joost

**Faculté :** Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

**Diplôme :** Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2022-2023

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/18239>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

# Dimensionnement et évaluation de l'efficacité du système d'irrigation par bande perforée dans la région d'Athiémé (Bénin)

MARGARITA MAGRADZE

TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME DE MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES ET  
TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT

ANNEE ACADEMIQUE 2022-2023

PROMOTEUR : PR JOOST WELLENS







---

*Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.*  
*Le présent document n'engage que son auteur.*

# Dimensionnement et évaluation de l'efficacité du système d'irrigation par bande perforée dans la région d'Athiémé (Bénin)

MARGARITA MAGRADZE

TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME DE MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES ET  
TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT

ANNEE ACADEMIQUE 2022-2023

PROMOTEUR : PR JOOST WELLENS

---

Le voyage réalisé dans le cadre du présent travail a été rendu possible grâce au soutien financier de l'Académie de recherche et d'enseignement supérieur de la Fédération Wallonie-Bruxelles, Belgique, dans le cadre de sa politique de Coopération au développement.

## Remerciements

Je souhaite avant tout adresser mes remerciements à mon promoteur académique, le Professeur Joost Wellens, pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser cette expérience. Sa disponibilité, sa confiance et ses conseils ont été inestimables tout au long de cette étude.

J'adresse également mes remerciements à Francis Guyon, qui a rendu possible la réalisation de ce travail. Son accueil chaleureux au Bénin ainsi que son assistance précieuse durant mon séjour ont été grandement appréciés. De plus, je tiens à adresser mes remerciements à l'équipe de Join For Water Bénin pour leur accueil et leur contribution.

Je souhaite exprimer toute ma gratitude à Cédric pour son aide précieuse et ses conseils avisés, qui ont été essentiels pour mener à bien mon écriture et ma réflexion. Son soutien durant les moments de doute a été d'une grande importance.

Également envers mes rencontres au Bénin, notamment Zoul, qui m'a accompagnée auprès des producteurs tout au long de mon séjour. Un grand merci à Gertrude pour son soutien considérable pour mon adaptation, et qui m'a permis de vivre des expériences enrichissantes. Mes remerciements s'étendent aux producteurs pour leur accueil chaleureux, en particulier à Alexandre, pour les discussions instructives et la transmission de précieuses connaissances.

Aux copines de TFE : Lisa, Nono, Lulu et Cailloux, merci pour l'ambiance positive, l'aide mutuelle et les moments de rire partagés au bureau.

Un remerciement spécial à ma famille, Marie et William, ainsi qu'à Thomas, pour leur soutien émotionnel et leur assistance tout au long de la réalisation de ce travail de fin d'études.

---

## Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un programme pluriannuel développé dans la région d'Athiémé au Sud-Ouest Bénin, engageant Join For Water, le Centre béninois de Recherche et d'Expertise pour le Développement Local ainsi que Gembloux Agro-Bio Tech. L'utilisation du système d'irrigation par bande perforée est envisagée pour tenter de répondre à un objectif de ce programme qui consiste à mettre en œuvre des solutions durables pour l'utilisation efficace des eaux de surface des zones humides de la région, destinées à la pratique de l'horticulture. Bien que le système par bande perforée soit déjà employé en Afrique de l'Ouest, son utilisation est peu documentée dans la littérature actuelle. Cette étude a donc débuté par son installation au Bénin et en Belgique, l'a ensuite progressivement caractérisée, en examinant ses composants individuels jusqu'à son évaluation globale.

Elle comprend la caractérisation hydraulique des bandes perforées par la mesure de la relation débit - pression, des pertes de charge dans les tuyaux et de la distribution en eau. Par la suite, l'évaluation des systèmes a impliqué la mesure de l'efficacité d'application de l'eau, comprenant la dérive liée au vent et les pertes par évaporation (DVPE), ainsi que l'évaluation de l'uniformité de la distribution. Cette dernière a été réalisée au moyen du coefficient d'uniformité (CU), de la distribution du quartile inférieur (DU<sub>lq</sub>) et du coefficient de variation (CV). Des critères de dimensionnement sont proposés sur la base de ces résultats.

Les essais ont permis de définir des relations débit-pression satisfaisantes propres à différentes longueurs de bande testées, et de constater que les pertes de charge restent minimales pour les longueurs testées. La distribution en eau et les mesures des coefficients d'uniformité théorique selon différentes configurations d'utilisation ont permis d'obtenir une valeur maximum et minimum de CU, DU<sub>lq</sub> et CV de respectivement 89, 87 et 12% et de 49, 48 et 58%. Une DVPE de 18 et de 28%, corrélées positivement aux valeurs de température et à la pression de fonctionnement, ont été mesurées respectivement sous les conditions climatiques propres aux essais en Belgique et au Bénin. Ces résultats, inclus au même titre que la prise en compte des caractéristiques de la pompe, de la vitesse d'infiltration du sol ainsi que d'une estimation budgétaire de l'installation, ont permis de fournir à l'ONG les outils nécessaires pour permettre de considérer un dimensionnement sur base de critères complets.

Ces éléments permettent de conclure que le dimensionnement doit permettre d'atteindre les performances idéales du système en termes de distribution et d'application d'eau, mais doit également prendre en considération d'autres facteurs. En complément de ces résultats, la détermination des besoins en eau de la culture et la prise en considération des pratiques agricoles sont nécessaires pour compléter l'utilisation optimale du système.

---

## Abstract

This work is part of a multi-year program developed in the Athiémé region of southwestern Benin, involving Join For Water, the Beninese Center for Research and Expertise in Local Development, and Gembloux Agro-Bio Tech. The use of the perforated pipe irrigation system is being considered to address an objective of this program, which aims to implement sustainable solutions for the efficient use of surface waters from wetland areas in the region, intended for horticultural practices. Although the perforated pipe system is already utilized in West Africa, its use is poorly documented in current literature. Therefore, this study began with its installation in Benin and Belgium, and subsequently progressively characterized it by examining its individual components until a comprehensive evaluation was conducted.

It encompasses the hydraulic characterization of perforated pipe through the measurement of the flow - pressure relationship, friction loss in the pipe, and water distribution. Subsequently, the systems evaluation involved assessing the efficiency of water application, including wind drift and evaporation losses (WDEL), as well as evaluating the uniformity of distribution. The latter was carried out using the coefficient of uniformity (CU), lower quartile distribution (DU<sub>lq</sub>), and coefficient of variation (CV). Dimensioning criteria are proposed based on these findings.

Trials allowed for defining satisfactory flow - pressure relationships specific to different tested lengths, and observing that pressure losses remain minimal for the tested lengths. The water distribution and measurements of theoretical uniformity coefficients for different utilization configurations allowed obtaining maximum and minimum values of CU, DU<sub>lq</sub>, and CV, respectively 89, 87, and 12%, and 49, 48, and 58%. A WDEL of 18 and 28%, positively correlated with temperature values and operating pressure, were respectively measured under the climatic conditions of the tests in Belgium and Benin. These results, along with the consideration of pump characteristics, soil infiltration rate, and budget estimates for the installation, have equipped the NGO with necessary tools to facilitate comprehensive dimensioning.

These elements lead to the conclusion that dimensioning must achieve the optimal system performance in terms of water distribution and application, while also taking into account other factors. In addition to these findings, determining water needs for the crop and considering agricultural practices are necessary to fully complement the optimal utilization of the system.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Objectifs . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Matériel et méthode</b>	<b>6</b>
2.1	Zones d'étude . . . . .	6
2.1.1	Zones humides d'Athiémé, Bénin . . . . .	6
2.1.2	Parcelle Wasabi, Belgique . . . . .	7
2.2	Système d'irrigation . . . . .	8
2.2.1	Description du système étudié . . . . .	8
2.2.2	Installation et matériaux utilisés . . . . .	9
2.2.3	Matériel de prise de mesure . . . . .	11
2.3	Caractérisation hydraulique des bandes perforées . . . . .	12
2.3.1	Relation débit - pression . . . . .	12
2.3.2	Pertes de charge . . . . .	13
2.3.3	Mesure de distribution de la quantité en eau et portée . . . . .	18
2.4	Évaluation des systèmes . . . . .	19
2.4.1	Mesure de l'efficacité d'application . . . . .	20
2.4.2	Mesure de l'uniformité de distribution en irrigation . . . . .	21
2.5	Dimensionnement et installation . . . . .	24
2.6	Tableau récapitulatif des mesures . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Résultats et discussion</b>	<b>27</b>
3.1	Caractérisation hydraulique . . . . .	27
3.1.1	Relation débit - pression . . . . .	27
3.1.2	Pertes de charge . . . . .	29
3.1.3	Distribution en eau et portée . . . . .	30
3.2	Évaluation des systèmes . . . . .	36
3.2.1	Efficacité d'application . . . . .	36
3.2.2	Uniformité . . . . .	40
3.3	Dimensionnement . . . . .	40
3.3.1	Critères de dimensionnement . . . . .	41
3.3.2	Conditions d'utilisation des systèmes . . . . .	43
3.3.3	Application au Bénin . . . . .	43
3.4	Perspectives . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>Annexes</b>	<b>53</b>
5.1	Matériel et méthode . . . . .	53
5.2	Résultats et discussion . . . . .	56



## Table des figures

1	Localisation du Bénin et d'Athiémé sur le continent africain. . . . .	1
2	Photographie d'un producteur (Christian) de Ahoho arrosant sa parcelle à la main. .	4
3	Photographie de l'emplacement d'une pompe et de son tuyau d'aspersion chez un producteur (Patrice) du bas-fond de Kpodji. . . . .	4
4	Présentation des objectifs . . . . .	5
5	Localisation de la zone d'étude au Bénin et délimitation des 4 parcelles expérimentales dans les villages d'Abloganmè (1) et Ahoho (2). . . . .	6
6	Photographie du bas-fond d'Ahoyo, localisé dans le village d'Abloganmè. . . . .	7
7	Photographie d'une culture et d'un plant de Crin-crin à proximité du bas-fond d'Ahoyo. .	7
8	Localisation de la zone délimitée pour l'expérimentation en Belgique sur la parcelle Wasabi à Gembloux Agro-Bio Tech. . . . .	8
9	Bande perforée du modèle HYB1-3 de la marque San Fu © en fonctionnement (a) et représentée par un schéma (b). . . . .	9
10	Schéma de dimensionnement et liste du matériel d'un système installé sur une des parcelles d'étude au Bénin. . . . .	10
11	Photographie de la rampe principale d'un système par bandes perforées installé au Bénin. . . . .	10
12	Schéma de dimensionnement du système pour l'expérimentation en Belgique sur la parcelle Wasabi de Gembloux Agro-Bio Tech. . . . .	11
13	Photographie de la rampe principale du système par bandes perforées installé en Belgique. . . . .	11
14	Photographie prise en Belgique d'un manomètre (a), du compteur d'eau (b) et de l'anémomètre (c). . . . .	12
15	Récapitulatif des mesures et comparaisons effectuées pour l'étude des pertes de charge caractéristique de la bande perforée San Fu ©. . . . .	18
16	Schéma de la disposition des récipients pour la mesure de la distribution en eau et photographie sur la parcelle en Belgique. . . . .	19
17	Schéma de la disposition des récipients pour la mesure l'uniformité de la distribution de l'eau et photographie sur une parcelle au Bénin. . . . .	23
18	Relation débit ( $m^3/min$ ) - pression (bar) établie depuis l'expérimentation en Belgique pour différentes longueurs de bandes perforées. . . . .	27
19	Distribution en eau représentée par le taux d'application ( $mm/h$ ) mesuré à distance ( $cm$ ) pour une bande perforée selon la pression (bar). . . . .	31
20	Distribution en eau représentée par le taux d'application ( $mm/h$ ) mesuré à distance ( $cm$ ), simultanément en début et extrémité de bande de 20 m à 0.2 bar. . . . .	31
21	Distribution en eau théorique et observée de deux bandes à une distance de 2.4 et 4 m et une pression de 0.2 et 0.4 bar. . . . .	32
22	Estimation de la distribution en eau et du CU correspondant de plusieurs bandes espacées de 2 à 4m à 0.2 bar et 0.4 bar. Les courbes en couleur représentent la distribution à 0.2 et 0.4 bar d'une bande unique utilisées pour réaliser la courbe estimée. . . . .	34
23	Distribution en eau d'une bande perforée incorrectement orientée . . . . .	36
24	Valeur de DVPE (%) en fonction de la température moyenne $T_m$ ( $^{\circ}C$ ), la vitesse moyenne du vent $V_m$ ( $m/s$ ) et la pression de fonctionnement (bar) mesurée durant les essais en Belgique au mois de juillet. . . . .	37
25	Photographie de la surface mouillée due aux dérives des gouttes d'eau liées au vent hors de la parcelle couverte par les bandes perforées au Bénin. . . . .	38

---

26	Photographie de jeunes pousses de Crin-crin après arrosage à la main (a) et utilisation du système (b) sur une culture au Bénin. . . . .	45
27	Dispositif utilisé par ANDRADE, 1990 pour la mesure de la relation débit - pression et du coefficient de variation de bande perforée pour une étude des bandes perforées Santeno ©. . . . .	54
28	Photographie de l'orientation incorrect d'une bande perforée causant une non-uniformité importante de la distribution en eau sur la zone irriguée. . . . .	56

## Liste des tableaux

1	Tableau récapitulatif des installations et mesures effectuées en Belgique et au Bénin pour cette étude. . . . .	26
2	Relation entre le débit $q$ ( $m^3/min$ ) et la pression $p$ (bar) établie selon différentes longueurs du tuyau perforé San Fu © HYB1-3. . . . .	28
3	Valeur de débit ( $l/min$ ) nécessaire pour atteindre certaines valeurs de pression (bar) dans différentes longueurs (m) d'une bande perforée San Fu © HYB1-3. . . . .	28
4	Calcul de la différence de pression présente entre le début et l'extrémité d'un tuyau perforée Santeno © de 40 m à partir des équations et paramètres empiriques élaborés par MARTINS, 2017, MELO et al., 2017 et MELO et al., 2019. . . . .	30
5	Portée et hauteur maximale d'une bande perforée San Fu © selon la pression. . . . .	31
6	Valeurs théoriques des coefficients CU, DU $l$ q et CV, mesuré entre deux bandes perforées à partir d'un agencement de 4 à 5 bandes, à la suite de l'estimation des courbes de distribution en eau pour des pressions de fonctionnement de 0.2 et 0.4 bar et des espacements de 2 à 4 m. . . . .	33
7	Différence entre les valeurs estimées et réelles de coefficients d'uniformité CU, DU $l$ q et CV obtenus pour les tests réalisés en Belgique. . . . .	35
8	Valeur des coefficients de corrélation de Pearson et Spearman pour la variable DVPE, en fonction des variables de température $T_m$ , de vitesse de vent $V_m$ et de pression de fonctionnement dans le système. . . . .	37
9	DVPE (%) et pression* (bar) mesurée à partir des essais réalisés au Bénin. . . . .	39
10	Valeurs des coefficients CU, DU $l$ q et CV des essais de mesure d'uniformité réalisés au Bénin. . . . .	40
11	Taux d'application moyens et écart-types associés (mm/h) résultants de l'estimation théorique des courbes de distribution en eau pour des pressions de fonctionnement de 0.2 et 0.4 bar et des espacements de 2 à 4 m. . . . .	41
12	Comparaison de l'efficacité d'application (%), des coefficients d'uniformité estimés (CU, DU $l$ q et CV), du prix (FCFA), du débit total requis en entrée du système ( $l/min$ ) et du taux d'application moyen estimé (mm/h) pour une installation de 900m <sup>2</sup> de 30 m de bande perforée selon différents couples de pression - espacement. . . . .	42
13	Table du facteur F mesuré expérimentalement pour le tuyau perforé Santeno I © par MARTINS, 2017. N correspond au nombre de perforations considérées pour établir la valeur de F. . . . .	54
14	Caractéristiques des pompe des producteurs béninois. . . . .	55
15	Coefficients d'uniformité réels calculés entre deux bandes, selon différentes pressions et espacements, obtenus à la suite des différents tests de distribution en eau effectués en Belgique. . . . .	56
16	Tableau élaboré par PLAYÁN et al., 2005 reprenant les facteurs influençant les pertes pas évaporation et dérive liée au vent selon la littérature. . . . .	57
17	Tableau général des vitesse d'infiltration (mm/h) pour différents types de sols proposé par SAWA & FRENKEN, 2001 . . . . .	57
18	Triangle textural fourni par la FAO, 2006 ayant permis de déterminer la texture du sol des parcelles au Bénin. . . . .	58
19	Coût (FCFA) du matériel d'irrigation au mètre et à l'unité, fourni par l'entreprise ABD Consulting Inc © et utilisé pour l'installation des systèmes en mars 2023 dans la région du sud-ouest Bénin. . . . .	59
20	Adaptation du dimensionnement réalisé au Bénin sur base des trois scénarios envisagés chez les producteurs béninois. . . . .	59

## Liste des abréviations

**CU** : Coefficient de Christiansen

**CV** : Coefficient de variation

**CVf** : Coefficient de variation de fabrication

**DUIq** : Distribution de l'uniformité du quartile inférieur

**DVPE** : Dérive liée au vent et pertes par évaporation

**FAO** : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

**FCFA** : Franc de la Communauté Financière d'Afrique (devise béninoise)

**HDPE** : Polyéthylène à haute densité

**JFW** : Join For Water

**MYP** : Multi-year program

**PVC** : Polychlorure de vinyle

## 1 Introduction

La République du Bénin est un pays d'Afrique de l'Ouest, limité par l'Océan Atlantique au Sud, qui partage ses frontières avec le Nigeria à l'Est, le Niger au Nord, le Burkina-Faso au Nord-Ouest et le Togo à l'Ouest (figure 1). L'économie béninoise est principalement dominée par le secteur agricole, moteur des moyens de subsistances et de sécurité alimentaire du pays (GBAGUIDI, 2010; DJAGBA et al., 2014). En 2007, il comptait pour approximativement 25% dans la formation du PIB (GBAGUIDI, 2010). Bien qu'ayant entamé une croissance économique récente dans les années 2000, le taux de pauvreté est toujours élevé dans le pays, de 50.9% en 2011 selon l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)<sup>1</sup>. Ce qui inclut 23% de foyers en insécurité alimentaire la même année (NONVIDE, 2018). Les changements des conditions climatiques et des alternances entre inondations et assèchements affectent la stabilité du secteur agricole. L'agriculture irriguée est généralement considérée comme un moyen de réponse à l'instabilité des variations climatiques et de la production qui en découle. En effet, l'eau étant un facteur limitant en agriculture, elle doit être consommée de manière responsable à l'aide de moyens de gestion, tels que l'irrigation (ASCOUGH & KIKER, 2002; NONVIDE, 2018; BURNEY & NAYLOR, 2012; FAO, 2020).



FIGURE 1 – Localisation du Bénin et d'Athiémé sur le continent africain.

1. <https://www.fao.org/benin/fao-au-benin/le-pays-en-un-coup-doeil/fr/>, consulté le 8/08/23

Plus précisément, la promotion de l'utilisation de technologies en agriculture par l'adoption notamment de systèmes d'irrigation, vise à permettre une application efficace d'une quantité contrôlée d'eau. Cette application, adaptée aux besoins spécifiques des cultures, est effectuée en tenant compte de l'uniformité de distribution de l'eau du système et de son taux d'application. Ce dernier doit être adéquat à la capacité de rétention en eau et des vitesses d'infiltration caractéristiques des sols. En cherchant à optimiser ces besoins, et donc, en maximisant l'efficacité de l'irrigation, des bénéfices tels que la réduction des pertes d'eau indésirables et l'optimisation économique peuvent être réalisés (BOS & NUGTEREN, 1990 ; BURT et al., 1997 ; PEDRAS & PEREIRA, 2001 ; ASCOUGH & KIKER, 2002 ; HOWELL, 2003 ; REINDERS et al., 2013).

La contrainte économique liée à l'utilisation de système d'irrigation chez les petits producteurs exerce toutefois un frein majeur à leur développement, accentué par un manque d'accès à l'eau et à l'énergie. Cette situation entrave la possibilité d'améliorer la production agricole et les perspectives de développement économique des populations et du pays. Les producteurs ont en effet un besoin d'accessibilité à des technologies économiquement abordables, facilement utilisables et permettant d'irriguer efficacement, en comparaison des méthodes traditionnelles d'irrigation (GRUBER et al., 2009 ; MASHNIK et al., 2017).

Dans ce cadre, de nombreux programmes ont vu le jour, investissant dans de tels moyens de gestion de l'eau, en réalité peu développés dans les pays Sud-Saharien<sup>1</sup> (NEPAD/FAO, 2005 ; GBAGUIDI, 2010 ; DJAGBA et al., 2014 ; NONVIDE, 2018). Parmi ceux-ci s'est développé le Plan d'Action National pour la Gestion Intégrée de la Ressources en Eau (PANGIRE) en 2016 – 2020. Il se concentre sur les actions relatives à l'environnement, au changement climatique et à l'amélioration de la connaissance des ressources en eau. C'est en accord avec ce plan que s'est formé en 2022, dans la région d'Athiéme au Sud-Ouest Bénin (figure 1), un programme pluriannuel (MYP 5, « Multi Year Program ») engageant l'Organisation Non Gouvernementale (ONG) Join For Water, le Centre de Recherche et d'Expertise pour le Développement Local, CREDEL, ainsi que Gembloux Agro-Bio Tech. Ce programme a pour objectif de « renforcer la résilience climatique des agriculteurs d'Athiéme par la restauration écologique des zones humides situées dans la plaine inondable du fleuve Mono » (JFW, 2022).

Cette région, située dans le département du Mono et dans le bassin versant du fleuve homonyme, est actuellement le lieu d'inondation durant les saisons pluvieuses (EMMANUEL et al., 2019). BIAO et al., 2021 a conclu que le changement climatique engendrera des modifications dans les flux d'inondations causées par le fleuve. Ces modifications de calendrier de précipitations et de pluviométries ajoutent une pression supplémentaire sur la disponibilité des ressources en eau (MCJANNET et al., 2013). Dans le département, le potentiel estimé d'aménagement de bas-fond, source en eau des zones humides, était de 17 400 ha en 2005 (NEPAD/FAO, 2005).

Le MYP se concentre sur la restauration de trois zones humides soumises à un remplissage sédimentaire. Le but est d'expérimenter et de mettre en œuvre des solutions durables pour, entre autres, l'augmentation, la mobilisation et l'utilisation efficace des eaux de surface. Ces solutions sont destinées à la pratique de l'horticulture réalisée dans les zones humides. Un moyen de réponse à cet objectif inclut la promotion de développement de méthode d'irrigation, actuellement inexistante sur ces trois zones (JFW, 2022).

Les systèmes d'irrigation sont classés en trois groupes : l'irrigation de surface, par aspersion et localisée. La première se réalise avec écoulement d'eau directement à l'air libre sur la surface du sol. La seconde transporte l'eau sous pression dans des conduits. Elle est ensuite expulsée par un appareil de projection, dont l'asperseur est largement répandu, vers les terres. La dernière, également appelée « micro-irrigation », consiste à couvrir la parcelle d'un réseau dense de canalisation. Celui-ci

achemine l'eau directement jusqu'à la zone d'intérêt, nécessitant de faibles pressions dans le réseau. Se développe également des systèmes directement installés dans le sol, au niveau de la zone racinaire des végétaux (SAWA & FRENKEN, 2002; TIERCELIN & VIDAL, 2006). NONVIDE, 2018 précise que les zones irriguées au Bénin sont occupées par 46% d'irrigation de surface, 42% par asperseur et de 12% de goutte-à-goutte (localisée).

Le choix d'un système d'irrigation, outre leurs avantages et inconvénients respectifs, se base sur une multitude de paramètres à prendre en compte pour en assurer une performance optimale : ressource en eau, topographie, exhaure, type de culture, nature du sol, coût et main d'œuvre nécessaire. Il doit être techniquement faisable, économiquement viable et avoir un impact socio-économique positif (SAWA & FRENKEN, 2002; TIERCELIN & VIDAL, 2006).

Dans un contexte spécifique de projet d'installation d'un système d'irrigation, la sélection d'un système ne repose pas sur la simple détermination d'une unique solution optimale. Au lieu de cela, l'approche adoptée implique d'identifier et de prendre en considération les paramètres prédominants qui émergent spécifiquement du projet. En d'autres termes, le choix du système est effectué pour répondre aux exigences les plus spécifiques du projet, au lieu de privilégier une approche générique de "meilleur" système.

Parmi les types d'irrigation énoncés qui présenteraient des avantages vis-à-vis des contraintes rencontrées figure la bande perforée, un système simplifié d'irrigation localisée à basse pression (MARINHO et al., 1999). Celle-ci présente des perforations directement le long du tuyau, réduisant la complexité d'un organe asperseur classique (FRIZZONE & VIEIRA, 1998; MARTINS, 2017). Fonctionnant à basse pression, avec un matériau simple en polyéthylène flexible et résistant, ces avantages en font un système à faible coût de fabrication et à l'installation plus aisée (VON BERNUTH & SOLOMON, 1986). Ce système est donc choisi pour promouvoir l'aménagement de l'irrigation chez les producteurs concernés par le MYP.

Malgré un usage déjà reconnu en Afrique de l'Ouest, une description complète et approfondie de la bande perforée en application est relativement peu étudiée dans la littérature. CHRISTIANSEN, 1942 et MERRIAM & KELLER, 1979 font mention directement du système à basse pression par tuyaux perforés, utilisé pour l'irrigation des pâtures et des cultures à faible croissance. Le second auteur y ajoute une approche simplifiée d'évaluation du système. TIERCELIN & VIDAL, 2006 mentionne l'utilisation de rampe perforée rigide dans les systèmes par aspersion simple, appliquant l'eau à des taux élevés directement depuis la rampe ou un organe intermédiaire. Les publications de ANDRADE, 1990, MARINHO et al., 1999, MELO et al., 2017 et MELO et al., 2019 étudient les propriétés hydrauliques de ces tuyaux, notamment des marques Santape © et Santeno ©. L'organisation Practica<sup>2</sup> propose un guide technique d'installation du système à destination de petits producteurs d'Afrique de l'Ouest (PRACTICA, 2018).

Les études mentionnées les plus récentes émettent l'importance de la connaissance des propriétés de base de la bande perforée. Une caractérisation complète des propriétés hydrauliques de tuyaux souples présentant des perforations, telles que les bandes perforées et le goutte à goutte, consiste généralement en la détermination des éléments suivants : la relation débit - pression des perforations, le coefficient de variation de fabrication, la variation du diamètre interne en fonction de la pression, la perte de charge le long du tuyau et dans les perforations, et la pression de rupture (ANDRADE, 1990; FRIZZONE & VIEIRA, 1998; MARINHO et al., 1999; MELO et al., 2017; MELO et al., 2019).

L'étude de la bande perforée ne permet cependant pas l'évaluation seule de l'efficacité du système entier. L'évaluation globale d'un système en place consiste à prendre des mesures sous les conditions

---

2. Organisation à but non lucratif des Pays-Bas - <https://www.practica.org/>

d'utilisation habituelles de celui-ci (MERRIAM & KELLER, 1979). L'efficience a pour définition la capacité à produire l'effet désiré avec un minimum d'effort, de dépenses et de pertes (JENSEN, 2007 ; DE PASCALE et al., 2011). Dans le domaine de l'irrigation, ce terme caractérise la performance d'un système, et l'évaluation de l'utilisation en eau. L'objectif d'un système efficace étant dans ce cas de minimiser la consommation de l'eau d'irrigation pour la plante, apportée uniformément sur la parcelle, tout en maximisant la production culturale (HOWELL, 2003 ; JENSEN, 2007). La mesure de l'efficience d'application de l'eau et de l'uniformité de distribution d'un système constitue deux méthodes acceptables pour l'évaluation de système (SCHNEIDER, 2000).

## 1.1 Objectifs

Ce travail entreprend l'étude progressive du système d'irrigation par bande perforée. D'abord, les propriétés hydrauliques de la bande sont établies. Ensuite, une évaluation de l'efficience et de l'uniformité de la distribution de l'eau que le système peut apporter est effectuée. L'ensemble des éléments étudiés permettent ensuite d'étudier les faisabilités de dimensionnement de système, incluant une dimension économique à l'installation.

Les producteurs des zones humides sélectionnées ne possèdent actuellement pas de système d'irrigation. Ceux-ci arrosent à la main (figure 2) à partir d'un réseau de tuyaux connectés à une pompe directement placée sur le bas-fond (figure 3). Une première étape de l'étude des systèmes consiste à y entreprendre l'installation. Elle s'effectue à partir du guide PRACTICA, 2018. Elle concerne donc le dimensionnement des systèmes depuis les conseils du guide, la détermination du matériel à utiliser, la recherche du matériel avec l'aide de CREDEL et le réglage des éventuels défauts d'installation par la suite.



FIGURE 2 – Photographie d'un producteur (Christian) de Ahofo arrosant sa parcelle à la main.



FIGURE 3 – Photographie de l'emplacement d'une pompe et de son tuyau d'aspersion chez un producteur (Patrice) du bas-fond de Kpodji.

Cette étape essentielle consistait en une part importante des objectifs à réaliser. En conséquence, la progression ultérieure de l'étude a été écourtée, également en raison des conditions météorologiques défavorables. La mise en place d'une expérimentation à plus petite échelle en Belgique a été réalisée, permettant un suivi de l'étude et une caractérisation approfondie de ces systèmes.

Les objectifs du travail sont, à partir de l'installation des systèmes au Bénin et en Belgique : (1) Caractériser les propriétés hydrauliques de la bande perforée en mesurant la relation débit - pression, les pertes de charge et la distribution en eau. (2) Évaluer ces systèmes, en termes d'efficience



d'application par la mesure des pertes par évaporation et de dérive liée au vent et en termes de mesure de l'uniformité. (3) Proposer ensuite des critères de dimensionnement sur base des points (1) et (2), suivi de l'analyse des systèmes précédemment installés au Bénin. Un récapitulatif de ces objectifs et les questions auxquelles ils permettent de répondre est présenté en figure 4.

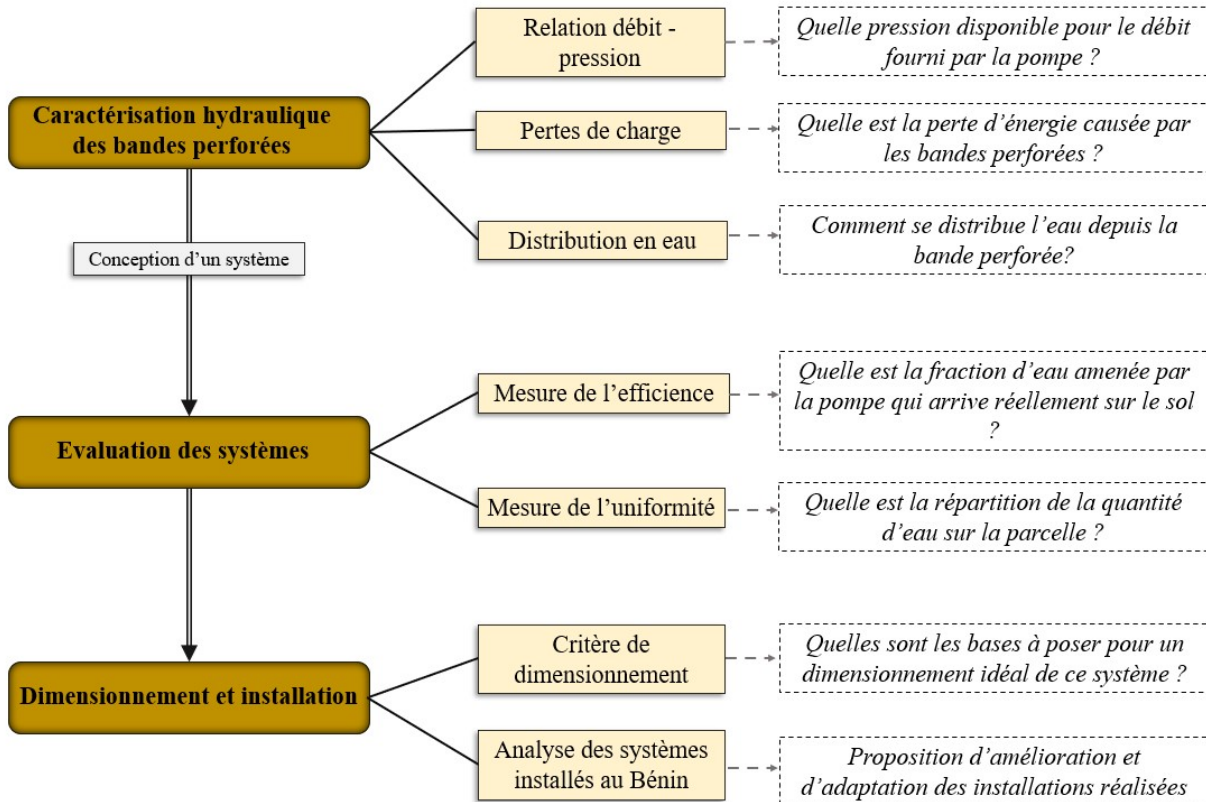


FIGURE 4 – Présentation des objectifs

## 2 Matériel et méthode

Les zones d'études, la description et l'installation des systèmes par bande perforée sont d'abord décrits. Les éléments relatifs aux étapes de caractérisation hydraulique et d'évaluation des systèmes sont ensuite abordés. Finalement, le dimensionnement sur base des éléments précédemment mentionné peut être établi.

### 2.1 Zones d'étude

#### 2.1.1 Zones humides d'Athiémé, Bénin

Athiémé est une commune du sud-ouest du Bénin, préfecture du département du Mono. Elle se situe à la frontière avec le Togo, dessinée naturellement dans la région par la présence du fleuve Mono (figure 5). Dans la région d'Athiémé, des zones structurées en plaines inondables et en plateaux sont retrouvées. Son climat tropical se caractérise par deux saisons sèches et humides (GBAGUIDI, 2010; EMMANUEL et al., 2019; BIAO et al., 2021).

Deux zones humides sur les trois concernées par le programme MYP sont sélectionnées pour l'étude. Elles sont caractérisées par la présence d'un bas-fond, une surface plane et enfoncée, faisant généralement office de source d'eau de surface aux producteurs (figure 6). Ces deux zones sont le bas-fond d'Ahoyo dans le village d'Abloganmè et de Kpodji dans le village d'Ahoho, respectivement en zone 1 et zone 2 en figure 5.

Avec la collaboration de trois producteurs, quatre parcelles de maraîchage, délimitées en vert sur les zones 1 et 2 de la figure 5, ont été mises à disposition sur leur propriété pour l'implantation des systèmes. L'espace disponible varie de 200 à 360 m<sup>2</sup> en fonction des parcelles.

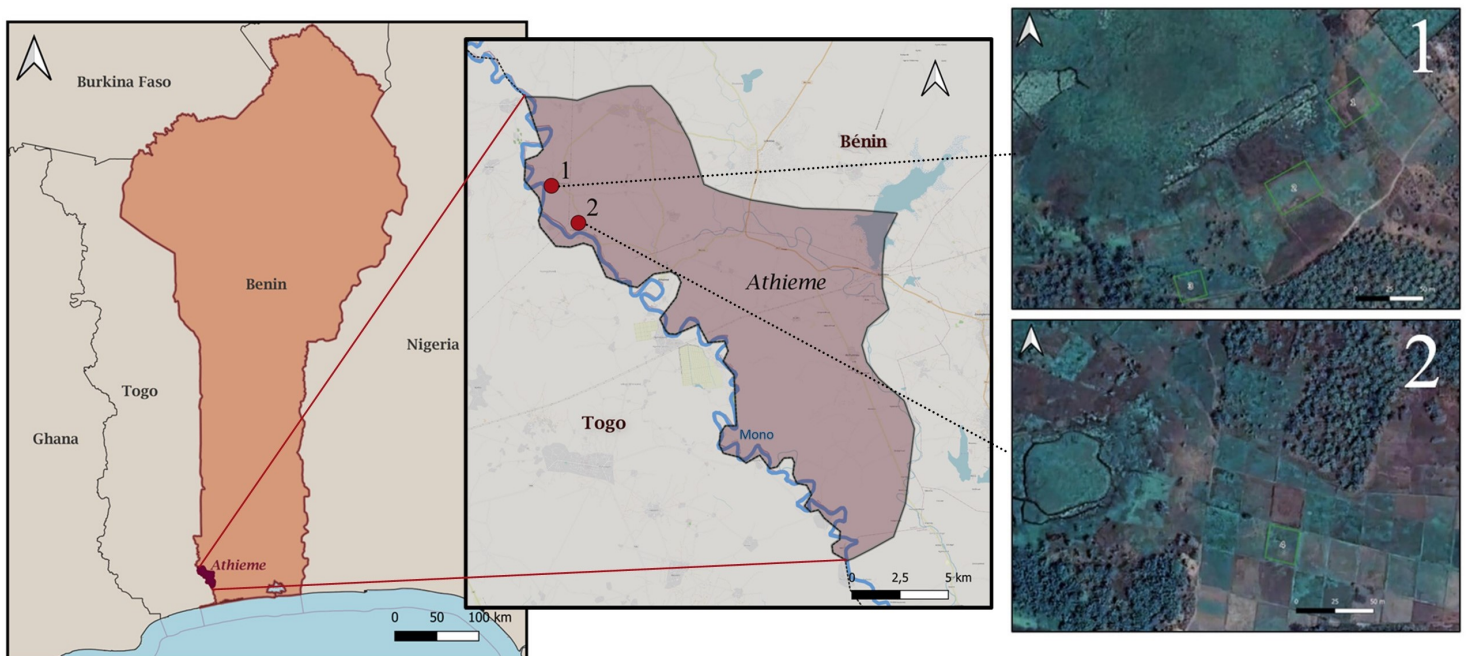


FIGURE 5 – Localisation de la zone d'étude au Bénin et délimitation des 4 parcelles expérimentales dans les villages d'Abloganmè (1) et Ahoho (2).



FIGURE 6 – Photographie du bas-fond d'Ahoyo, localisé dans le village d'Abloganmè.

Une culture de *Corchorus olitorus L.*, plante de la famille des Malvacées, dénommée « Crin-crin » dans la région, est présente sur les parcelles délimitées. Cultivable pratiquement toute l'année, le Crin-crin est une culture largement présente dans la région. De par sa taille modérée et sa dispersion aléatoire sur l'intégralité de la parcelle (figure 7), elle est considérée comme étant adaptée à l'utilisation du système étudié (PRACTICA, 2018). Elle peut présenter une légère ressemblance visuelle avec la culture de la mâche ou des épinards. À la récolte, la plante atteint une taille d'environ 20 à 30 cm. Le calendrier d'irrigation de ces producteurs pour cette culture reste variable dans le temps, entre un à trois arrosages par semaine au besoin, dont la quantité est appliquée selon le ressenti du producteur.



FIGURE 7 – Photographie d'une culture et d'un plant de Crin-crin à proximité du bas-fond d'Ahoyo.

### 2.1.2 Parcelle Wasabi, Belgique

Dans le cadre du projet *Wasabi*, une zone dédiée à la pratique d'une multitude de techniques de culture est située à Gembloux, à proximité du campus. Un espace d'environ 150 m<sup>2</sup> sur la parcelle (figure 8), a été mis à disposition pour l'installation du système.





FIGURE 8 – Localisation de la zone délimitée pour l'expérimentation en Belgique sur la parcelle Wasabi à Gembloux Agro-Bio Tech.

La source en eau est fournie depuis un forage présent à proximité de la zone permettant le remplissage d'un réservoir temporaire. La parcelle, non cultivée, est couverte par de la pelouse ainsi qu'une bâche, déjà présente avant installation.

## 2.2 Système d'irrigation

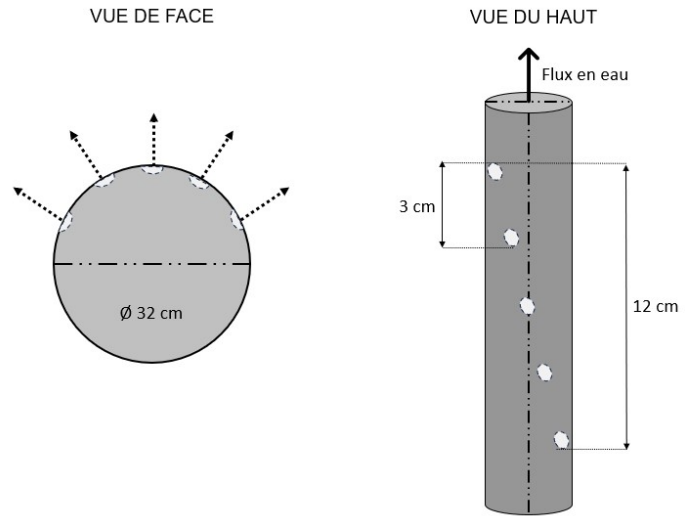
### 2.2.1 Description du système étudié

La bande d'aspersion est un tuyau souple en polyéthylène perforé. Les perforations peuvent prendre plusieurs modalités et sont toutes réalisées sur une même face. Ce tuyau possède une propriété particulière, il se dilate lors d'évènements d'irrigation. La pression permet l'expulsion de l'eau en un jet à chaque perforation, atteignant une certaine portée avant de se briser en gouttelette et de retomber sous forme d'une fine pluie sur la parcelle (figure 9a). La surface irriguée par les jets est approximativement rectangulaire autour de la bande.

Dans le cadre de l'étude, le modèle HYB1-3 de la marque *San Fu* © a été fourni. Celle-ci propose une large gamme de tuyaux d'aspersion, variant par la disposition, le nombre et le diamètre des perforations. Le modèle utilisé présente des blocs de 5 perforations espacées entre elles de trois centimètres, se répétant tous les douze centimètres (figure 9b). Les perforations de ce modèle sont effectuées par « aiguille », permettant un diamètre légèrement plus large qu'un modèle perforé par laser (SAN-FU, s. d.).



(a) Bande perforée HYB1-3 en fonctionnement sur une parcelle au Bénin.



(b) Schéma de la vue de face, de haut et des dimensions de la bande perforée HYB1-3 de la marque San Fu ©.

FIGURE 9 – Bande perforée du modèle HYB1-3 de la marque San Fu © en fonctionnement (a) et représentée par un schéma (b).

## 2.2.2 Installation et matériaux utilisés

### Installation au Bénin

Les systèmes installés au Bénin ont été dimensionnés selon les indications fournies par un référentiel mis au point par l'organisation PRACTICA, 2018. Les conditions qu'il pose pour le dimensionnement sont les suivantes :

- Privilégier l'utilisation de nombreuses bandes de petites tailles plutôt que l'inverse.
- Des longueurs de bande de 10 à 40, voir 50 mètres.
- Un espacement conseillé à 3 m, au minimum et maximum entre 2 à 4 mètres.

Le référentiel précise que la longueur et l'espacement dépendent de la pompe utilisée, sans renseignement supplémentaire. 2.5 mètres est choisi pour cette étude, afin de prévoir une marge de sécurité par rapport à l'espacement conseillé de 3 mètres. Le nombre et la longueur des bandes sont alors déterminés selon les superficies des parcelles délimitées, soit entre 8 à 12 bandes de 10 à 12 m de long.

Un aperçu d'un schéma de dimensionnement réalisé et du matériel nécessaire pour une des parcelles est présenté en figure 10. Un tuyau rigide de 50 mm en polychlorure de vinyle (PVC) constitue la rampe principale. Sur celle-ci sont fixés des raccords en té et coude en PVC à l'extrémité, d'une dimension de 50 x 32 mm. Cette réduction permet d'atteindre la dimension des bandes perforées, fixées sur ces raccords par l'intermédiaire d'une vanne en polyéthylène à haute densité (HDPE). Du tuyau en HDPE de 32mm réalise la connexion entre les tés, les vannes et la bande perforée. Cette rampe principale et les éléments qui y sont fixés sont présentés en figure 11. Une réduction graduelle est nécessaire pour atteindre la dimension des bandes, étant l'élément limitant du dimensionnement. En effet, les diamètres de sortie des pompes des producteurs sont généralement de 80 mm et de 50 mm.

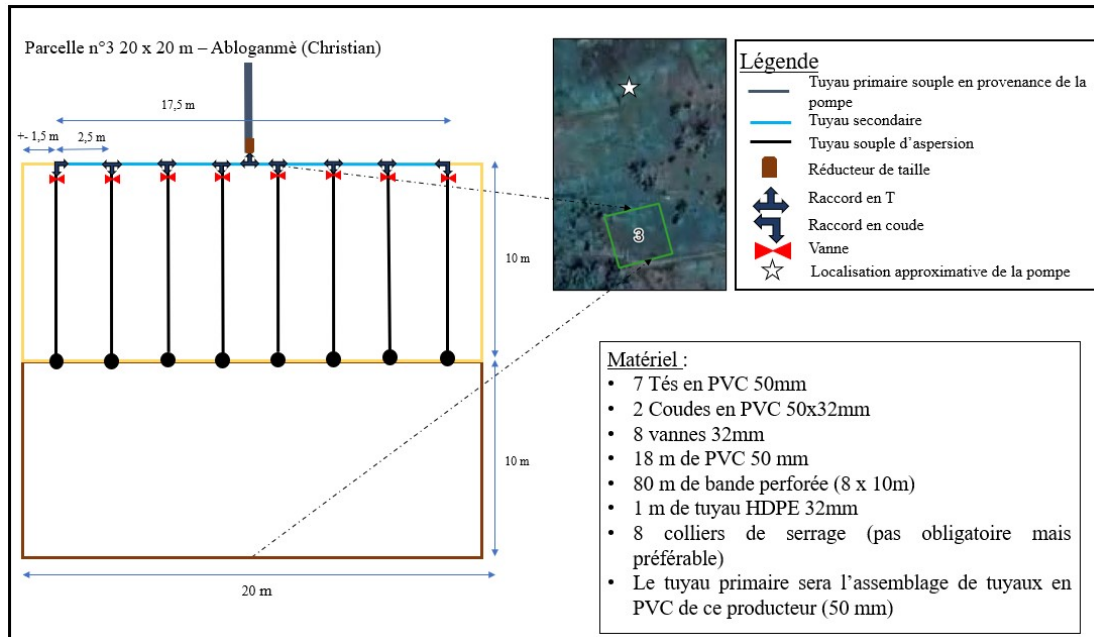


FIGURE 10 – Schéma de dimensionnement et liste du matériel d'un système installé sur une des parcelles d'étude au Bénin.



FIGURE 11 – Photographie de la rampe principale d'un système par bandes perforées installé au Bénin.

### Installation en Belgique

Cette installation ne doit pas être dimensionnée pour l'irrigation d'une culture, seule une à deux bandes sont utilisées pour réaliser les tests. Le diamètre de sortie de pompe en Belgique étant similaire à celui des bandes perforées (32 mm), une seule taille des différentes pièces est nécessaire. La rampe principale est composée d'HDPE de la marque Socarex ©. Elle est couramment utilisée en irrigation selon les fournisseurs du matériel et préférée au PVC. L'installation en Belgique est représentée par les figures 12 et 13.



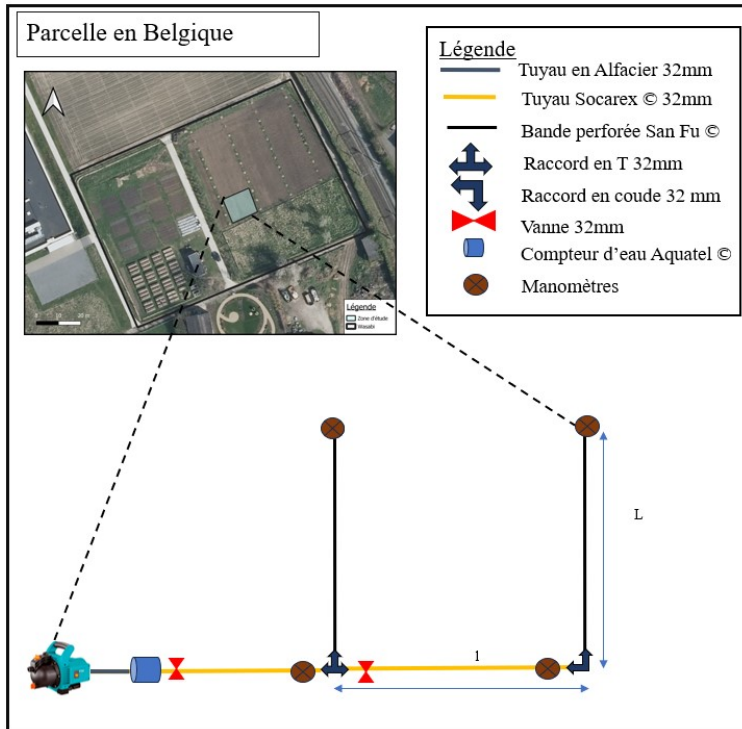


FIGURE 12 – Schéma de dimensionnement du système pour l'expérimentation en Belgique sur la parcelle Wasabi de Gembloux Agro-Bio Tech.

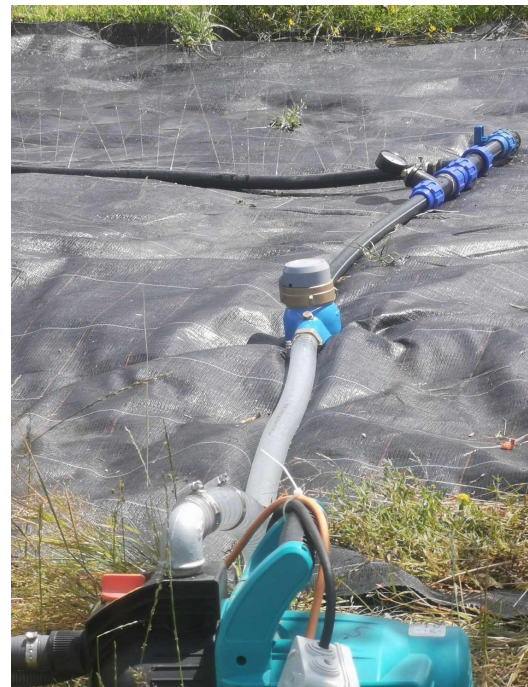


FIGURE 13 – Photographie de la rampe principale du système par bandes perforées installé en Belgique.

### 2.2.3 Matériel de prise de mesure

L'ensemble des mesures de débit, de pression, de vitesse du vent et de température mentionnées et utilisées dans les méthodes décrites ultérieurement est réalisé à l'aide du matériel suivant.

En Belgique, des manomètres de 1/4" de 0 - 2.5 bar à 0.05 bar de graduations sont utilisés dans le système pour l'entièreté des mesures de pression. Leur placement se réalise en amont du té menant à la bande étudiée pour la pression d'entrée (figure 14a) et à l'extrémité pour la pression en fin de bande.

Le débit se mesure systématiquement entre la sortie de pompe et le début du système, à l'aide d'un compteur d'eau Aquatel © (figure 14b). Sa précision est de  $1.10^{-4}$  m<sup>3</sup>.

Un anémomètre est placé à proximité du système en Belgique, sur une structure reprenant également un thermomètre (figure 14c). Ces appareils indiquent par intervalle de 10 minutes les valeurs de la température moyenne, la vitesse de vent moyen ainsi que la valeur de la vitesse du vent maximum, minimum et l'heure à laquelle cela s'est produit. La précision est de  $1.10^{-1}$  °C pour la température et de  $1.10^{-3}$  m/s pour la vitesse de vent.

Au Bénin, des compteurs B-meters © à précision de  $1.10^{-3}$  m<sup>3</sup> sont utilisés à l'entrée des bandes perforées. Des fuites ont été constatées en amont et en aval des compteurs. Leurs valeurs pour les événements d'irrigation réalisés n'ont pas toutes pu être utilisables pour caractériser les systèmes. Pour pallier ce problème, des mesures par empotage sont réalisées. Cette mesure consiste à remplir un contenant de volume connu et en mesurer le temps de remplissage. Elle n'est pas systématiquement fournie pour chaque essai. Concernant les manomètres, aucune valeur n'a pu être mesurée.



(a) Manomètre placé en entrée d'une bande perforée utilisé pour l'expérimentation en Belgique.



(b) Compteur d'eau Aquatel © utilisé pour l'expérimentation en Belgique.



(c) Anémomètre installé pour l'expérimentation en Belgique.

FIGURE 14 – Photographie prise en Belgique d'un manomètre (a), du compteur d'eau (b) et de l'anémomètre (c).

## 2.3 Caractérisation hydraulique des bandes perforées

Pour rappel, une caractérisation hydraulique complète de tuyaux souples consiste généralement en la détermination de la relation entre le débit et la pression des perforations, le coefficient de variation de fabrication  $CV_f$ , la variation du diamètre interne en fonction de la pression, la perte de charge le long du tuyau et dans les perforations et la pression de rupture (ANDRADE, 1990; FRIZZONE & VIEIRA, 1998; MARINHO et al., 1999; MELO et al., 2017; MELO et al., 2019).

Les fournisseurs de matériel indique généralement les caractéristiques de leur produit et les indications sur son utilisation. L'expérimentation, dans ce cas, consiste à vérifier ces indications. Tous les fournisseurs ne donnent cependant pas d'informations rigoureuses les propriétés de leurs produits (SAWA, 2002). Dans le cas des bandes perforées HYB1-3, seule une valeur de débit de 48.6 L/min et de 5 m<sup>2</sup> de couverture sont donnés (SAN-FU, s. d.). Ces indications étant peu développées, il est nécessaire de caractériser les propriétés hydrauliques de base de ces bandes perforées. Une analyse complète nécessite des structures de mesure de laboratoire, en intérieur, tel qu'un banc d'essai (figure 27 en annexe). Dans le cadre du projet, une approche de terrain est voulue, afin de fournir un outil utile à l'ONG ainsi qu'aux producteurs béninois.

Les mesures présentées sont la relation débit - pression, les pertes de charge et la mesure de portée et de distribution de la quantité en eau. Le coefficient de variation  $CV_f$  ne pouvant pas être mesuré dans cette étude mais restant un paramètre important de caractérisation, il est décrit en annexe 5.1.

### 2.3.1 Relation débit - pression

La variation du débit d'une perforation, aussi qualifiée d'«émetteur», peut s'expliquer par la relation 1, une fonction empirique de type puissance exprimant le débit en fonction de la pression de fonctionnement (KELLER & KARMELI, 1974; SOLOMON, 1979; VON BERNUTH & SOLOMON, 1986; FRIZZONE & VIEIRA, 1998; MARINHO et al., 1999; SAWA, 2002; TIERCELIN & VIDAL, 2006).



$$q = k_d * p^x \quad (1)$$

Où  $q$  est le débit ( $\text{m}^3/\text{min}$ ),  $p$  : la pression (bar),  $k_d$  et  $x$  des paramètres de la relation (-).

$x$  décrit la manière dont le débit varie avec la pression et le régime d'écoulement. Au plus  $x$  est élevé, au plus le débit est affecté par la variation de pression. Une valeur proche de 1 donne une représentation linéaire de la relation, où un flux laminaire circule dans le système. Un régime d'écoulement turbulent correspond à une valeur de 0.5, généralement attribuée aux distributeurs de type *orifice*, tel que ceux des bandes perforées.

Dans le cadre de ce travail, il n'est pas possible d'établir directement une relation pour chaque perforation individuellement, mais plutôt pour l'ensemble des perforations présentes sur une bande ayant une certaine longueur. Une hypothèse est donc que le groupe considéré dans la définition de la relation débit – pression a pour nombre l'entièreté des perforations présentes sur la longueur considérée. De cette manière, une relation spécifique est définie pour chaque longueur, tout comme une relation débit - pression l'est pour une perforation.

Cette méthode de mesure permet d'expliquer l'impossibilité de calculer le coefficient de variation  $CV_f$ , présentée en annexe 5.1. De surcroît, cela empêche la prise en compte d'un critère de variation maximale du débit mesuré dans les émetteurs.

Cette mesure est uniquement réalisée en Belgique sur une bande de l'installation (figure 12). Des longueurs de 40, 30, 25, 20, 15, 12 et 10 mètres sont testées. Ces valeurs sont établies sur base des conseils du référentiel PRACTICA, 2018 où l'utilisation de longueur de 50 à 10 mètres sont recommandées. La longueur de 12 m fait référence à celle utilisée au Bénin. Différentes valeurs de débit sont testées pour une gamme de 0.01 à 0.05  $\text{m}^3/\text{min}$  et un minimum de 0.1 bar de pression. La pression maximum va dépendre de ce qui peut être fourni par le débit de la pompe pour les différentes longueurs. Chaque test dure une minute, avec 3 répétitions par point de mesures.

KELLER & KARMELI, 1974 énonce l'existence de variation du facteur  $x$  en fonction du frottement présent dans le tuyau et les perforations. Cette variation le long du tuyau ne peut s'évaluer qu'en mesurant la relation pour chaque émetteur. N'ayant pas la possibilité de le réaliser par la méthode précédemment décrite, une expérimentation alternative est réalisée pour tout de même le considérer. Celle-ci consiste à mesurer la quantité d'eau récoltée entre le début et l'extrémité d'une bande perforée. La longueur et la pression de fonctionnement sont de 20 m et 0.2 bar, réalisée sur la parcelle expérimentale en Belgique (figure 12). Cette mesure permet donc de pallier l'impossibilité de prendre en compte cette variation de caractéristique des émetteurs en fonction du frottement et de l'éloignement à la bande perforée. Cette longueur choisie correspond au maximum pouvant être disposé sur la parcelle pour une telle mesure.

### 2.3.2 Pertes de charge

Un fluide se déplaçant dans un réseau de tuyau subit du frottement tout au long de son déplacement. Cette résistance provoque une diminution de l'énergie accumulée par le fluide, et se traduit par ce qui est qualifié de pertes de charge. Ces pertes induisent une diminution de la pression subie par le fluide. Cette fluctuation de pression ne doit pas dépasser 20% de la pression moyenne requise dans le système (SAWA & FRENKEN, 2001). Les pertes de charges sont de deux types : les pertes majeures dues au frottement induit par le tuyau lui-même et les effets de viscosité du fluide, et les pertes mineures induites par tout changement de section du tuyau et passage dans un raccord ou dans une vanne (ALI, 2011 ; MOTT & UNTENER, 2015). Dans un tuyau ne présentant pas d'éléments intermédiaires, seules les pertes majeures existent.

Les pertes de charge peuvent être exprimées selon les différents facteurs auxquels elles sont affectées (équation 2), soit  $L$  : la longueur du tuyau (m),  $V$  : la vitesse du fluide (m/s),  $D$  : le diamètre du tuyau (m),  $\epsilon$  : la rugosité de la surface interne du tuyau (m),  $\rho$  : la densité du fluide ( $\text{kg/m}^3$ ) et  $\nu$  : la viscosité du fluide ( $\text{kg/m.s}$ ) (ALI, 2011).

$$h_L = f(L, V, D, \epsilon, \rho, \nu) \quad (2)$$

L'équation générale (3) établi par Darcy-Weisbach exprimant le calcul de pertes de charge est communément utilisée et acceptée. Elle considère le frottement d'un flux turbulent dans un tuyau de section transversale circulaire (ALLEN, 1996; BROWN, 2002; ALI, 2011; MOTT & UNTENER, 2015; AHMARI & KABIR, 2019).

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

Où  $f$  est qualifié de coefficient de Darcy-Weisbach ou facteur de frottement dans le tuyau (-),  $L$  : la longueur du tuyau (m),  $D$  : le diamètre (m),  $v$  : la vitesse du fluide (m/s) et  $g$  : l'accélération gravitationnel ( $\text{m/s}^2$ ).

En reformulant cette équation, il est possible de visualiser directement l'implication directe du débit dans le calcul (équation 4).

$$h_L = 8.2652 * 10^{-2} * f * L * \frac{Q^2}{D^5} \quad (4)$$

La mesure expérimentale de  $h_L$  se base sur l'équation générale d'énergie (équation 5), décrite entre deux points fixes du tuyau, soit l'entrée *in* et la sortie *out* :

$$\frac{p_{in}}{\gamma} + \frac{v_{in}^2}{2g} + z_{in} = \frac{p_{out}}{\gamma} + \frac{v_{out}^2}{2g} + z_{out} + h_L \quad (5)$$

Où  $p$ ,  $v$ ,  $z$  et  $h_L$  sont respectivement les expressions de l'énergie de pression, cinétique, potentielle et de pertes de charge dans le fluide.

Cette mesure est généralement réalisée sur banc d'essai. Le tuyau est alors disposé horizontalement, dans un environnement contrôlé. La pression aux deux extrémités du tuyau et le débit sont mesurés. Ces mesures permettent ensuite de poser des hypothèses et de calculer  $h_L$  et  $f$  (AHMARI & KABIR, 2019; SILVA et al., 2022). Les hypothèses posées sont : étant disposé horizontalement,  $z_{in} = z_{out}$ . La vitesse du fluide est également supposée constante :  $v_{in} = v_{out}$ . Le calcul des pertes de charge  $h_L$  se présente comme suit (équation 6) :

$$h_L = \frac{P_{in} - P_{out}}{\gamma} \quad (6)$$

Où le poids spécifique  $\gamma = g * \rho$  ( $\text{kN/m}^3$ ) avec  $g$  : l'accélération gravitationnel ( $\text{m/s}^2$ ) et  $\rho$  : la masse volumique fluide ( $\text{kg/m}^3$ ).

La mesure des pressions aux deux extrémités du tuyau permettent de déterminer  $P_{in}$  et  $P_{out}$ .

En réalité, la perte de charge dans un tuyau perforé n'est pas uniquement calculée par  $h_L$ . En effet, dans un tuyau à sorties latérales multiples équidistants et fermé à l'extrémité, le débit est

permanent et spatialement varié. La perte de charge pour ce type de tuyau, décrite par le terme  $h_f$ , est inférieure à celle se produisant dans un tuyau sans sorties latérales transportant, de toute sa longueur, un débit constant, soit  $h_L$  (CHRISTIANSEN, 1942 ; SCALOPPI & ALLEN, 1993 ; MARTINS, 2017).

CHRISTIANSEN, 1942, étudiant l'irrigation par aspersion, a développé une méthode pour calculer les pertes de charge dans un tuyau à sorties latérales multiples, ayant un asperseur ou une buse sur ces sorties. Le principe est applicable aux perforations, l'eau s'échappant simplement directement de la sortie, sans passer par l'intermédiaire d'organe d'aspersion complexe. Le terme de « sortie » employé par l'auteur correspond au terme de « perforation » utilisé pour la bande perforée.

Il indique que la perte de charge totale dans un tuyau à sorties latérales multiples est censée être égale à la somme des pertes calculée entre chaque sortie. À savoir que le débit à chaque sortie équidistante d'un même tuyau est égal. Il vaut donc le débit total dans le conduit principal divisé par le nombre de sorties.

L'auteur a ensuite développé un moyen de calculer ces pertes de charge sur base d'un tuyau sans sorties. Pour cela, il a effectué le calcul dans ce tuyau, qui transporte donc entièrement le débit. Il a ensuite effectué un rapport entre les calculs de pertes de charge sur les deux tuyaux (avec et sans sorties). Ce rapport a permis d'obtenir un facteur  $F$ , à multiplier à la valeur de la pertes de charge dans un tuyau *sans sorties* pour avoir la perte d'un tuyau *avec sorties*. Ce facteur va donc en grande partie dépendre du nombre de sorties considérées dans le conduit.

En d'autres termes,  $F$  tient compte de l'effet de réduction du débit sur toute la longueur d'une conduite fermée à son extrémité ayant plusieurs sorties latérales équidistantes. Le débit  $y$  est constant et le facteur permet de faire le lien entre  $h_f$  et  $h_L$ . La variation de pression dû à cette perte de charge  $h_f$  est dans ce cas une fraction  $F$  de la perte de charge totale  $h_L$  (équation 7) (CHRISTIANSEN, 1942 ; SCALOPPI & ALLEN, 1993).

$$h_f = F * h_L \quad (7)$$

$F$  et  $h_L$  sont mesurés séparément en laboratoire, sur des structures de tests, où  $h_L$  se réalise en colmatant les perforations du tuyau.  $F$  est progressivement calculé selon un certain nombre de perforations. Ces structures, généralement qualifiées de banc d'essai, ne pourront pas être utilisées dans le cadre de ce travail. Une adaptation est alors réalisée : la différence de pression entre l'entrée et l'extrémité de la bande est mesurée et permet un calcul direct de  $h_f$ . Les deux inconnues qui dépendent du tuyau étant  $f$  et  $F$ , ces deux valeurs ne pourront pas être déterminée séparément. En reformulant l'équation 7 par l'équation 8, il est possible de poser une hypothèse simplificatrice qui consiste à directement calculer le produit  $f * F$ , en considérant l'équation 3 de Darcy-Weisbach présentée précédemment.

$$h_f = F * f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (8)$$

En mesurant la différence de pression entre l'entrée et la sortie du tuyau pour une longueur choisie, étant un tuyau à sorties latérales multiples,  $h_f$  peut être calculé. Cependant, la distinction entre  $f$  et  $F$  ne peut pas être établie. Afin de tout de même permettre une analyse de la mesure de la différence de pression et du calcul de  $h_f$ , la solution suivante est proposée. N'ayant ni une valeur de  $F$  de base, ni la valeur du  $f$  propre au tuyau, des comparaisons avec des équations théoriques et des méthodes empiriques sont utilisées.

Ces deux comparaisons sont : (1) Effectuer un calcul théorique du coefficient  $f$ , à partir d'équations établies par la littérature, selon le régime d'écoulement du fluide. Ce calcul sera comparé au

produit  $f * F$  réellement obtenu. En effectuant le rapport entre les deux, il pourrait être possible de donner une idée de la valeur de  $F$ . En effet,  $F$  est propre à un nombre de perforations considéré, et donc, d'une certaine longueur de tuyau. (2) Comparer la valeur de perte de charge  $h_f$  mesurée directement par celle d'un autre modèle de tuyau perforé. Le modèle en question est le tuyau Santeno I de la marque Santeno ©. Les équations nécessaires au calcul de  $h_f$  pour ce tuyau sont déterminées empiriquement par MARTINS, 2017, MELO et al., 2017 et MELO et al., 2019.

### Comparaison des mesures et calculs

**(1) Comparaison de  $f$ .** Les paragraphes suivants reprennent les équations théoriques communément utilisées qui permettent de calculer  $f$  dans les tuyaux. Ces équations dépendent du régime d'écoulement.

L'équation (9) de Hagen-Poiseuille est utilisée pour le régime d'écoulement laminaire, ne liant  $f$  qu'au nombre de Reynolds.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (9)$$

Concernant les flux turbulents, il est couramment mentionné l'utilisation de l'équation d'une forme similaire à celle de Blasius (1913) (équation 10).

$$f = k * Re^{-0.25} \quad (10)$$

Où  $k$  est déterminé à 0.3164 par cet auteur. Celle-ci est adaptée pour des tuyaux lisses de petits diamètres avec l'utilisation du nombre de Reynolds  $Re$ . Le facteur  $k$  varie selon le type de tuyau et les études empiriques réalisées (Juana et al., 2002; Cardoso et al., 2008 cités par MELO et al., 2019; PROVENZANO & PUMO, 2004; BROWN, 2002; BERNUTH & WILSON, 1989). Afin d'éviter toute confusion concernant ce facteur, l'équation de Swamee et Jain (1976) (équation 11), basée sur celle de Colebrook-White (1937) est utilisée. Elle est considérée comme avancée sur Blasius (1913), étant utilisable pour tout type de rugosité de tuyau (ALLEN, 1996; BROWN, 2002; MASHALKAR & NAGDEWE, 2021).

$$f = 0.25 \left[ \log \left( \frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^{-2} \quad (11)$$

Où  $\epsilon$  correspond à la rugosité du tuyau (m), déterminée à  $8.116 * 10^{-6}$  m (ROCHA et al., 2017; MELO et al., 2019),  $D$  : le diamètre interne (m),  $Re$  : le nombre de Reynolds (-). La relation  $\frac{\epsilon}{D}$  est la rugosité relative.

Le nombre de Reynolds (1883) se calcul comme suit :

$$Re = \frac{v * D}{\nu} \quad (12)$$

Où  $\nu$  est la viscosité cinématique ( $m^2/s$ ) du fluide,  $v$  : la vitesse du fluide (m/s), obtenue à l'aide de mesures du débit et  $D$  : le diamètre du tuyau (m).

**(2) Comparaison de  $h_f$ .** Les paragraphes qui suivent présentent les équations établies pour le tuyau perforé Santeno I de la marque Santeno ©. Ce sont donc ces équations qui sont utilisées pour la comparaison de la mesure de  $h_f$ .

L'étude menée par MELO et al., 2019 a permis d'établir une relation entre la perte de charge unitaire  $J$  (m/m) et le débit  $q$  (m<sup>3</sup>/s) dans un tuyau sans perforation Santeno I, à partir de la valeur de la pression d'entrée  $H0$  (m) (équation 13).

$$J = 97265 * q^2 * H0^{-0,279} \quad (13)$$

Pour appliquer l'équation 13, il est nécessaire d'obtenir la valeur du débit pour la pression considérée. Tel que mentionné précédemment, dans un tuyau perforé, la pression dans une perforation dépend du débit selon la relation 18. Naturellement, cette relation propre à Santeno I a été déterminée par l'étude de MELO et al., 2017 fournissant la relation empirique 14. Cette relation permettra de calculer le débit de ce tuyau, nécessaire pour effectuer la comparaison entre le HYB1-3 et le Santeno I pour une même pression.

$$q = 1.0437 * p^{0,6411} \quad (14)$$

Elle lie donc le débit  $q$  (l/h) à la pression  $p$  (m.c.a) pour une paire de perforation du tuyau Santeno I. Une paire est considérée car la relation débit - pression est normalement effectuée par émetteur (perforation). Le tuyau Santeno I présente une paire de perforation par tranche de 15 cm, la relation établie est alors propre à cette paire, et non une seule perforation.

Une fois le débit calculé pour une paire à l'aide de l'équation 14, celui-ci peut être multiplié par le nombre de paires présentes pour la longueur de tuyau considérée ( $L$ ). Ensuite, la perte de charge totale  $h_L$  pour  $L$  s'obtient à partir de la perte de charge unitaire  $J$  de l'équation 13. MARTINS, 2017 a déterminé le coefficient  $F$ , repris dans le tableau 13 en annexe, qui dépend du nombre de perforations présentes sur  $L$ . La perte de charge  $h_f$  pour Santeno I peut alors être déterminée par le produit de  $h_L$  et de  $F$  (équation 7).

## Mesures en place

L'expérimentation se réalise en Belgique (figure 12) où la mesure de pression par manomètre au début et à l'extrémité d'un tuyau perforé de 50, 40 et 30 m est réalisée. Ensuite, une fois la perte de charge  $h_f$  calculé par cette différence de pression, le produit  $f * F$  est établi. Les comparaisons (1) et (2) sont ensuite effectuées. La figure 15 présente un récapitulatif de l'étude des pertes de charge.

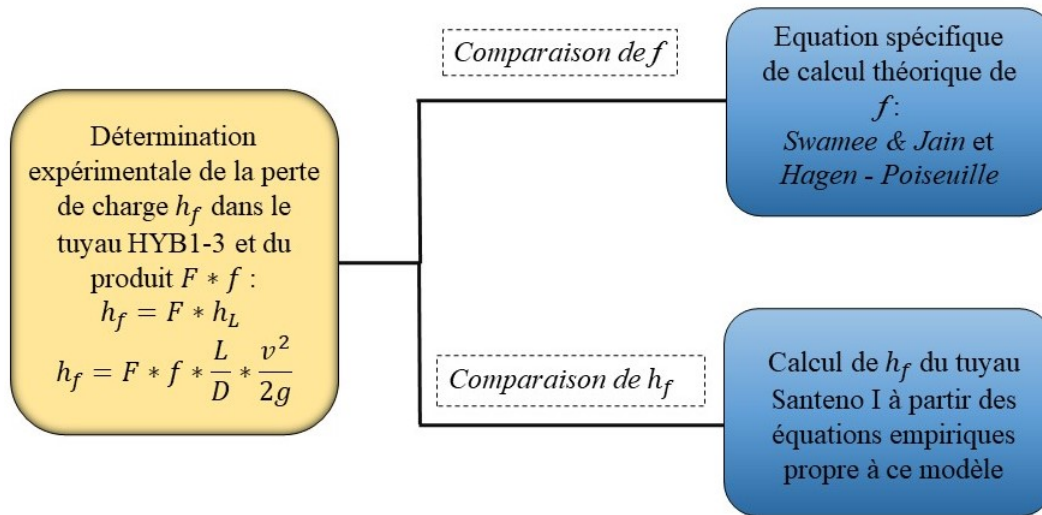


FIGURE 15 – Récapitulatif des mesures et comparaisons effectuées pour l’étude des pertes de charge caractéristique de la bande perforée San Fu ©.

### Particularité de la variation du diamètre

Le diamètre de ces tuyaux en polyéthylène flexible à parois mince varie en fonction de la variation de la pression le long du tuyau, ce qui influence les paramètres dépendant du calcul des pertes de charge (Vilela et al., 2003 ; Provenzano et al., 2016 cités par MELO et al., 2019 ; BAILEY, 1975 ; ANDRADE, 1990 ; MARINHO et al., 1999). Il a été observé une augmentation de 10.67 % du diamètre intérieur d’un tuyau en polyéthylène testé avec une pression de 90 % dans la plage de fonctionnement recommandée par le fabricant. Cette variation peut réduire la perte de charge qui s’y produit jusqu’à 60 % selon ANDRADE, 1990. Une gamme de variation de 1.2 mm du diamètre entre des pressions à 0.2 et 0.8 bar a été mesuré par MARINHO et al., 1999 pour un tuyau de matière similaire de la marque Santape ©. La variation impacte la perte de charge s’y produisant. Cependant, ne pouvant pas être déterminée pour le tuyau HYB1-3 dans cette étude, elle est donc négligée. Il est important de comprendre que son impact est une réduction de la contrainte. Les résultats sont alors basés sur une situation de dimensionnement sécuritaire.

### 2.3.3 Mesure de distribution de la quantité en eau et portée

La différence de pression à l’interface de la perforation permet l’expulsion du jet d’eau. Celui-ci se casse à un point de rupture à distance de la bande et retombe ensuite en gouttes d’eau sur la parcelle. Ce point et la taille des gouttes est fonction de nombreux facteurs tels que la taille de la perforation, la pression dans la bande, les turbulences dans le flux d’eau ou bien la présence d’air dans le système (CARRIÓN et al., 2001 ; TRETTEL & EZEKOYE, 2015).

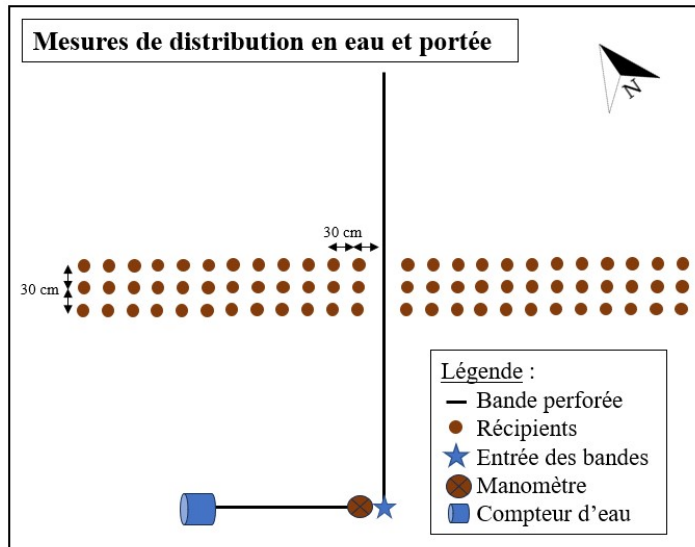
La pression de fonctionnement dans le système, et de surcroît, le débit, influence la forme sous laquelle l’eau s’évacue des perforations (MERRIAM & KELLER, 1979 ; TRETTEL & EZEKOYE, 2015). MERRIAM & KELLER, 1979 indique que le jet d’eau ne se brise pas suffisamment à faible pression. A l’inverse, des pressions élevées produisent des gouttelettes d’eau de petit diamètre dont la trajectoire est particulièrement sensible au vent.

La distribution de la quantité en eau consiste en une mesure du taux d’application de l’eau de la bande perforée en mm/h selon la distance à la bande (ANDRADE, 1990 ; MARTINS, 2017). Trois rangées d’un maximum de 24 récipients par rangée et répartis des deux côtés en milieu des bandes

sont utilisés (figure 16). Ceux-ci sont espacés de toute part de 30 cm. Le point de référence pour la distance est le centre du récipient.

Trois répétitions de 20 minutes d'irrigation par valeurs de pression de 0.2, 0.3, 0.4 et 0.6 bar sont réalisées pour une bande. Les récipients sont ensuite pesés par balance électronique de précision de 1 g et la masse est convertie en taux d'application. La hauteur maximale du jet d'eau est également mesurée par règle métallique à 3 répétitions par pression de fonctionnement. La mesure est idéalement réalisée en intérieur ou en laboratoire, évitant l'influence du vent (MARINHO et al., 1999, TRETTEL & EZEKOYE, 2015), ce qui n'est pas le cas dans cette étude. Une observation supplémentaire concernant la vitesse et la direction du vent est alors effectuée.

Suite aux résultats obtenus pour une bande, il a été possible de choisir les pressions de 0.2 et 0.4 bar à mesurer pour l'ajout d'une bande supplémentaire. Afin d'étudier deux dispositions différentes, 2.4 et 4 m d'espacement sont établis. Respectivement, cela représente l'espacement au Bénin (2.5 m) et l'espacement maximal recommandé par PRACTICA, 2018 (4 m). Les récipients sont disposés tous les 30 cm, ce qui correspond à précisément 2.4 m, au lieu de 2.5 m.



(a) Schéma de la disposition des récipients pour la mesure de la distribution en eau et de la portée pour une bande en Belgique.



(b) Photographie de la disposition des récipients sur le terrain pour la mesure de distribution en eau et de la portée pour une bande en Belgique.

FIGURE 16 – Schéma de la disposition des récipients pour la mesure de la distribution en eau et photographie sur la parcelle en Belgique.

## 2.4 Évaluation des systèmes

Tel que mentionné précédemment, l'évaluation globale des systèmes dans le cadre de cette étude implique la mesure de la quantité d'eau effectivement appliquée sur la parcelle ainsi que l'uniformité de sa distribution

En effet, malgré les niveaux de performance relativement intéressants pouvant être fournis par

l'utilisation des systèmes d'irrigation, il existe inévitablement des pertes d'eau dues à l'évaporation, au ruissellement, à la percolation profonde, à la dérive des gouttes d'eau dû au vent ainsi qu'à l'acheminement de l'eau depuis l'exhaure. Ces pertes peuvent se retrouver relativement importantes dans des zones présentant certaines conditions climatiques extrêmes, tel qu'une vitesse de vent et des températures élevées, un rayonnement important et une faible humidité (MERRIAM & KELLER, 1979; MONIRUZZAMAN et al., 2011; DARKO et al., 2017).

Un moyen de les quantifier réside dans la mesure de l'efficacité d'irrigation. En réalité, il existe plusieurs types, et donc différentes définitions de l'efficacité, selon l'objectif recherché. Dans le cadre de cette étude et de la méthode d'écrite ultérieurement, celle mesurée est donc l'efficacité d'application, qui désigne ici la différence entre la quantité d'eau amenée par le système et celle effectivement présente pour la plante dans la zone racinaire (BURT et al., 1997; JENSEN, 2007; CAUSAPÉ et al., 2006).

Pour assurer une irrigation et une efficacité d'application du système la plus efficace et performante possible, l'uniformité de l'application de l'eau dans le sol, exprimée en pourcentage, doit être la plus proche des 100%. Tout en sachant que tout type de système d'irrigation est fondamentalement non-uniforme en termes d'application de l'eau. Cet objectif d'uniformité doit être réalisé en adéquation avec les besoins en eau brutes des cultures irriguées. La qualité de la distribution de l'eau d'un système par aspersion a un impact proportionnel sur le rendement de culture. Dans le cas d'une faible distribution, il en résulte un déficit en termes de rendement cultural, dû au stress hydrique d'un potentiel manque d'eau. A l'inverse, en appliquant une quantité d'eau d'irrigation excessive pour combler une faible uniformité, un important lessivage des nutriments pourrait également avoir lieu. De manière générale, l'uniformité d'irrigation détermine en partie la relation entre la quantité d'eau appliquée et la quantité de déficit en eau que certaine partie de la parcelle recevrait (CLEMMENS, 1991; BURT et al., 1997; CLEMMENS, 1991; BURT et al., 1997; ZANON et al., 2000; ASCOUGH & KIKER, 2002).

Cette section décrit les méthodes utilisées pour ces deux mesures, appliquées au Bénin et en Belgique.

#### 2.4.1 Mesure de l'efficacité d'application

La différence de quantité d'eau mentionnée précédemment peut provenir de deux facteurs principaux. Ceux-ci sont les pertes d'évaporation des gouttelettes d'eau durant leur trajet aérien et de dérive du vent avant qu'elles n'atteignent la surface. Ces deux termes peuvent être rassemblés et qualifiés de DVPE (dérivé liée au vent et pertes par évaporation). La DVPE est exprimée en termes de pourcentage de la quantité d'eau brute amenée par le système et peut atteindre 2% à 40% de pertes, ou plus, sur des essais de terrain (KOHL et al., 1987; PLAYÁN et al., 2005; DE WRACHIEN & LORENZINI, 2006; HENDAWI, 2006). Une majorité de ce pourcentage est généralement compris entre 10 à 20%. Des mesures de laboratoire indique cependant des valeurs dans une gamme de 1 à 2% (KOHL et al., 1987). Il existe également des pertes d'évaporation au niveau des surfaces humide durant et suivant les événements d'irrigation (CLEMMENS, 1991).

La mesure de la DVPE est une procédure complexe, due notamment à la présence de nombreux paramètres reliés les uns aux autres. La vitesse de vent y joue le rôle le plus important, conjointement à l'humidité de l'air, la température de l'eau et de l'air, la taille des gouttes et le diamètre de l'organe asperseur (MERRIAM & KELLER, 1979; SMAJSTRLA & ZAZUETA, 2003; PLAYÁN et al., 2005; DE WRACHIEN & LORENZINI, 2006; LORENZINI, 2006). Le tableau 16 en annexe élaboré par PLAYÁN et al., 2005 permet un aperçu des facteurs mentionnés dans la littérature.

Une mesure directe de cette évaporation peut se réaliser par utilisation de récipients pour mesurer



la quantité d'eau arrivant sur le sol depuis un asperseur, comparativement à la quantité d'eau s'échappant de l'asperseur (CLEMMENS, 1991 ; CARRIÓN et al., 2001 ; DE WRACHIEN & LORENZINI, 2006). PLAYÁN et al., 2005 indique que le diamètre des récipients doit être supérieur à 85mm, ce qui est le cas pour cette étude. Ayant la présence d'un compteur en sortie de pompe, celui-ci permet de prendre connaissance de l'entièreté du volume l'eau censé atteindre la parcelle.

Le calcul de la DVPE (%) se réalise à l'aide de l'équation 15 :

$$DVPE = 100 * (1 - \frac{\sum_{i=1}^n V_i \frac{A_g}{A_b}}{V_B}) \quad (15)$$

Où  $V_i$  correspond à la quantité ( $m^3$ ) reçu dans chaque récipient, pesée par balance,  $A_g$  : la surface du récipient ( $m^2$ ),  $A_b$  : la surface représentée par le récipient dans le réseau ( $m^2$ ) et  $V_B$  : le volume qui s'écoule de la bande perforée ( $m^3$ ).

Les valeurs de DVPE obtenues en Belgique sont ensuite comparées graphiquement aux valeurs de vitesse de vent, de pression de fonctionnement et de température moyenne enregistré. Une analyse statistique est réalisée, par le calcul du coefficient de corrélation de Pearson et de Spearman entre ces variables. Ils permettent respectivement d'évaluer la relation linéaire et monotone entre deux variables<sup>3</sup>. La première signifie que la modification d'une variable engendre une modification proportionnelle de l'autre variable. Tandis que la seconde est similaire mais non-proportionnelle. Leur coefficient a pour valeur  $[-1,1]$ , où 0 indique que les variables sont indépendantes entre elles. Une forte corrélation n'étant pas nécessairement statistiquement significative, les résultats des p-valeurs sont également présentés aux coefficients (REBEKIĆ et al., 2015).

Concernant les mesures au Bénin, la valeur de température fournie par climate-data.org<sup>4</sup> pour la ville de Drè, située à 28 km d'Athiéme, ont été utilisés. Les valeurs maximales sont considérées, les essais étant réalisés en début d'après-midi. Des données d'évapotranspiration de référence (ET0) mensuelles sont utilisées afin de permettre la comparaison du DVPE enregistré dans les deux pays, aux périodes d'essais. Les données au Bénin sont tirées de la database WaPOR<sup>5</sup>, « The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) portal to monitor Water Productivity through Open access of Remotely sensed derived data » (FAO, 2020). L'ET0 est calculée depuis l'équation de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) mise en oeuvre depuis un point de vue de télédétection, à résolution de pixel de 100 m. Celles de Belgique proviennent de l'Institut royale météorologique (IRM)<sup>6</sup> fournies par Gembloux Agro-Bio Tech, par jour pour les périodes de 1980 à 2020.

## 2.4.2 Mesure de l'uniformité de distribution en irrigation

### Paramètres d'uniformité

Le coefficient  $CU$  de CHRISTIANSEN, 1942 est le plus utilisé et le plus accepté pour définir l'uniformité (ASAE 1993a et Zoldoske et al., 1994, cité par ASCOUGH & KIKER, 2002 ; PITTS et al., 1996 ; WU & BARRAGAN, 2000 ; HOWELL, 2003). Celui-ci se détermine à l'aide d'un réseau de récipients. Il est calculé depuis l'équation 16.

3. <https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/21/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/correlation-and-covariance/a-comparison-of-the-pearson-and-spearman-correlation-methods/>, consulté le 29/07/23.

4. <https://fr.climate-data.org/afrique/benin/mono-1335/>, consulté le 01/08/23

5. [https://wapor.apps.fao.org/home/WAPOR\\_2/1](https://wapor.apps.fao.org/home/WAPOR_2/1)

6. <https://www.meteo.be/fr/a-propos-irm/introduction>

$$CU = 100 * \left( 1 - \frac{\sum_n |D_s - \bar{D}|}{n * \bar{D}} \right) \quad (16)$$

Où  $D_s$  correspond à la hauteur d'eau retrouvée dans le récipient (mm),  $\bar{D}$  : la moyenne de la hauteur d'eau sur l'entièreté des contenants (mm) et  $n$  : le nombre de récipients utilisé (-).

La distribution de l'uniformité  $DULq$  est également prise en compte, étant le ratio entre la moyenne du quartile inférieur moyen de la hauteur d'eau et la hauteur moyenne de toute la distribution (équation 17). Le quartile inférieur représente la moyenne des hauteurs d'eau accumulées du quart de la parcelle ayant reçu les hauteurs les plus faibles. Ce choix est effectué pour caractériser les valeurs critiques en irrigation (ASCE, 1978 cité par ASCOUGH & KIKER, 2002; MERRIAM & KELLER, 1979; PITTS et al., 1996; BURT et al., 1997).

$$DULq = \frac{\bar{q}_1}{\bar{D}} \quad (17)$$

Où  $\bar{q}_1$  est la moyenne du quartile inférieur (mm).

Dans le cas d'une distribution normale de la population, la distribution en eau sur la parcelle peut être exprimée statistiquement par le coefficient de variation  $CV$  (équation 18), exprimant la déviation standard (WU & BARRAGAN, 2000; ASCOUGH & KIKER, 2002).

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{D}} \quad (18)$$

Où  $\sigma$  est l'écart type.

Un  $CU$  de 100% indique que chaque point de mesure de la zone irriguée reçoit la même quantité d'eau. SAWA & FRENKEN, 2001 conseil l'utilisation d'asperseur avec un  $CU$  de minimum 85%. Un  $DULq$  de 100%, indique que 25% des quantités les plus faibles rencontrées sur la parcelle ont reçu 100% de la valeur moyenne rencontrées sur la zone. PITTS et al., 1996 définit une valeur standard de  $DULq$  de 75% pour les systèmes par aspersion, et ASCOUGH & KIKER, 2002 précise que des valeurs de  $DULq$  inférieur à 60 % indique qu'une sous-irrigation a lieu sur la zone irriguée. Le coefficient de variation  $CV$  indique la dispersion des valeurs par rapport à la moyenne. Il doit être le moins élevé possible, généralement  $< 10$  % pour une bonne distribution. A noter qu'il existera inévitablement des variabilité des paramètres entre chaque mesures réalisée sous des conditions identiques (BURT et al., 1997).

## Mesures en place

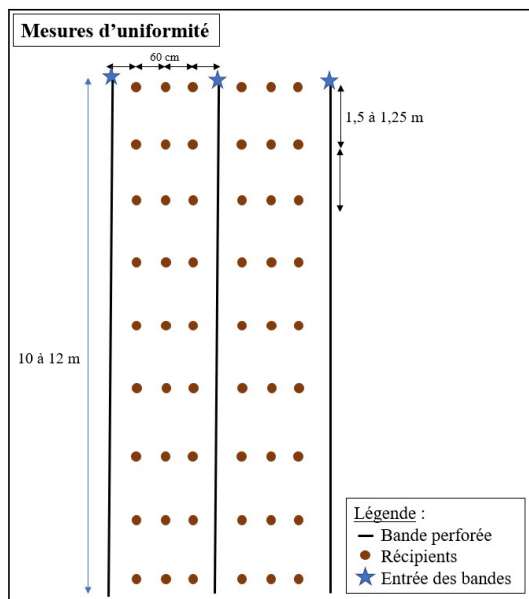
L'utilisation d'un réseau de récipients pour la mesure de la distribution d'uniformité des systèmes utilisant des asperseurs est largement mentionnée dans la littérature (CHRISTIANSEN, 1942; MERRIAM & KELLER, 1979; CLEMMENS, 1991; BURT et al., 1997; ZANON et al., 2000; WU & BARRAGAN, 2000; CARRIÓN et al., 2001; ASCOUGH & KIKER, 2002). Leur espacement doit respecter des distances égales entre les récipients (CLEMMENS, 1991). Selon les références, la possibilité d'utiliser ces récipients pour mesurer l'uniformité du système par bande perforée n'est pas défini, tant concernant le nombre et la disposition de ceux-ci. Une adaptation entre les conditions pour les systèmes par aspersion avec asperseurs et les possibilités sur les bandes perforées sur le terrain a été réalisée.

Certains auteurs placent les systèmes d'irrigation selon trois types principaux : localisés ou micro-irrigation, par aspersion, prenant surtout en compte les asperseurs, et de surface. De manière

générale, pour les deux premiers types de système, ils mentionnent, respectivement, la mesure des débits de groupes d'émetteurs sur l'entièreté du système, en lien avec la section 2.3.1, et la mesure de l'eau récoltée dans un réseau de récipients (MERRIAM & KELLER, 1979; BOS & NUGTEREN, 1990; BURT et al., 1997; WU & BARRAGAN, 2000).

Un réseau de récipients est alors installé. Dans un premier temps, ces récipients sont respectivement des seaux de cinq litres au Bénin, d'une hauteur de 21 cm. Il existe cependant des erreurs possibles de mesure par l'utilisation de récipients d'une hauteur trop importante par rapport à la hauteur minimale du jet qui peut se produire depuis la bande. Afin de minimiser cette erreur, tout en permettant l'utilisation des récipients, des contenants sous forme de bol de 5 cm de hauteur pour un même diamètre sont utilisés en Belgique. La figure 16b illustre ces récipients.

La disposition adoptée pour la mesure de l'uniformité (figure 17a) se réalise entre trois bandes perforées, à raison de trois récipients entre les bandes. L'espacement entre les seaux varie selon les espacements testés entre les bandes, étant à 2.5 m au Bénin (figure 17b), permettant de respecter le même nombre de récipients utilisé pour les deux configurations au Bénin et en Belgique.



(a) Schéma de la disposition des récipients pour la mesure de l'uniformité de la distribution de l'eau.



(b) Photographie de la disposition des récipients sur le terrain pour la mesure de l'uniformité au Bénin.

FIGURE 17 – Schéma de la disposition des récipients pour la mesure l'uniformité de la distribution de l'eau et photographie sur une parcelle au Bénin.

Au Bénin, les producteurs utilisent l'entièreté de leurs bandes perforées simultanément, soit entre 8 à 12 bandes selon les parcelles installées. La mesure uniquement à partir de trois bandes, bien que ne prenant pas en compte entièrement toute la parcelle irriguée, permet tout de même d'effectuer des blocs de mesure comparables entre eux.

Le calcul des paramètres d'uniformité est également réalisé pour déterminer la longueur d'espacement idéale déterminée par les mesures de distribution en eau. En Belgique, la longueur est de 12 mètres de bandes perforées. Elle permet d'entrer en adéquation avec les limites disponibles de la parcelle mise à disposition, ainsi que de réaliser des mesures dans des conditions de dimensionnement semblables au Bénin.

## Facteurs affectant l'uniformité

Les perturbations liées à la vitesse et la direction du vent, ainsi que la variation de pression dans le système font parties des facteurs qui impactent la distribution de l'eau dans la pratique de l'aspersion. Au plus les gouttes d'eau sont fines et la trajectoire de celles-ci sur la parcelle est importante, au plus sensible est le système face à ce phénomène (PITTS et al., 1996 ; BURT et al., 1997 ; CARRIÓN et al., 2001 ; ASCOUGH & KIKER, 2002 ; DE WRACHIEN & LORENZINI, 2006 ; TIERCELIN & VIDAL, 2006). Telles que pour la mesure de la distribution en eau, une observation supplémentaire sur la vitesse et la direction du vent est effectuée.

## 2.5 Dimensionnement et installation

En général, le raisonnement à suivre pour le dimensionnement d'un système d'irrigation consiste à calculer la pression et le débit requis pour un fonctionnement adéquat du système. Ensuite, une pompe adaptée à ces conditions est choisie (ALI, 2011 ; MOTT & UNTENER, 2015). Dans le cadre de l'étude, la pompe des producteurs est directement utilisée, ce qui permet de réaliser un raisonnement inverse. Après avoir acquis la connaissance des propriétés hydrauliques et des critères de dimensionnement, le dimensionnement général du système est effectué. Celui-ci prend en compte les pompes des producteurs et est adapté aux conditions du milieu.

Une pompe est un dispositif permettant la conversion d'énergie mécanique en énergie de pression. Dans le cadre de l'irrigation, les pompes transfèrent l'eau d'un point inférieur à un point supérieur et ajoutent de la pression. Dans le cadre de ce travail, l'objectif est l'acheminement de l'eau de surface d'un bas-fond vers un système d'irrigation pressurisé. La plupart des pompes utilisées sont de type cinétique et volumétrique, dont le type le plus fréquemment utilisé est la pompe centrifuge (ALI, 2011 ; MOTT & UNTENER, 2015).

La pompe doit être installée au plus proche de la source, sur un support rigide afin d'éviter un maximum les vibrations et contraintes externes pouvant être subies tout en étant accessible pour l'utilisation et la maintenance. Au Bénin, les producteurs amènent leur pompe dans le bas-fond (figure 3), afin d'avoir la possibilité de placer le tuyau d'aspiration à une certaine profondeur, tout en utilisant le tuyau le plus court possible, offrant ainsi une utilisation optimale (ALI, 2011). L'accessibilité de la pompe est alors réduite et elle doit être amenée progressivement vers les zones plus profondes du bas-fond, au fur et à mesure de son assèchement. Ce déplacement est à prendre en compte dans les calculs de pertes de charge, la distance de la pompe à l'entrée du système pouvant varier de plusieurs dizaines de mètres.

En connaissant la position de la pompe des producteurs et des systèmes sur leur terrain, la puissance requise pour utiliser le système à la pression de fonctionnement désirée et la puissance maximale de la pompe définie par le fournisseur, il est possible de poser les limites de dimensionnement du système.

Les étapes à réaliser sont (1) calculer la pression au point le plus éloigné du système et s'assurer qu'il correspond à la pression désirée. Ce calcul se réalise à partir de l'équation générale d'énergie (équation 5) appliquée entre les points d'intérêt. (2) Calculer la somme des pertes sur l'entièreté du système et la hauteur manométrique totale  $h_a$  relative à la pompe, ainsi que la puissance à fournir  $P_I$ . (3) Comparer cette valeur de puissance avec celle fournie pour chaque pompe. (4) Adapter le dimensionnement en fonction du résultat de l'étape (3).

Les éléments de l'étape (2) se calcul comme suit : la hauteur manométrique totale  $h_a$  (m) nécessaire pour le fonctionnement des systèmes est déterminé par l'équation 19.

$$h_a = \frac{p_A - p_B}{\gamma} + \frac{v_B^2 - v_A^2}{2g} + z_B - z_A + h_L \quad (19)$$

Où  $h_L$  correspond aux pertes de charge dans le système,  $p_B$  : la pression requise au point le plus éloigné du système (Pa), la dénivellation entre le niveau d'exhaure  $z_A$  (m) et le point le plus élevé sur le terrain  $z_B$  (m).  $A$  étant la source, et  $B$ , le point de destination (MOTT & UNTENER, 2015).

En connaissant  $h_a$  ainsi que le débit  $Q$  dans le système ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), la puissance ajoutée au fluide  $P_A$  (kW) peut être calculée par l'expression 20.

$$P_A = Q * \gamma * h_a \quad (20)$$

Il existe cependant des pertes inévitables dans la pompe, dues aux frottements mécaniques et à la turbulence créée par le fluide s'écoulant. Ces pertes engendrent une puissance nécessaire pour le fonctionnement de la pompe supérieur à la quantité à amener au fluide. En considérant une valeur d'efficacité de la pompe  $e_M$ , la puissance  $P_I$  (kW) fournie par la pompe peut alors être calculée par l'équation 21 (ALI, 2011).

$$P_I = \frac{P_A}{e_M} \quad (21)$$

Cette valeur de  $P_I$  peut ensuite être utilisée pour le dimensionnement, en comparaison avec la valeur de puissance de la pompe communiquée par le fournisseur.

L'efficacité  $e_M$  d'une pompe centrifuge dépend de sa taille et du modèle. Cette valeur peut cependant être considérée entre 70 et 80 % selon ALI, 2011. Étant donné l'absence d'informations précises concernant cette valeur pour les différentes pompes au Bénin, une valeur de 70% est sélectionnée. De plus, SAWA & FRENKEN, 2001 mentionne une marge de 20% à prévoir concernant les pertes occasionnées par le transfert de la puissance à la pompe. Cette approche permet de prendre en compte une situation la plus contraignante. Les informations générales sur les pompes des trois producteurs sont reprises en annexe (tableau 14). Les références consultées pour les trois pompes présentées proviennent respectivement de [honda-engine.com](http://honda-engine.com)<sup>7</sup>, le manuel d'utilisation ROBIN AMERICA, 2001 et [sminter.com](http://sminter.com)<sup>8</sup>.

Différents scénarios de dimensionnement sur les systèmes installés au Bénin sont présentés dans le cadre de ce travail. Ceux-ci se basent principalement sur l'espacement des bandes et la pression considérée : (1) l'espacement déjà en place (2.5 mètres) et la pression conseillée pour cette valeur. (2) L'espacement et la pression idéal déterminé par les mesures de distribution en eau et d'uniformité. Pour ces deux types, un nombre et une longueur maximale de bande sont calculés.

## 2.6 Tableau récapitulatif des mesures

Le tableau 1 reprend de manière simplifiée les installations et mesures effectuées en Belgique et au Bénin. Le matériel nécessaire est également repris.

7. <https://www.honda-engines-eu.com/fr/produits/moteurs/gx160>, consulté le 30/04/23

8. [http://www.smtinter.com/pdf/export\\_pdf\\_sub\\_category.php?gid=109](http://www.smtinter.com/pdf/export_pdf_sub_category.php?gid=109), consulté le 30/04/23

TABLEAU 1 – Tableau récapitulatif des installations et mesures effectuées en Belgique et au Bénin pour cette étude.

Installations et mesures		Bénin	Belgique	Matériel utilisé
<b>Installations</b>		4 parcelles de 380, 380, 270 et 240 m <sup>2</sup> équipées	Système simplifié à deux bandes	Matériel d'installation*
<b>Mesures directes</b>	Relation débit - pression	/	Mesure de débit [0.01 à 0.05 m <sup>3</sup> /min] et pression [0.1 bar au maximum possible] - Longueurs de 40, 30, 25, 20, 15, 12 et 10 m	Compteur - Manomètre
	Pertes de charge		Mesure de pression à l'entrée et à l'extrémité d'une bande - Longueurs de 40, 30 et 20 m	Compteur - Manomètres (2)
	Distribution en eau		Mesure pour une bande - 0.2, 0.3, 0.4 et 0.6 bar	Manomètre - Récipients
			Mesure pour deux bandes - 0.2 et 0.4 bar	
<b>Mesures indirectes</b>	Efficience d'application en eau - DVPE - Uniformité - CU, DU <sub>lq</sub> et CV	Calculs à partir des mesures de quantité d'eau avec récipients	Compteur - Manomètre - Récipients	

(\* ) le matériel d'installation est mentionné en section 2.2.2.

### 3 Résultats et discussion

#### 3.1 Caractérisation hydraulique

Cette section reprend les résultats obtenus de la détermination de la relation débit - pression propre à différentes longueurs de tuyau, les mesures de pertes de charge ainsi que la distribution en eau et la portée.

##### 3.1.1 Relation débit - pression

Les mesures de pression et débit ont permis, par régression, d'établir les courbes de la figure 18 depuis la relation puissance  $q = k_d * p^x$  pour chaque longueur testée. Les valeurs moyennes des points de mesures et leur écart-type sont représentés. Les équations de régression, reprises au tableau 2, non significatives par un test de *student*, sont représentées par le coefficient de détermination  $R^2$ .

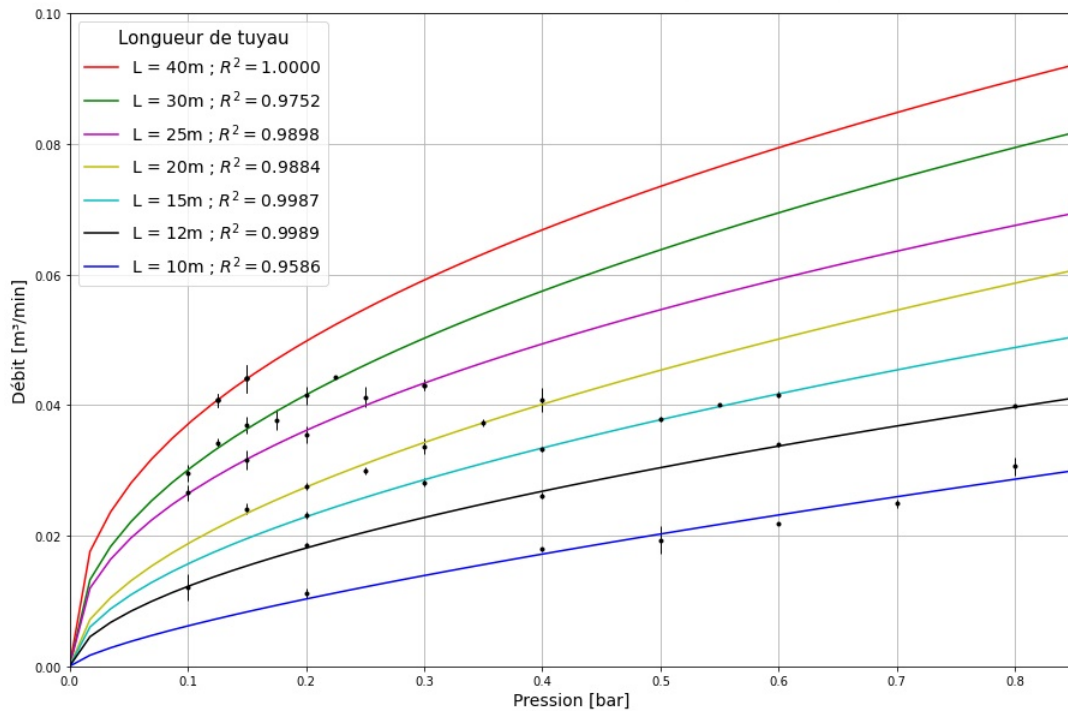


FIGURE 18 – Relation débit ( $m^3/min$ ) - pression (bar) établie depuis l'expérimentation en Belgique pour différentes longueurs de bandes perforées.

TABLEAU 2 – Relation entre le débit  $q$  ( $\text{m}^3/\text{min}$ ) et la pression  $p$  (bar) établie selon différentes longueurs du tuyau perforé San Fu © HYB1-3.

Longueur	Relation	R <sup>2</sup>
40 m	$q = 0.098 * p^{0.425}$	1.00ns
30 m	$q = 0.088 * p^{0.467}$	0.97ns
25 m	$q = 0.075 * p^{0.451}$	0.98ns
20 m	$q = 0.066 * p^{0.548}$	0.98ns
15 m	$q = 0.055 * p^{0.546}$	0.99ns
12 m	$q = 0.045 * p^{0.566}$	0.99ns
10 m	$q = 0.034 * p^{0.738}$	0.95ns

La valeur de  $x$  obtenues pour 20, 15, 12 m sont de 0.5, indiquant un flux à régime turbulent dans les émetteurs, ce qui était en général attendu par rapport à certaines études menées sur les bandes perforées (MARINHO et al., 1999; MELO et al., 2017). Une valeur inférieure caractériserait des émetteurs fournissant un degré variable de régulation de débit, tel que pour 40, 30 et 25m. Entre  $0.7 < x < 1$ , le régime est instable, ce qui est le cas pour la longueur de 10 m. Les valeurs de R<sup>2</sup> fournissent des valeurs proches de 1 satisfaisantes.

Une utilisation de ces résultats facilement accessible et utilisable pour l'ONG est la mesure du débit en l/min (tableau 3), présentée en fonction de la pression et la longueur souhaitée. Cette unité est choisie car souvent fournie directement sur les pompes utilisées. Le débit des pompes des trois producteurs est de maximum 500, 600 et 1000 l/min (tableau 14 en annexe).

TABLEAU 3 – Valeur de débit (l/min) nécessaire pour atteindre certaines valeurs de pression (bar) dans différentes longueurs (m) d'une bande perforée San Fu © HYB1-3.

Pression	Longueur				
	10m	15m	20m	25m	30m
0.2	10.3	22.8	27.3	36.3	41.5
0.3	13.9	28.5	34.1	43.6	50.2
0.4	17.1	33.3	39.9	49.6	57.4
0.6	23.1	41.6	49.9	59.6	69.3

Pour rappel, ces mesures ont été réalisées en Belgique. La pompe utilisée pour la réalisation des tests étant limitée à un débit d'un maximum de  $0.05\text{m}^3/\text{min}$  (50l/min), les gammes de pression mesurées pour chaque longueur n'ont pas pu être identiques pour chaque mesure. Cette valeur maximum ( $0.05\text{m}^3/\text{min}$ ) définie par le manuel d'utilisation de la pompe (GARDENA, 2006) n'a jamais été rencontrée, ce qui peut s'expliquer par les facteurs suivants : la présence d'air dans la pompe, son usure, l'encrassement du filtre de tuyau d'aspersion de la pompe et la hauteur d'eau présente dans le réservoir limitée et variant dans le temps.

En variant l'ouverture de la vanne en sortie de pompe, il a été possible de régler la valeur de pression souhaitée pour chaque essai. Hormis pour une longueur de 40m, au minimum cinq couples



débit-pression ont été mesurés. La valeur de pression maximale était limitée au débit maximal pouvant être fourni par le pompe. C'est à partir de cette valeur maximale lisible par le manomètre, soit dans l'idéal à une graduation de 0.05, que les valeurs mesurées sont ensuite choisies. L'objectif était de couvrir une large gamme de pression, de la valeur la plus élevée possible, à celle au plus proche de 0.1 bar. Elle n'a pas toujours été prise en compte, l'aiguille du manomètre n'étant pas toujours stable au plus la pression diminuait. Pour la plupart des longueurs, la gamme couverte étant déjà bien plus large, des mesures minimales à 0.2 bar permettait d'obtenir un nombre suffisant de points directement lisibles sur le manomètre.

La longueur de 40 m ne possède pas cinq points de mesure car la pression maximum mesurée est de 0.15 bar. Cette valeur limite le nombre de points pouvant être mesuré, comparativement aux autres longueurs. Cependant, KELLER & KARMELI, 1974 affirment que seuls deux points sont nécessaires pour établir la relation. La courbe qui en découle semble en effet cohérente aux autres courbes, ce pourquoi elle a tout de même été laissée dans la présentation des résultats.

En plus de la pression, le débit est également fonction de la température de l'eau traversant le système. Une augmentation de la température de l'eau dans des conduits réduit sa viscosité et accroît le débit dans les émetteurs (SOLOMON, 1979 ; SAWA, 2002). Si la sensibilité d'un émetteur dépend de cette température de l'eau, elle deviendra alors un critère de dimensionnement. La température peut également agir directement sur la dimension de l'émetteur. Un flux laminaire ou instable indique que le débit est fonction de la pression mais également de la température du fluide (KELLER & KARMELI, 1974).

Bien que les coefficients n'indiquent pas ce type de flux, hormis pour la mesure à 10 m, ces valeurs pourraient légèrement varier avec les conditions de température au Bénin. En effet, des températures de 50 à 60°C ont été mesurées durant l'après-midi sur des bandes perforées exposées au soleil, à l'aide d'un thermomètre infrarouge.

### 3.1.2 Pertes de charge

Lors des mesures de différence de pression entre l'entrée et l'extrémité des bandes, aucune valeur correspondante à la sensibilité des manomètres n'a été détectée. N'ayant pas de différence entre  $P_{in}$  et  $P_{out}$ , aucune valeur expérimentale de  $h_L$  et de  $f$  n'ont pu être établie. La comparaison avec une valeur théorique du facteur  $f$  des équations 11 et 9 n'est pas réalisable. L'utilisation des équations 13 et 14 déterminées pour le tuyau Santeno I est tout de même effectuée. N'ayant pas la possibilité de faire une comparaison entre les deux types de tuyaux, l'HYB1-3 de San Fu © et le Santeno I de Santeno ©, ces informations sont fournies à titre indicatif. En effet, la configuration des perforations diffère entre les deux modèles, mais cette procédure permet de se représenter la valeur qui aurait pu être mesurée pour un tuyau similaire. Un développement plus précis concernant les différences entre les deux tuyaux est ultérieurement réalisé.

Les résultats de l'étude sur le tuyau Santeno I sont inclus dans le tableau 4, fournissant une indication de la variation de pression qui se produit sur un tuyau Santeno I de 40 m à une pression de 0.15 bar, selon  $N$  paire de perforation. Cette longueur et pression sont choisies en fonction de la longueur la plus élevée où il a été possible de mesurer une pression pour le tuyau HYB1-3. Le débit est calculé depuis la relation 14 de MELO et al., 2017 et est ensuite multiplié par le nombre de paires d'émetteurs retrouvé sur 40 m.

TABLEAU 4 – Calcul de la différence de pression présente entre le début et l’extrémité d’un tuyau perforé Santeno © de 40 m à partir des équations et paramètres empiriques élaborés par MARTINS, 2017, MELO et al., 2017 et MELO et al., 2019.

q (m <sup>3</sup> /s)	J (m/m)	$h_L$ (m)	N	F	$h_f$ (m)	Différence de pression (bar)
0.0001	0.0009	0.0348	266	0.328	0.0114	0.0011

Les différences entre les deux tuyaux sont, d’une part, le nombre de perforations plus élevé dans le modèle HYB1-3 que dans le modèle Santeno I. Selon CHRISTIANSEN, 1942 et les études mentionnées par FRIZZONE & VIEIRA, 1998 et MARTINS, 2017,  $F$  augmente lorsque la pression et l’espacement entre les émetteurs pour un même nombre augmente. Il diminue lorsque le nombre d’émetteur augmente pour un même espacement. Les valeurs définies empiriquement par MARTINS, 2017 pour le modèle Santeno I indique un  $F$  de 0.328 pour 266 paires d’émetteurs. Pour une même longueur, le nombre d’émetteur de l’HYB1-3 est presque deux fois plus élevé. Ce qui correspondrait à un  $F$  de 0.327 pour les Santeno I. CHRISTIANSEN, 1942 propose une équation dont le résultat est plafonné à 0.333 après 100 émetteurs.

D’une autre part, le débit pour un tuyau de 40 m à 0.15 bar est sept fois plus élevé pour un tuyau HYB1-3. Les tuyaux Santeno I ont un diamètre des tuyaux de 28 mm, contre 32 mm pour l’HYB1-3. L’expression reformulée (équation 4) de l’équation de Darcy-Wesibach, permet d’explicitement constater que la perte de charge est inversement proportionnelle au cinquième du diamètre. Un diamètre plus important correspond à une diminution de la perte de charge pour un même débit. A l’inverse, un débit plus important engendre une perte plus importante également, pour un même diamètre.

La différence de pression calculée entre l’entrée et l’extrémité du tuyau s’élève à 0.0011 bar pour un tuyau Santeno I. Étant donné la potentielle possibilité de mesurer des valeurs similaires, il convient de noter que la lisibilité des manomètres, ayant chaque niveau fixé à 0.05 bar, rend ces faibles variations difficiles à observer. En considérant qu’une variation d’au moins 0.02 bar est nécessaire pour être lisible sur le manomètre, la perte produite dans les mêmes conditions que Santeno I devrait être  $\frac{0.02}{0.0011} = 18$  fois plus importante.

Ces explications permettent de comprendre qu’aucune différence de pression n’est mesurée. Celle-ci est donc négligée dans un premier temps, et l’utilisation de l’équation 11 de Swamee & Jain pour un tuyau en HDPE sans perforation est tout de même prise en considération. En tenant compte de ces éléments, le scénario le plus contraignant est retenu pour le dimensionnement.

### 3.1.3 Distribution en eau et portée

Les mesures de distribution effectuées sur une et deux bandes selon deux espacements différents sont présentées dans cette section.

#### Caractérisation d’une bande

Des mesures à 0.2, 0.3, 0.4 et 0.6 bar ont été effectuées sur trois répétitions, présentées en figure 19. Les valeurs de hauteur maximale du jet ainsi que de la portée sont reprises dans le tableau 5.

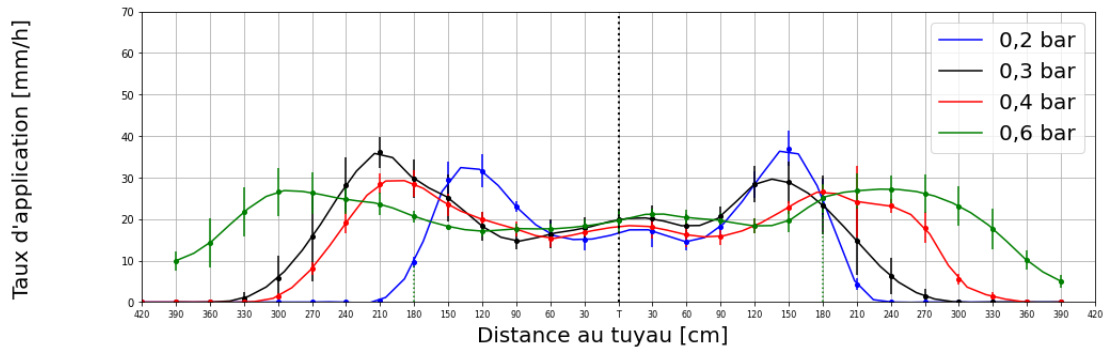


FIGURE 19 – Distribution en eau représentée par le taux d’application (mm/h) mesuré à distance (cm) pour une bande perforée selon la pression (bar).

TABLEAU 5 – Portée et hauteur maximale d’une bande perforée San Fu © selon la pression.

Pression	0.2 bar	0.3 bar	0.4 bar	0.6 bar
Hauteur maximale du jet	120 cm	160 cm	200 cm	260 cm
Portée maximale	210 cm	270 cm	315 cm	420 cm

Au plus la pression est élevée, au moins les courbes présentent des variations importantes de taux d’application à distance de la bande. Les pics de valeurs ayant une répartition non - symétrique autour de la bande, l’objectif de recouvrement de bandes supplémentaires va donc être de lisser un maximum ce pic pour assurer une distribution en eau uniforme sur la parcelle.

### Différence de quantité en eau le long d’une bande

La mesure de la quantité en eau entre le début et l’extrémité d’un bande de 20 m à 0.2 bar ne présente aucune variation notable de quantité en eau distribuée (figure 20). Selon KELLER & KARMELI, 1974, le frottement qui pourrait se produire et induire ces différences de débit n’est pas important pour les émetteurs non - laminaire ayant un  $x < 0.8$ , ce qui permet d’expliquer ces résultats. La moyenne de distribution est de  $21.2 \pm 11$  mm/h en début de bande et de  $21.1 \pm 12$  mm/h à l’extrémité.

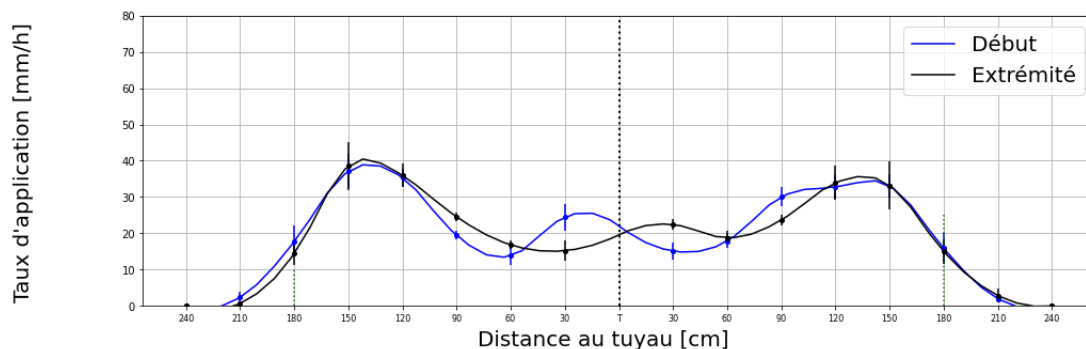


FIGURE 20 – Distribution en eau représentée par le taux d’application (mm/h) mesuré à distance (cm), simultanément en début et extrémité de bande de 20 m à 0.2 bar.

### Utilisation de plusieurs bandes

La distribution obtenues pour 0.2 et 0.4 bar à 2.4 m et 4 m d'espacement est présentée en figure 21. Sur ces graphiques a été ajoutée une courbe représentant l'estimation théorique de la distribution. Cette estimation a été réalisée à partir des courbes obtenues pour une bande. En les positionnant selon l'espacement désiré, il est ensuite possible de les additionner.

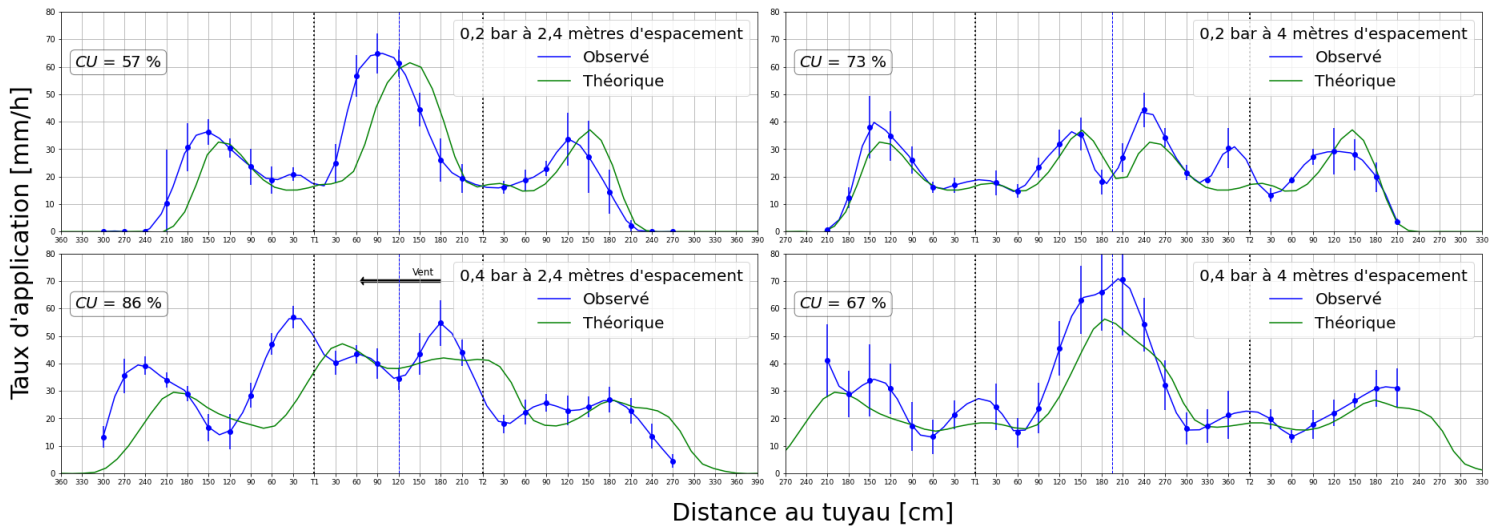


FIGURE 21 – Distribution en eau théorique et observée de deux bandes à une distance de 2.4 et 4 m et une pression de 0.2 et 0.4 bar.

Sur ces graphiques sont communiqués les valeurs de CU moyen pour les trois répétitions effectuées par tests, calculée uniquement pour les valeurs entre les deux bandes. Ces valeurs, ainsi que le DU<sub>lq</sub> et le CV, sont reprises entièrement au tableau 15 en annexe.

Au vu des résultats de la section précédente, concernant la distribution de la quantité en eau en début et extrémité d'une bande, les mesures indiquent des résultats constant le long de la bande. Les tests de distribution en eau étant nombreux et permettant d'utiliser une large gamme de valeurs de coefficients d'uniformité, ces mesures sont conservées pour caractériser l'uniformité de distribution du système.

A priori, les valeurs les plus intéressantes sont reprises pour une pression de 0.4 bar espacées de 2.4 m. Cependant, il peut être facilement observable que l'ajout de bande lorsque le recouvrement produit par une bande dépasse la bande suivante induira une distribution bien différente.

De manière générale, l'estimation théorique suit les mêmes tendances que celles observées. L'utilisation de cette méthode d'estimation permet de s'affranchir des mesures de terrain pour tester plusieurs espacements différents de plus de deux bandes, étant assez chronophage et consommatrice en eau dans un cadre expérimental. De manière générale, tel qu'évoqué en section 2.4.2, il est courant que les valeurs de coefficients d'uniformité diffèrent d'un essai à l'autre malgré des conditions de mesures similaires. Le décalage des courbes observées et théoriques est toutefois discuté ultérieurement.

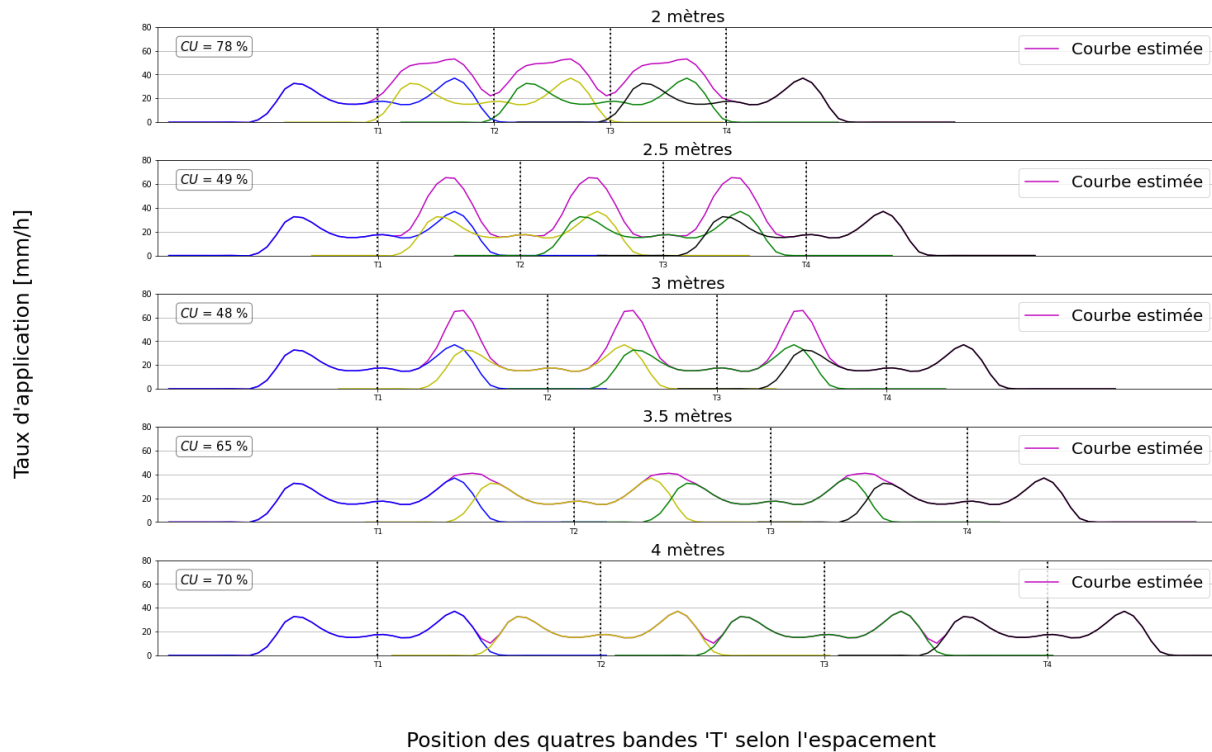
Les coefficients d'uniformité estimés sont alors calculés pour différents espacements aux pression de 0.2 et 0.4 bar (tableau 6). Étant donné que la portée d'une bande peut dans certain cas s'étendre au-delà de la bande adjacente, quatre à cinq bandes sont considérées. Les coefficients sont calculés entre deux bandes où la distribution est identique à l'ensemble des autres bandes. La particularité

d'utiliser de telles estimations est qu'elles sont basées sur des courbes expérimentales. Les résultats obtenus dans la section précédente (3.1.3) permettent de conclure que les estimations obtenues pour une ligne de mesure peuvent être généralisées à l'ensemble de la bande.

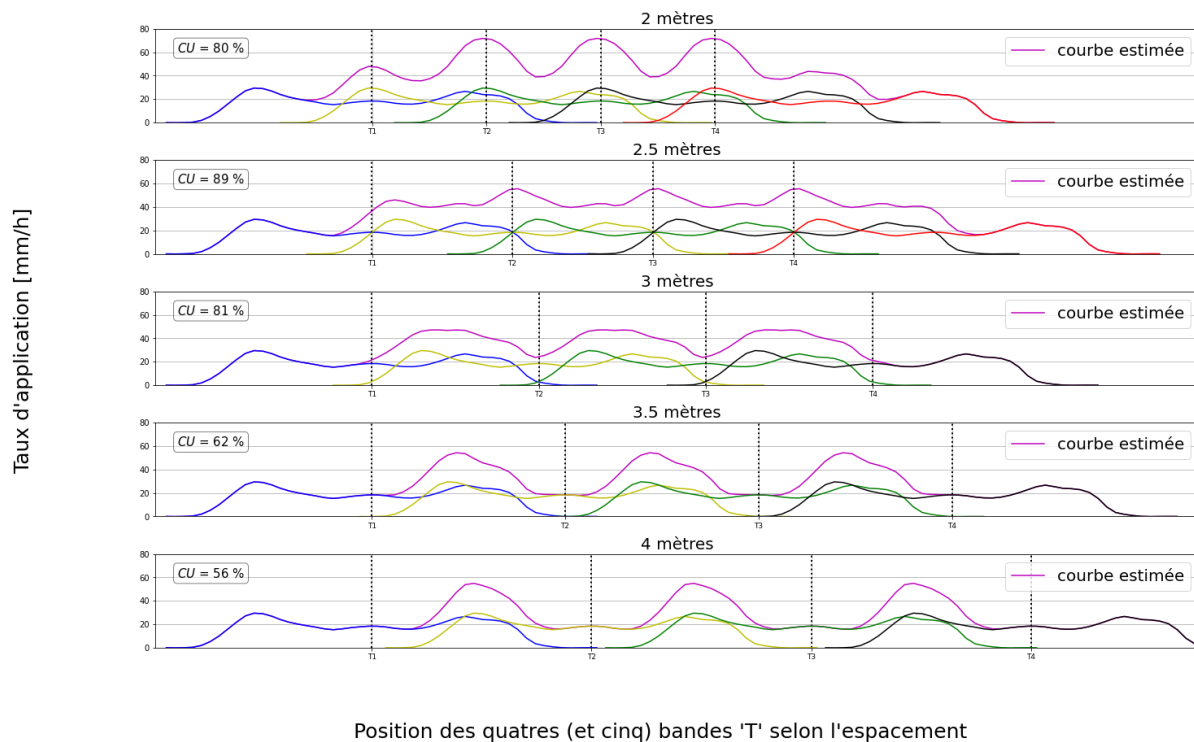
Les graphiques des courbes estimées d'un agencement de 4 à 5 bandes espacées de 2, 2.5, 3, 3.5 et 4 m sont présentés selon une pression de 0.2 bar (figure 22a) et 0.4 bar (figure 22b). Ce sont ces courbes qui ont été utilisées pour calculer les coefficients d'uniformité théorique présenté au tableau 6.

TABLEAU 6 – Valeurs théoriques des coefficients CU, DU<sub>lq</sub> et CV, mesuré entre deux bandes perforées à partir d'un agencement de 4 à 5 bandes, à la suite de l'estimation des courbes de distribution en eau pour des pressions de fonctionnement de 0.2 et 0.4 bar et des espacements de 2 à 4 m.

Pression	Coefficient	2m	2m50	3m	3m50	4m
0.2 bar	CU	78%	49%	48%	65%	70%
	DU <sub>lq</sub>	60%	48%	54%	62%	65%
	CV	26%	58%	63%	40%	35%
0.4 bar	CU	80%	89%	81%	62%	56%
	DU <sub>lq</sub>	72%	87%	67%	56%	57%
	CV	22%	12%	22%	42%	50%



(a) Estimation de la distribution en eau et du CU correspondant de 4 bandes espacées de 2 à 4m à 0.2 bar.



(b) Estimation de la distribution en eau et du CU correspondant de 4 et 5 bandes espacées de 2 à 4m à 0.4 bar.

FIGURE 22 – Estimation de la distribution en eau et du CU correspondant de plusieurs bandes espacées de 2 à 4m à 0.2 bar et 0.4 bar. Les courbes en couleur représentent la distribution à 0.2 et 0.4 bar d'une bande unique utilisées pour réaliser la courbe estimée.

La différence de valeur entre les coefficients estimés (tableau 6) et réels (tableau 15 en annexe) peut être effectuée (tableau 7). Les estimations théoriques pour 2m40 ont été calculé, contrairement au 2m50 du tableau 6. En effet, ce tableau reprend les valeurs de 2 à 4m par pas de 50 cm, afin de garder une cohérence.

TABLEAU 7 – Différence entre les valeurs estimées et réelles de coefficients d’uniformité CU, DUlq et CV obtenus pour les tests réalisés en Belgique.

Espacement	Pression					
	0.2 bar			0.4 bar		
	CU	DUlq	CV	CU	DUlq	CV
2m40	-3%	2%	-1%	-4%	-2%	2%
4m	-3%	3%	2%	-11%	5%	13%

Les différences s’élèvent à quelques %, hormis pour les valeurs de 4m à 0.4 bar. De manière générale, ces résultats sont satisfaisants et pourraient permettre de conclure que la méthode d’estimation semble être fiable.

Les coefficients CU, DUlq et CV fournissent une estimation de l’uniformité mais ne permettent généralement pas de cibler les zones présentant un déficit ou un excès de quantité d’eau récoltée (Zodloske et al., 1994 cité par ASCOUGH & KIKER, 2002). Une particularité de pouvoir utiliser la méthode d’estimation de la distribution avec une représentation graphique est de pouvoir pallier ce manque d’information et de justement cibler ces zones. Les figures 22a et 22b permettent de constater que le déficit appliqué est surtout présent au niveau de la bande. En fonction de l’espacement et la pression choisie, il peut être conseillé d’éviter de planter directement sous ou à proximité directe de la bande.

Dans l’ensemble, par rapport aux valeurs de références conseillées, les valeurs de CV restent assez élevées, constamment  $> 10\%$ . De même pour le DUlq. Le seul couple qui respecte les conditions énoncées dans la littérature pour les asperseurs sont 0.4 bar à 2m50.

### Effet du vent et position de la bande

La figure 21 présente un décalage des pics de quantité en eau et portée, généralement dirigé vers la gauche. Il peut s’expliquer par la direction prise par le jet de la perforation du milieu (figure 9b). En effet, cette perforation, en troisième position, produit un jet perpendiculaire au sol. En variant légèrement l’orientation de la bande, ou bien par l’action du vent, ce jet se dirige vers un côté ou l’autre de la bande, plutôt que de se briser en gouttelettes en hauteur et retomber à la verticale. Le vent d’ouest / sud-ouest étant dominant, et les bandes dirigées vers le nord-est, son influence est visible en graphique par un décalage vers la gauche.

Une bande mal placée peut cependant avoir un réel impact, contrairement aux courbes présentées dans les précédents essais. Une disposition incorrectement réglée à l’attache du système a donné le résultat en figure 23. La bande y était tournée vers la gauche, telle qu’illustrée par la figure 28 en annexe.

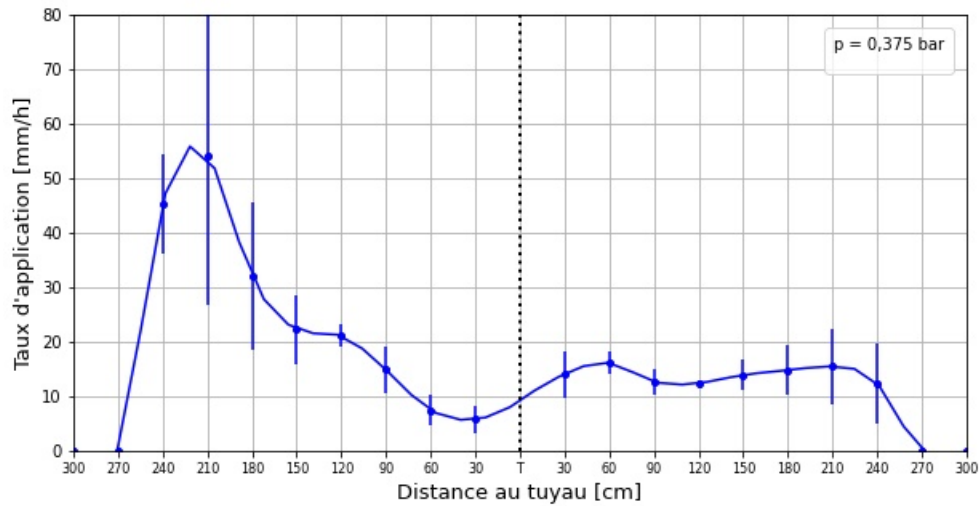


FIGURE 23 – Distribution en eau d'une bande perforée incorrectement orientée

Telles que mentionnées en section 2.3.3, ces mesures devraient être idéalement réalisées en intérieur. Cependant, elles permettent de donner une estimation des dérives possibles dues au vent, mais également à un placement incorrect des bandes durant leurs utilisations. Une attention particulière est donc conseillée sur l'attache réalisée des bandes à l'entrée du système, mais également sur son orientation de tout son long.

## 3.2 Évaluation des systèmes

### 3.2.1 Efficience d'application

#### Mesures en Belgique

Des mesures de relevés de quantité d'eau dans les récipients ont été utilisées pour calculer la DVPE (%). Les valeurs ont été comparées à la température moyenne, la vitesse moyenne du vent et les pressions de fonctionnement (0.2, 0.3 et 0.4 bar) appliquées durant les essais. Ces valeurs sont présentées en figure 24. Le tableau 8 reprend les valeurs de coefficient de corrélation de Pearson et Spearman, ainsi que leur niveau de signification entre le DVPE comparé aux mêmes variables.



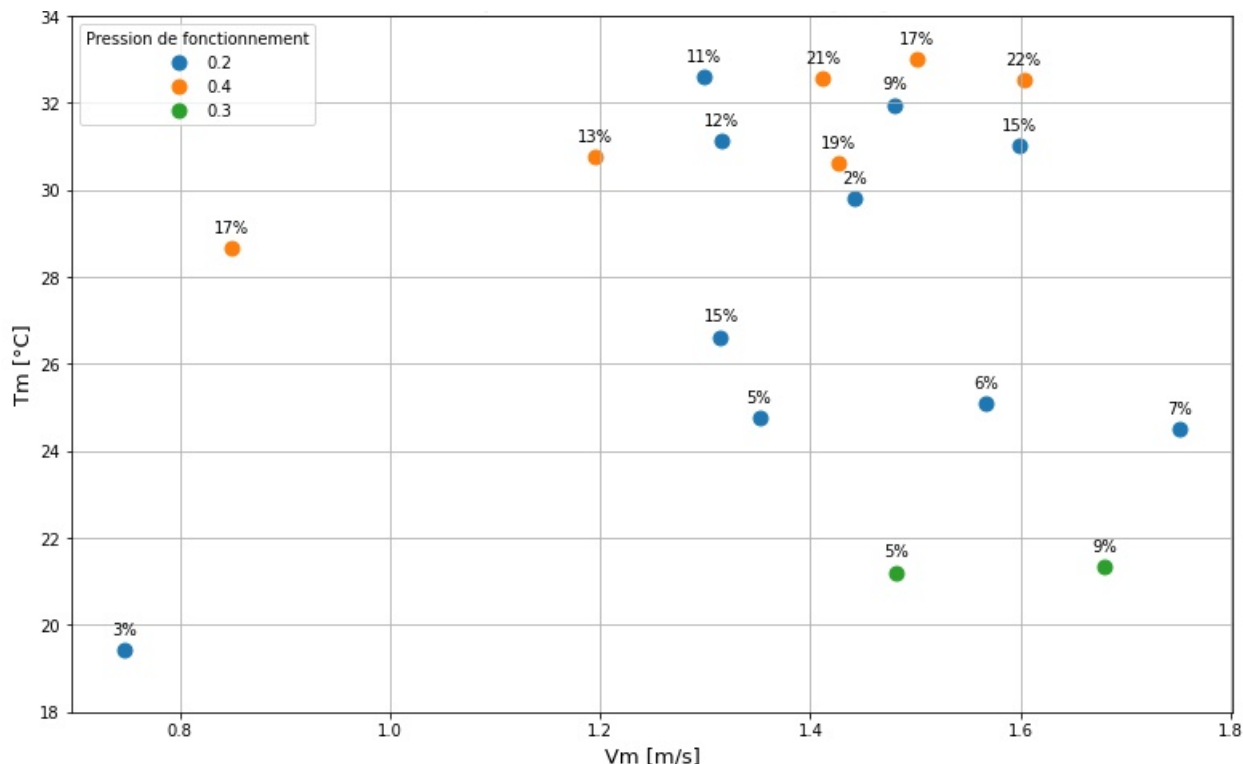


FIGURE 24 – Valeur de DVPE (%) en fonction de la température moyenne  $T_m$  (°C), la vitesse moyenne du vent  $V_m$  (m/s) et la pression de fonctionnement (bar) mesurée durant les essais en Belgique au mois de juillet.

TABLEAU 8 – Valeur des coefficients de corrélation de Pearson et Spearman pour la variable DVPE, en fonction des variables de température  $T_m$ , de vitesse de vent  $V_m$  et de pression de fonctionnement dans le système.

Variable1	Variable2	Corrélation	Méthode
DVPE	$T_m$	0.673**	Pearson
	$T_m$	0.653**	Spearman
	$V_m$	0.075ns	Pearson
	$V_m$	0.036ns	Spearman
	Pression	0.700**	Pearson
	Pression	0.677**	Spearman

ns = p-valeur non significative, (\*) = significative, (\*\*) = hautement significative, (\*\*\*) = très hautement significative.

La gamme de valeurs mesurées fluctue entre 2 à 15% pour 0.2 bar et 13 à 22% pour 0.4 bar. Les valeurs enregistrées correspondent aux gammes de valeurs mesurables des asperseurs par des expériences de terrain (section 2.4.1). Ces représentations indiquent une corrélation modérée positive hautement significative entre la DVPE, la température et la pression de fonctionnement. La corréla-

tion entre le DVPE et la pression appliquée peuvent s'expliquer de la manière suivante. Une pression élevée dans le système accroît la hauteur du jet, qui atteint des valeurs assez élevées (tableau 5). La trajectoire de la goutte est alors plus longue, ce qui la rend plus exposée aux pertes. De plus, la pression élevée diminue la taille des gouttes, ce qui augmente la sensibilité à la DVPE. Tandis qu'à l'inverse, pour une pression plus faible, une taille plus importante des gouttes présente moins de surface par unité de masse, les rendant plus résistantes à ces facteurs (MERRIAM & KELLER, 1979; SMAJSTRLA & ZAZUETA, 2003; PLAYÁN et al., 2005). Il est important de tenir compte que la significativité ne dépend pas uniquement de la force de la corrélation, mais également des mesures effectuées.

La valeur de la vitesse du vent n'est pas corrélée avec les mesures effectuées. Cependant, PLAYÁN et al., 2005 indique que pour les références consultées, la vitesse du vent a systématiquement un impact sur le DVPE des systèmes par asperseur (tableau 16 en annexe). Par observation, la dérive liée au vent est visible sur la parcelle lorsque la distribution d'eau est translatée par rapport à la surface qu'elle est censée couvrir, ce qui peut être illustré par une photographie réalisée sur une parcelle au Bénin (figure 25). Cette influence est d'autant plus visible si la direction du vent est située parallèlement ou perpendiculairement à l'orientation des bandes. Les récipients sont placés en milieu de bande, ce qui pourrait expliquer que ce décalage qui aurait pu se produire n'a pas pu être pris en compte.



FIGURE 25 – Photographie de la surface mouillée due aux dérives des gouttes d'eau liées au vent hors de la parcelle couverte par les bandes perforées au Bénin.

Concernant les valeurs de vitesse de vent, la valeur moyenne sur l'intervalle de 10 minutes est utilisée. Cette approche de mesure ne tient pas compte de l'ampleur de la variation de la vitesse de vent et de sa direction. Ce qui pourrait conduire à une valeur moyenne de la vitesse du vent similaire à celle observée dans des conditions où l'alternance est moins prononcée. En effet, selon DARKO et al., 2017, pour un temps élevé d'irrigation, dans des conditions de variations de la vitesse du vent et de sa direction au cours du temps, l'uniformité de l'application peut être augmentée en cas de vent constant.

Un vent de vitesse compris entre 1 et 3 m/s est considéré léger à modéré, selon ALLEN et al.,

1998. Solomon (1990), cité par DARKO et al., 2017 indique qu'une vitesse entre 0 - 1.94 m/s est un vent faible, et modéré entre 1.94 et 3.8 m/s. Les vitesses moyennes enregistrées varient de 1.20 à 1.75 m/s, dont deux mesures inférieures à 1 m/s, qualifiées de vent faible. Les vitesses maximales enregistrées durant les tests, variant de 1.6 à 2.6 m/s, sont également comprises dans l'intervalle de faible à modéré. PLAYÁN et al., 2005 étudiant la DVPE des systèmes par asperseur ont enregistré des vitesses de vent entre 0.23 et 7.94 m/s, avec des moyennes de 0.75 à 3.20 m/s. Ces vitesses sont corrélées positivement aux mesures de DVPE enregistrées. Comparativement aux mesures effectuées dans cette étude, la gamme de vitesse de vent rencontrées est effectivement bien plus faible.

Bien que l'absence de corrélation n'ait été mise en évidence pour cette variable, les éléments présentés suggèrent que cela ne permet pas de conclure que le vent n'a exercé aucune influence.

De manière générale, bien que l'utilisation de récipients est une technique communément utilisée pour ces mesures d'évaporation et de dérive liée au vent, des facteurs peuvent influencer les résultats. Des mesures en laboratoire, en comparaison, diminuent effectivement les gammes de valeurs enregistrées sur le terrain (KOHL et al., 1987 ; SCHNEIDER, 2000 ; REBEKIĆ et al., 2015).

### Mesures au Bénin

Les valeurs obtenues pour 4 tests au Bénin sont reprises au tableau 9. La moyenne de DVPE est de 28%, à une température de 31°C à 32°C pour l'ensemble des tests. La vitesse de vent est estimée par observation.

Telles que mentionnées en section 2.2.3, des mesures de débit par compteur d'eau et par empotage ont été réalisées. Ces mesures donnent en effet des résultats qui diffèrent : après irrigation de sa parcelle avec le système, le producteur devait arrêter sa pompe afin de débrancher le tuyau principal de l'entrée du système, et le diriger vers le contenant utilisé pour la mesure. En effet, la débit étant bien trop puissant, cette opération ne pouvait pas se réaliser sans l'éteindre. En redémarrant la pompe, le producteur essayait de régler la même puissance pour l'empotage que pour l'essai. La valeur par empotage est donc une approximation du débit qui circulait dans le système. De même concernant les valeurs des compteurs, celles-ci sous-estiment le débit réel, les fuites ayant lieu principalement en amont du compteur.

TABLEAU 9 – DVPE (%) et pression\* (bar) mesurée à partir des essais réalisés au Bénin.

Essai	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Pression*	0.47 bar	0.32 bar	0.38 bar	0.61 bar
DVPE	33%	28%	36%	14%
Vent	Léger	Léger à quelques rafales	Rafale et ensoleillement	Léger à quelques rafales
Nébulosité	Couvert, réalisé en fin de journée	Légèrement nébuleux	important	Légèrement nébuleux

\*La pression, non mesurée sur le terrain, a été calculée à partir de la relation de débit-pression établie à 12 m.

Une légère cohérence en termes d'observation météorologique et de DVPE se remarque pour les différents essais. Cependant, la précision des données de température et de vitesse du vent, et particulièrement le peu de données, ne permettent pas de réaliser des tests de corrélation pertinents.

En comparaison des deux zones d'étude, les valeurs de DVPE obtenues pour une même pression sont supérieures aux valeurs de Belgique. Les différences d'ET0 s'élèvent effectivement à 122 mm/mois en Belgique et de 158 mm/mois au Bénin, respectivement pour les mois correspondant.

### 3.2.2 Uniformité

Les valeurs des coefficients obtenus suite aux tests au Bénin ont été rassemblées au tableau 10.

TABLEAU 10 – Valeurs des coefficients CU, DU<sub>lq</sub> et CV des essais de mesure d'uniformité réalisés au Bénin.

Essai	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Pression*	0.47 bar	0.32 bar	0.38 bar	0.61 bar
CU	60%	67%	85%	81%
Dul <sub>q</sub>	45%	55%	77%	70%
CV	61%	38%	23%	26%

\*La pression, non mesurée sur le terrain, est calculée à partir de la relation de débit-pression établie à 12 m.

La pression mesurée lors du quatrième essai semble disproportionnée par rapport aux observations sur le terrain. En effet, une hauteur maximale de 185cm est noté dans les observations, ce qui ne correspondrait pas à des mesures de 0.6 bar (tableau 5). La valeur par empotage indique une mesure de 0.023 m<sup>3</sup>/min (0.61 bar), pour 0.014 m<sup>3</sup>/min (0.32 bar) pour la mesure d'un compteur, ayant une fuite importante en amont.

En comparaison de ces résultats aux estimations effectuées en section 3.1.3, il est effectivement constaté des mesures d'uniformité pour l'essai 3 relativement proches des estimations pour 0.4 bar. Le premier et le deuxième essai présentent cependant des déficiences importantes. Elles peuvent être attribuées, pour la première mesure, au placement des récipients sur trois bandes à l'extrémité du système. La différence de quantité entre la dernière bande et l'avant-dernière bande n'est pas issue d'un recouvrement similaire à celui observé pour une bande située au milieu du système (figure 22b). En outre, pour les deux essais, les bandes autour desquelles les récipients étaient placés présentaient des fuites au niveau des compteurs, entraînant ainsi une diminution du débit qui traversait la bande concernée. Pour les essais 3 et 4 indiquant de meilleurs résultats, les compteurs ont été positionnés sur des bandes non-concernées par le placement des récipients. L'orientation de la bande pourrait également influencer les mesures.

## 3.3 Dimensionnement

Les sections antérieures ont permis d'évaluer séparément l'efficacité d'application des systèmes ainsi que leurs performances en termes de distribution de l'eau. Toutefois, le dimensionnement d'un système pour une zone de surface donnée implique d'autres aspects à prendre en considération :

- La pression utilisée doit être en adéquation avec la capacité de la pompe.

- Un équilibre doit être trouvé entre l’espacement utilisé, qui est lié à la quantité de matériel nécessaire, et les contraintes économiques.

### 3.3.1 Critères de dimensionnement

De manière générale, les résultats permettent de conseiller un espacement de 2m50 à 0.4 bar, à appliquer pour les systèmes actuellement installés au Bénin. Néanmoins, afin de satisfaire les contraintes liées aux capacités des pompes des producteurs et aux restrictions budgétaires, d’autres options pourraient être considérées. Augmenter l’espacement à 3m pour la même pression ou bien la pression de 0.2 bar pourrait permettre de s’adapter à ces contraintes et proposer des dimensionnements moins performants mais plus économiques.

Un critère qui n’a pas encore été évoqué concerne le taux d’application de l’eau. Celui-ci ne doit en effet pas excéder la vitesse d’infiltration limite du sol, en plus d’une application de quantité d’eau adéquate à la plante (SAWA & FRENKEN, 2001 ; DARKO et al., 2017). SAWA & FRENKEN, 2001 fournit une échelle de vitesse d’infiltration en fonction de différents sols (tableau 17 en annexe).

Des sondages tarières ont été effectués sur chaque parcelle, permettant une première approche d’estimation de la texture du sol par mesure de terrain. La méthode de FAO, 2006 a été utilisée et a permis de déterminer une approximation des textures de sol pour des profondeurs de 0 à 30 cm (1) et de 30 à 60cm (2). Les résultats obtenus sont du loam sablo-argileux (1) et loam sableux (2) pour le haut de pente de la parcelle 1, du loam limoneux (1 et 2) pour le bas de pente, ainsi que pour les parcelles 3 et 4. La deuxième parcelle présente du loam limoneux (1) et du loam (2). Ces informations sont tirées de la figure 18 en annexe fournit par FAO, 2006. Une vitesse correspondant à du limon fin (15 à 25 mm/h) peut être considérée pour ces résultats.

Cette vitesse d’infiltration peut donc être comparée aux taux d’application de l’eau des bandes. Ces taux sont ceux obtenus des estimations de la distribution en eau présenté en figure 22. Ces taux d’application moyens et les écart-types associés (tableau 11) sont calculés de la même manière que les coefficients d’uniformité présenté au tableau 6. Cela signifie que la valeur présentées correspond au taux présent entre deux bandes, dans un système présentant un agencement totale de plusieurs bandes. Les dimensions les plus satisfaisantes du point de vue des résultats d’uniformité sont 0.4 bar à 2 m, 2m50 et 3 m, ainsi que 0.2 bar à 2 et 4 m. Des taux plus importants sont majoritairement rencontrés pour une pression de 0.4 bar (de 56 à 38 mm/h). Les vitesses les plus faibles se produisent pour l’espacement à trois mètres (38 mm/h). Ces conditions sont similaires pour 0.2 bar à 2 m (41 mm/h). La valeur à 4 m pour 0.2 bar est celle présentant les valeurs les moins élevées (21 mm/h).

TABLEAU 11 – Taux d’application moyens et écart-types associés (mm/h) résultants de l’estimation théorique des courbes de distribution en eau pour des pressions de fonctionnement de 0.2 et 0.4 bar et des espacements de 2 à 4 m.

Pression	2m	2m50	3m	3m50	4m
0.2 bar	41 ± 10	33 ± 18	28 ± 17	24 ± 9	21 ± 7
0.4 bar	56 ± 12	46 ± 5	38 ± 8	32 ± 13	28 ± 14

Étant donné la méthode utilisée, il n’est évidemment pas possible de fournir une vitesse d’infiltration plus précise. Cependant, les indications fournies permettent de se positionner dans le tableau 17 en annexe et de nuancer les recommandations en matière de dimensionnement.

En résumé, les résultats et éléments précédemment énoncés permettraient, à partir de la surface

de la zone à irriguer, de baser un dimensionnement sur : (1) Une efficacité d'application maximisée, (2) une distribution de l'eau présentant un arrosage le plus uniforme possible, (3) la prise en compte de contrainte budgétaire propre à chaque producteur et matériel vis-à-vis de la pompe utilisable, et (4) un respect des propriétés du sol en termes de vitesse d'infiltration.

Le tableau 12 reprend ces éléments, en considérant les calculs pour une mise en situation de dimensionnement sur une surface de 900 m<sup>2</sup> couverte par des bandes perforées de 30 m de long.

Le coût du matériel utilisé pour l'installation au Bénin a été fournis par la société béninoise ABD Consulting Inc © et repris au tableau 19 en annexe. Les prix sont exprimés en FCFA, la devise béninoise. Les couples espacement - pression sont choisis à partir des coefficients d'uniformité obtenus, pour lesquels un CU > 70% et un DUlq > 60% sont au minimum sélectionnés. La première colonne, 0.4 bar à 2 m, est utilisée comme référence, à partir desquelles un code couleur est déterminé. Celui-ci, appliqué aux autres espacement - pression, représente le rapport avec la valeur de référence en pourcentage, allant d'une diminution de 60% pour des couleurs brunes, à une augmentation de +20% pour des couleurs vertes. Par exemple, en passant de 2 à 3m d'espacement pour la même pression de 0.4 bar, le système est légèrement moins performant, mais le prix du matériel, le débit requis et le taux d'application correspondant se voient diminuer d'environ 30%.

TABLEAU 12 – Comparaison de l'efficacité d'application (%), des coefficients d'uniformité estimés (CU, DUlq et CV), du prix (FCFA), du débit total requis en entrée du système (l/min) et du taux d'application moyen estimé (mm/h) pour une installation de 900m<sup>2</sup> de 30 m de bande perforée selon différents couples de pression - espacement.

900 m <sup>2</sup> (30m de bande)						Légende*
	2m		2m50	3m	4m	
	0.4 bar	0.2 bar	0.4 bar	0.4 bar	0.2 bar	
Efficacité d'application	82%	90%	82%	82%	90%	-60%
CU	80%	78%	89%	81%	70%	-50%
DUlq	72%	60%	87%	67%	65%	-40%
CV	22%	26%	12%	22%	35%	-30%
Coût matériel	158 600 FCFA	158 600 FCFA	131 150 FCFA	114 850 FCFA	94 800 FCFA	-20%
Débit	803 l/min	581 l/min	631 l/min	516 l/min	290 l/min	-10%
Taux d'application moyen	56 mm/h	41 mm/h	46 mm/h	38 mm/h	21 mm/h	+0%
						+10%
						+20%

\*La légende indique, par un code couleur, l'intensité de la diminution ou l'augmentation des paramètres du couple pression - espacement considéré. Cette intensité se détermine à partir d'une valeur de référence : le couple 0.4 bar - 2m.

Cette approche d'étude des différentes possibilités permet de procéder selon l'ordre suivant : tout d'abord, quantifier la zone que le producteur souhaite couvrir, puis établir un tableau similaire en

fonction de ces dimensions. Une fois le budget analysé, le producteur a la possibilité de se baser soit sur la meilleure performance parmi les quatre premiers éléments, soit sur les caractéristiques de sa pompe. Naturellement, même si une pompe ne peut fournir, par exemple, les 630 l/min requis pour irriguer l'intégralité du système en une seule fois, les vannes situées à l'entrée des bandes perforées offrent la possibilité d'adapter cette contrainte. La valeur totale constitue en effet un point de départ pour orienter les recommandations d'utilisation. La pompe est représentée par le débit qu'elle peut fournir, cependant, des calculs tels que présentés en section 2.5 sont à appliquer une fois un schéma établi.

### 3.3.2 Conditions d'utilisation des systèmes

Afin de diminuer l'influence du vent, il est conseillé d'orienter les bandes parallèlement à sa direction. Le positionnement du système, selon les observations menées au Bénin sur des bandes impactées par un vent parallèle, doit alors considérer la possibilité d'un à deux mètres de décalage de la surface couverte par le système, tel qu'illustré en figure 25. De manière générale, il est communément déconseillé d'utiliser les systèmes d'aspersion lors de vents importants.

Les perforations ayant un jet de faible hauteur atteignant environ 20 à 30 cm à 20 cm de distance de la bande, et les distribution en eau pouvant être plus faible au niveau même de la bande (figure 22) il est conseillé d'éviter la plantation à niveau de la bande. Une culture idéale sont des plantes de tailles similaire au Crin-crin, soit atteignant un maximum de 20 à 30 cm, dispersées sur la parcelle. Des cultures telles que l'oignon peuvent également être adaptées au système (PRACTICA, 2018).

Les bandes perforées sont sensibles à la présence de particules en suspension dans l'eau, colmatant les perforations. L'utilisation d'un filtre sur le tuyau d'aspiration de la pompe constitue une première barrière aux particules, devant alors régulièrement être entretenu (KELLER & KARMELI, 1974). De plus, une purge régulière est nécessaire pour maintenir le système d'aspersion dans un état optimal. Cette opération s'effectue simplement en ouvrant l'extrémité de la bande et en laissant s'écouler l'eau. Cette pratique a également été conseillée par MERRIAM & KELLER, 1979 et le référentiel PRACTICA, 2018, en fonction de la fréquence d'utilisation. Passer la main sur la bande perforée en utilisation peut également facilement déboucher les perforations.

KELLER & KARMELI, 1974 et PRACTICA, 2018 conseille également de placer les systèmes sur une topographie homogène.

### 3.3.3 Application au Bénin

L'objectif de dimensionnement appliqué au Bénin est de proposer une adaptation sur base des systèmes déjà installés, avec un espacement imposé de 2.5 m. La première parcelle est décrite en détail dans cette section, l'ensemble des calculs pour les différentes parcelles est repris au tableau 20 en annexe.

En considérant la pression de fonctionnement de 0.4 bar, il est possible d'appliquer différents scénarios : (A) Le système n'est pas modifié et l'éloignement maximal de la pompe est estimé par rapport à la situation actuelle (50m), en réponse au besoin d'éloignement de la pompe pour suivre l'assèchement du bas-fond. (B) Le système est prolongé par le nombre de bande de même longueur que la situation actuelle (12 m). (C) Le calcul du nombre de bandes maximales de 30m de longueur est effectué.

La parcelle n°1 présente une pente dont l'élévation est de 3.51 m par rapport au bas de pente. Les bandes perforées y ont été disposées perpendiculairement dans le sens de la pente. Le calcul est donc effectué en considérant une dénivellation de 3.51m à -2m de profondeur sur cette distance. Le

débit nécessaire dans chaque bande pour assurer la pression de 0.4 bar est de 26.8 L/min (calculé à partir du tableau 2) :

**(A)** La distance maximale à laquelle le producteur peut éloigner sa pompe du système est de 1600 m. Cette valeur désigne la longueur du tuyau primaire, faisant la jonction entre la pompe et le système. Le tuyau primaire actuel étant de 50m, ce producteur peut donc considérer une marge de 1550 m.

**(B)** Le nombre maximal de bandes qu'il peut être possible d'utiliser sur un même évènement d'irrigation est de 17 (540 m<sup>2</sup>), par rapport aux 12 bandes actuellement installées (380m<sup>2</sup>).

**(C)** Le nombre de bande de 30 m est de 7 (600m<sup>2</sup>) pour un fonctionnement à 92% de la capacité maximale de la pompe. Cette légère marge permettrait d'éloigner la pompe de 250 m par rapport à son point de départ, sans dénivellation considérée.

Cet exemple permettrait de considérer le scénario B pour maximiser la surface couverte par le système pour son utilisation actuelle à 12 m de longueur et pour l'utilisation de la capacité maximale de la pompe du producteur de la parcelle 1.

### 3.4 Perspectives

L'uniformité et l'efficacité mesurées en surface seules ne permettent pas de déterminer entièrement si ce type d'irrigation est totalement efficace, l'eau pouvant être uniformément sur-appliquée (PITTS et al., 1996). En effet, bien qu'un système ait une uniformité élevée, une sur- ou sous-irrigation par rapport au besoin en eau de la plante entraînerait de multiples problèmes, notamment en termes de salinité, ainsi que des conséquences importantes sur le stress et le rendement globale de la culture (BOS & NUGTEREN, 1990; MERRIAM & KELLER, 1979; CLEMMENS, 1991; PITTS et al., 1996; BURT et al., 1997; BARRAGAN et al., 2010; ASCOUGH & KIKER, 2002). Établir un calendrier d'irrigation adéquat, en étudiant la consommation en eau nécessaire de la culture, le type de sol et les conditions du milieu doit être évalué en complément de ces mesures d'uniformité et d'efficacité d'application (BOS & NUGTEREN, 1990; PITTS et al., 1996; BURT et al., 1997; DARKO et al., 2017). La connaissance de ces informations supplémentaires à celles précédemment mentionnées influence également le choix d'espacement et de pression à utiliser dans le système, et inversement (DARKO et al., 2017). Une meilleure compréhension et évaluation de la différence entre l'utilisation du système et de l'arrosage à la main pourrait également être effectuée.

Une première observation de la différence entre ces deux méthodes peut tout de même être mentionnée. Celle-ci concerne la taille des gouttes résultants des deux méthodes et leur impact sur le sol. Elle est plus importante pour l'arrosage à la main, de même que l'intensité de l'impact des gouttes sur le sol. En effet, l'entièreté du débit durant l'arrosage à la main se concentre sur une surface réduite. Le producteur se déplace ensuite sur l'entièreté de sa parcelle et répète cette application.

Une légère détérioration des jeunes plants de Crin-crin est d'ailleurs visible après passage du tuyau d'arrosage (figure 26a), par rapport à l'utilisation du système (26b).





(a) Photographie des jeunes pousses de Crin-crin, prise environ 10 min après arrosage à la main.



(b) Photographie des jeunes pousses de Crin-crin, prise environ 15 à 20 min, après irrigation avec le système.

FIGURE 26 – Photographie de jeunes pousses de Crin-crin après arrosage à la main (a) et utilisation du système (b) sur une culture au Bénin.

## 4 Conclusion

Bien que le système par bande perforée soit déjà employé en Afrique de l'Ouest, son utilisation est peu documentée dans la littérature actuelle. Comprendre le fonctionnement de ce matériel revêt une importance cruciale pour optimiser son utilisation. Cette étude l'a progressivement caractérisé, en examinant ses composants individuels jusqu'à son évaluation globale.

La caractérisation hydraulique a permis de définir les éléments nécessaires à la base du dimensionnement et d'évaluation des systèmes. Grâce à ces résultats, il a été possible de fournir des outils aisément utilisables par l'ONG pour conseiller une approche de dimensionnement, incluant des conseils d'aménagement et de conditions d'utilisation de ces derniers. Ces outils intègrent également des considérations de contraintes budgétaires, technique selon la pompe utilisée, et d'adéquation aux propriétés du sol. L'importance d'établir les conditions d'espacement et de pression à appliquer a facilement été observée par les mesures des coefficients d'uniformité CU, DU<sub>lq</sub> et CV. Ceux-ci se sont effectivement révélés pour la condition la moins favorable à 49, 48 et 58%, contre des valeurs optimales maximisées à 89, 87 et 12%.

Cette approche a révélé que le processus de dimensionnement va bien au-delà de la simple sélection d'une configuration idéale basée uniquement sur les performances observées. La conception considérée comme "idéale" varie en fonction des différentes perspectives et contraintes prises en compte. Ce qui peut être jugé idéal en termes de performances peut perdre de sa pertinence face à des considérations budgétaires. L'étude fournit un ensemble d'outils et de conditions d'utilisation du système pour envisager différentes perspectives du dimensionnement. Une fois les données rassemblées et comparées, la prise de décision implique alors des compromis pour choisir la configuration à adopter.

Il est important de noter que même en adoptant un système et en l'utilisant de manière optimale selon les éléments discutés précédemment, cela ne garantit pas automatiquement une amélioration de la production agricole par rapport aux méthodes habituelles. Cette étude a permis d'offrir une première approche d'évaluation de l'efficacité d'application des bandes perforées. Élevée à 78% au Bénin sous les conditions climatiques de mesure, elle permet d'ajuster les quantités d'eau nécessaires à appliquer depuis l'exhaure, afin de garantir la réception du volume souhaité pour la culture. La connaissance de ce volume nécessaire implique la détermination des besoins en eau de la culture et la prise en considération des pratiques agricoles qui peuvent être complétées par l'utilisation du système.

## Références

- AHMARI, H., & KABIR, S. I. (2019). Applied fluid mechanics lab manual.
- ALI, M. H. (2011). *Practices of irrigation & on-farm water management : volume 2*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7637-6>
- ALLEN. (1996). Relating the hazen-williams and darcy-weisbach friction loss equations for pressurized irrigation. *Applied Engineering in Agriculture*, 12(6), 685-693. <https://doi.org/10.13031/2013.25699>
- ALLEN, R., PEREIRA, L., RAES, D., & SMITH, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. *Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 56, 26-40.
- ANDRADE, D. V. (1990). Diss.(Mestre) - ESALQ Bibliografia.
- ASCOUGH, G., & KIKER, G. (2002). The effect of irrigation uniformity on irrigation water requirements. *Water SA*, 28(2), 235-242. <https://doi.org/10.4314/wsa.v28i2.4890>
- BAILEY, B. J. (1975). Fluid flow in perforated pipes. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 17(6), 338-347. [https://doi.org/10.1243/JMES\\_JOUR\\_1975\\_017\\_048\\_02](https://doi.org/10.1243/JMES_JOUR_1975_017_048_02)
- BARRAGAN, J., COTS, L., MONSERRAT, J., LOPEZ, R., & WU, I. (2010). Water distribution uniformity and scheduling in micro-irrigation systems for water saving and environmental protection. *Biosystems Engineering*, 107(3), 202-211. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.07.009>
- BERNUTH, R. D. v., & WILSON, T. (1989). Friction factors for small diameter plastic pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(2), 183-192. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1989\)115:2\(183\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:2(183))
- BIAO, E. I., OBADA, E., ALAMOU, E. A., ZANDAGBA, J. E., CHABI, A., AMOUSSOU, E., ADOUNKPE, J., & AFOUDA, A. (2021). Hydrological modelling of the mono river basin at athiéomé. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 384, 57-62. <https://doi.org/10.5194/piahs-384-57-2021>
- BOS, M. G., & NUGTEREN, J. (1990). *On irrigation efficiencies* (4. ed). ILRI.
- BROWN. (2002). The history of the Darcy Weisbach Equation.
- BURNEY, J. A., & NAYLOR, R. L. (2012). Smallholder irrigation as a poverty alleviation tool in sub-saharan africa. *World Development*, 40(1), 110-123. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2011.05.007>
- BURT, C. M., HARDY, L. A., HOWELL, T. A., & EISENHAUER, D. E. (1997). Irrigation performance measures : efficiency and uniformity.
- CARRIÓN, P., TARJUELO, J., & MONTERO, J. (2001). SIRIAS : a simulation model for sprinkler irrigation : i. description of model. *Irrigation Science*, 20(2), 73-84. <https://doi.org/10.1007/s002710000031>

- CAUSAPÉ, J., QUÍLEZ, D., & ARAGÜÉS, R. (2006). Irrigation efficiency and quality of irrigation return flows in the ebro river basin : an overview. *Environmental Monitoring and Assessment*, 117(1), 451-461. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-0763-8>
- CHRISTIANSEN, E. (1942). Irrigation by sprinkling.
- CLEMMENS, A. J. (1991). Irrigation uniformity relationships for irrigation system management. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117(5), 682-699. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1991\)117:5\(682\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1991)117:5(682))
- DARKO, R. O., SHOUQI, Y., JUNPING, L., HAOFANG, Y., & XINGYE, Z. (2017). Overview of advances in improving uniformity and water use efficiency of sprinkler irrigation. *Int J Agric & Biol Eng*, 10(2), 1-15.
- DE PASCALE, S., COSTA, L. D., VALLONE, S., BARBIERI, G., & MAGGIO, A. (2011). Increasing water use efficiency in vegetable crop production : from plant to irrigation systems efficiency. *HortTechnology*, 21(3), 301-308. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.21.3.301>
- DE WRACHIEN, D., & LORENZINI, G. (2006). Modelling jet flow and losses in sprinkler irrigation : overview and perspective of a new approach. *Biosystems Engineering*, 94(2), 297-309. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.02.019>
- DJAGBA, J. F., RODENBURG, J., ZWART, S. J., HOUNDAGBA, C. J., & KIEPE, P. (2014). FAILURE AND SUCCESS FACTORS OF IRRIGATION SYSTEM DEVELOPMENTS : a CASE STUDY FROM THE OUÉMÉ AND ZOU VALLEYS IN BENIN : COMPARING IRRIGATION SYSTEM DEVELOPMENTS IN BENIN. *Irrigation and Drainage*, 63(3), 328-339. <https://doi.org/10.1002/ird.1794>
- EMMANUEL, L., HOUNGUÈ, N., BIAOU, C., & BADOU, D. (2019). Statistical analysis of recent and future rainfall and temperature variability in the mono river watershed (benin, togo). *Climate*, 7(1), 8. <https://doi.org/10.3390/cli7010008>
- FAO. (2006). *Guidelines for soil description* (4th ed). Food ; Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2020). *WaPOR database methodology : version 2*. <https://doi.org/10.4060/ca9894en>
- FRIZZONE, J. A., & VIEIRA, A. T. (1998). CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DE UM TUBO GOTEJADOR.
- GARDENA. (2006). Mode d'emploi pompe de surface pour arrosage Gardena : modèle 3000/3 Jet Art. 1704 ; 3000/4 Jet Art. 1706 ; 3500/4 Jet Art. 1708.
- GBAGUIDI, F. (2010). Situation de l'irrigation au Benin. *Irrigation in West Africa : Current Status and a View to the Future*, 63-89.
- GRUBER, I., KLOOS, J., & SCHOPP, M. (2009). Seasonal water demand in benin's agriculture. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.08.011>

- HENDAWI, M. (2006). *Etude des pertes d'eau par évaporation et dérive sur un jet d'asperseur* (thèse de doct.). Sciences de l'environnement. Doctorat Mécanique des Fluides, Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II, Ecole nationale supérieure de physique de Marseille.
- HOWELL. (2003). Irrigation Efficiency.
- JENSEN, M. E. (2007). Beyond irrigation efficiency. *Irrigation Science*, 25(3), 233-245. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0060-5>
- JFW. (2022). Proposition de projet : renforcer la résilience climatique des agriculteurs d'Athiémé par la restauration écologique des zones humides situées dans la plaine inondable du fleuve Mono (MYP 5).
- KELLER & KARMELI. (1974). Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE*, 17(4), 0678-0684. <https://doi.org/10.13031/2013.36936>
- KOHL, R. A., DEBOER, D. W., & KOHL, K. D. (1987). Measurement of low pressure sprinkler evaporation loss. *Transactions of the ASAE*, 30(4), 1071-1074. <https://doi.org/10.13031/2013.30522>
- LORENZINI. (2006). WATER DROPLET DYNAMICS AND EVAPORATION IN AN IRRIGATION SPRAY. *Transactions of the ASABE*, 49(2), 545-549. <https://doi.org/10.13031/2013.20397>
- MARINHO, A. B., DANTAS NETO, J., AZEVEDO, C. A. V. d., & AZEVEDO, H. M. d. (1999). AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DO TUBO PERFURADO SANTAPE. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 3(3), 316-321. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v3n3p316-321>
- MARTINS. (2017). *CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DE TUBOS DE POLIETILENO PARA IRRIGAÇÃO PERFURADOS A LASER* (thèse de doct.). Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Departamento de Engenharia de Sistemas Agrícolas – LEB.
- MASHALKAR, S. A., & NAGDEWE, S. P. (2021). Numerical investigation on the friction factor estimation for laminar and turbulent flow in smooth pipe. In A. PATNAIK, E. KOZESCHNIK & V. KUKSHAL (Éd.), *Advances in materials processing and manufacturing applications* (p. 489-496). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0909-1\\_50](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0909-1_50)
- MASHNIK, D., JACOBUS, H., BARGHOOTH, A., JIAYU WANG, E., BLANCHARD, J., & SHELBY, R. (2017). Increasing productivity through irrigation : problems and solutions implemented in africa and asia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22, 220-227. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.02.005>
- MCJANNET, D. L., COOK, F. J., & BURN, S. (2013). Comparison of techniques for estimating evaporation from an irrigation water storage : EVAPORATION FROM AN IRRIGATION WATER STORAGE. *Water Resources Research*, 49(3), 1415-1428. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20125>

- MELO, D., ALMEIDA, CAMARGO & FRIZZONE. (2017). CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DE TUBOS DE POLIETILENO PARA IRRIGAÇÃO PERFURADOS A LASER. *IRRIGA*, 1(1), 102-109. <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v1n1p102-109>
- MELO, D., FRIZZONE, CAMARGO & BOMBARDELLI, W. W. Á. (2019). Head loss in laser-perforated thin-walled polyethylene pipes for irrigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(5), 317-323. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n5p317-323>
- MERRIAM & KELLER. (1979). FARM IRRIGATION SYSTEM EVALUATION : a GUIDE FOR MANAGEMENT.
- MONIRUZZAMAN, S. M., FUKUHARA, T., & TERASAKI, H. (2011). EXPERIMENTAL STUDY ON WATER BALANCE IN a NEGATIVE PRESSURE DIFFERENCE IRRIGATION SYSTEM. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 67(4), I\_103-I\_108. [https://doi.org/10.2208/jscejhe.67.I\\_103](https://doi.org/10.2208/jscejhe.67.I_103)
- MOTT, R., & UNTENER, J. (2015). *Applied Fluid Mechanics*.
- NEPAD/FAO. (2005). *Appui a' la mise en ceuvre du NEPAD-PDDAA. TCP/BEN/2906* (. Vol. III de V : Programme d'aménagement et de mise en valeur de bas-fonds et de Petits pe'rimètres irrigue's.).
- NONVIDE, G. M. A. (2018). Irrigation adoption : a potential avenue for reducing food insecurity among rice farmers in benin. *Water Resources and Economics*, 24, 40-52. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2018.05.002>
- PEDRAS, C., & PEREIRA, L. (2001). A simulation model for design and evaluation of micro-irrigation systems. *Irrigation and Drainage*, 50(4), 323-334. <https://doi.org/10.1002/ird.22>
- PITTS, K. PETERSON, G. GILBERT & R. FASTENAU. (1996). Field assessment of irrigation system performance. *Applied Engineering in Agriculture*, 12(3), 307-313. <https://doi.org/10.13031/2013.25653>
- PLAYÁN, E., SALVADOR, R., FACI, J., ZAPATA, N., MARTÍNEZ-COB, A., & SÁNCHEZ, I. (2005). Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. *Agricultural Water Management*, 76(3), 139-159. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.01.015>
- PRACTICA. (2018). Guide pour l'aménagement et l'utilisation des bandes d'aspersion.
- PROVENZANO, G., & PUMO, D. (2004). Experimental analysis of local pressure losses for microirrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(4), 318-324. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2004\)130:4\(318\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:4(318))
- REBEKIĆ, A., LONČARIĆ, Z., PETROVIĆ, S., & MARIĆ, S. (2015). PEARSON'S OR SPEARMAN'S CORRELATION COEFFICIENT - WHICH ONE TO USE ? *Poljoprivreda*, 21(2), 47-54. <https://doi.org/10.18047/poljo.21.2.8>
- REINDERS, F. B., van der STOEP, I., & BACKEBERG, G. R. (2013). IMPROVED EFFICIENCY OF IRRIGATION WATER USE : a SOUTH AFRICAN FRAMEWORK : IMPROVED

- EFFICIENCY OF IRRIGATION WATER USE. *Irrigation and Drainage*, 62(3), 262-272. <https://doi.org/10.1002/ird.1742>
- ROBIN AMERICA, I. (2001). SERVICE MANUAL EY15-3, EY20-3 ENGINES.
- ROCHA, H. S. d., MARQUES, P. A. A., CAMARGO, A. P. d., FRIZZONE, J. A., & SARETTA, E. (2017). Internal surface roughness of plastic pipes for irrigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(3), 143-149. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n3p143-149>
- SAN-FU. (s. d.). Irrigational catalog (spray tube).
- SAWA, A. (2002). Module 9 Systèmes d'irrigation localisée : planification, conception, exploitation et maintenance. *Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) Bureau sous-régional pour l'Afrique orientale et australe (SAFR)*, 29(342), 487. <https://doi.org/10.1017/S1026881200127618>
- SAWA & FRENKEN. (2002). Module 1 : Le développement d'un projet d'irrigation, un processus aux multiples facettes. *Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) Bureau sous-régional pour l'Afrique orientale et australe (SAFR)*, 29(342), 487. <https://doi.org/10.1017/S1026881200127618>
- SAWA, P., & FRENKEN. (2001). Module 8 : Systèmes d'irrigation par aspersion : planification, conception, exploitation et maintenance. *Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et Bureau sous-régional pour l'Afrique orientale et australe (SAFR)*, 29(342), 487. <https://doi.org/10.1017/S1026881200127618>
- SCALOPPI, E. J., & ALLEN, R. G. (1993). Hydraulics of irrigation laterals : comparative analysis. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(1), 91-115. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:1\(91\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:1(91))
- SCHNEIDER. (2000). EFFICIENCY AND UNIFORMITY OF THE LEPAAND SPRAY SPRINKLER METHODS : a REVIEW. *Transactions of the ASAE*, 43(4), 937-944. <https://doi.org/10.13031/2013.2990>
- SILVA, Y. F., LIMA, L. A., THEBALDI, M. S., BARROS NOGUEIRA, V. H., DIOTTO, A. V., & ANDRADE, J. F. C. (2022). Hydraulic characterization of porous pipes. *Water Supply*, 22(1), 220-237. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.279>
- SMAJSTRLA, A. G., & ZAZUETA, F. S. (2003). Evaporation loss during sprinkler irrigation. *Agricultural and Biological Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida*.
- SOLOMON. (1979). Manufacturing variation of trickle emitters. *Transactions of the ASAE*, 22(5), 1034-1038. <https://doi.org/10.13031/2013.35150>
- TIERCELIN & VIDAL. (2006). *Traité d'irrigation*.

- TRETTEL, B., & EZEKOYE, O. A. (2015). Theoretical range and trajectory of a water jet. *Volume 7A : Fluids Engineering Systems and Technologies*, V07AT09A007. <https://doi.org/10.1115/IMECE2015-52103>
- VON BERNUTH, R., & SOLOMON, K. (1986). Emitter construction. In *Developments in agricultural engineering* (p. 27-52). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42615-4.50007-2>
- WU & BARRAGAN. (2000). DESIGN CRITERIA FOR MICROIRRIGATION SYSTEMS. *Transactions of the ASAE*, 43(5), 1145-1154. <https://doi.org/10.13031/2013.3007>
- ZANON, R. TESTEZLAF & E. J. MATSURA. (2000). A DATA ACQUISITION SYSTEM FOR SPRINKLER UNIFORMITY TESTING. *Applied Engineering in Agriculture*, 16(2), 123-127. <https://doi.org/10.13031/2013.5071>



## 5 Annexes

### 5.1 Matériel et méthode

#### Coefficient de variation $CV_f$

Du aux variations existantes lors de leur fabrication, les tuyaux perforés et goutteurs présentent des variations dans le débit fourni par chaque émetteur. L'objectif de fabrication des émetteurs en irrigation localisée est d'obtenir un débit uniforme et constant le long de la bande, un diamètre suffisant pour éviter le colmatage, un faible coût et une résistance appropriée du matériau (Vermeiren & Jobling, 1980, cité par MARINHO et al., 1999).

La variation du débit dû à la géométrie des perforations peut avoir une importance plus élevée que la variation du débit du aux différences de pression le long de la bande. Ces différences exercent un rôle important dans l'uniformité de l'émission d'eau ainsi que l'efficacité de l'application de l'eau par le système (MARTINS, 2017). Le diamètre des perforations est un des éléments le plus sensible à maintenir constant lors de sa fabrication, avec une variation du débit relatif au diamètre au carré (VON BERNUTH & SOLOMON, 1986).

Le coefficient de variation de fabrication  $CV_f$  est le paramètre utilisé pour représenter cette variation de conception induisant une non-uniformité dans les émetteurs (SOLOMON, 1979; VON BERNUTH & SOLOMON, 1986; MARINHO et al., 1999; SAWA, 2002). Il est le rapport entre l'écart-type du débit des perforations et le débits moyens, déterminé à une pression de référence (équation 22).

$$CV_f = 100 * \frac{s}{q_m} \quad (22)$$

Suivant sa valeur, normalement établie au préalable avant emploi et avant vieillissement, des normes de l'ASAE (1990) et SOLOMON, 1979 ont été établies permettant ensuite de qualifier l'uniformité, de correcte à inacceptable. Celle-ci se base sur des critères de variations maximale de mesure de débit. KELLER & KARMELI, 1974 et Aznkot (1999) cité par SAWA, 2002 mentionnent, pour des émetteur à  $x = 0.5$ , une variation de débit admissible entre les émetteurs de 10 %. Plus précisément, le débit minimal ne doit pas être inférieur à 90 % de la valeur du débit moyen .

La détermination de ce type de coefficient est possible en supposant une distribution normale de la variation du débit. La mesure s'effectue en réalisant un échantillonnage aléatoire de 20 à 50 émetteurs le long d'un segment de bande perforée (FRIZZONE & VIEIRA, 1998; MARINHO et al., 1999; SAWA, 2002). Ces mesures devant se réalisant à l'aide d'un installation permettant la récolte des jets d'eau des perforations, similaire à celle utilisée pour l'étude d'Andrade (1990) (figure 27), le coefficient de variation n'a pas pu être déterminé.



FIGURE 27 – Dispositif utilisé par ANDRADE, 1990 pour la mesure de la relation débit - pression et du coefficient de variation de bande perforée pour une étude des bandes perforées Santeno ©.

TABLEAU 13 – Table du facteur  $F$  mesuré expérimentalement pour le tuyau perforé Santeno I © par MARTINS, 2017.  $N$  correspond au nombre de perforations considérées pour établir la valeur de  $F$ .

Tabela 6: Valores de  $F$  para o tubo Santeno I, com emissores espaçados de 0,15 m, em função do número de pares de saídas ( $N$ )

$N$	$F$	$N$	$F$
1	1	26-27	0,344
2	0,583	28	0,343
3	0,491	29-30	0,342
4	0,447	31-32	0,341
5	0,422	33-35	0,340
6	0,405	36-38	0,339
7	0,394	39-41	0,338
8	0,385	46-50	0,336
9	0,378	51-56	0,335
10	0,373	57-65	0,334
11	0,369	66-76	0,333
12	0,365	77-93	0,332
13	0,362	94-117	0,331
14	0,359	118-157	0,330
15	0,357	158-226	0,329
16	0,355	227-334	0,328
17	0,354	335-445	0,327
18	0,352	446-536	0,326
19	0,351	537-610	0,325
20	0,349	611-667	0,324
21	0,348		
22	0,347		
23-24	0,346		
25	0,345		

TABLEAU 14 – Caractéristiques des pompe des producteurs béninois.

Pompe	Pompe Alexandre	Pompe Patrice	Pompe Christian
Marque	Honda GX160, 5.5H	Robin, 5.0 EY20-3	WP20
Débit maximal	500 l/min ; 30 m <sup>3</sup> /h	1000 l/min ; 60m <sup>3</sup> /h	600 l/min ; 36m <sup>3</sup> /h
Hauteur maximale	55 m	32m	30m
Hauteur maximale d'aspiration	7 m	8m	8m
Puissance (**)	5.5 CV vaut 4.01 kW	5.0 HP vaut 3.72 kW	5.5 HP vaut 4.01 kW

(\*) La puissance est généralement exprimée en Cheval vapeur (CV) («Horsepower (HP)»), pour lequel 1 kW correspond à 1.341 CV.

## 5.2 Résultats et discussion

TABLEAU 15 – Coefficients d'uniformité réels calculés entre deux bandes, selon différentes pressions et espacements, obtenus à la suite des différents tests de distribution en eau effectués en Belgique.

	Espacement	4 m		2.4 m		
		Pression	0.2 bar	0.4 bar	0.2 bar	0.4 bar
CU	Test 1		72%	67%	66%	92%
	Test 2		71%	65%	49%	83%
	Test 3		76%	68%	54%	82%
	Ensemble des tests		73%	67%	56%	86%
DU <sub>lq</sub>	Test 1		60%	53%	57%	89%
	Test 2		60%	52%	42%	78%
	Test 3		68%	52%	44%	75%
	Ensemble des tests		62%	51%	46%	80%
CV	Test 1		34%	37%	45%	9%
	Test 2		34%	38%	59%	21%
	Test 3		29%	37%	52%	22%
	Ensemble des tests		32%	37%	52%	18%



FIGURE 28 – Photographie de l'orientation incorrecte d'une bande perforée causant une non-uniformité importante de la distribution en eau sur la zone irriguée.

TABLEAU 16 – Tableau élaboré par PLAYÁN et al., 2005 reprenant les facteurs influençant les pertes par évaporation et dérive liée au vent selon la littérature.

Table 1  
Bibliographical reports on the influence of irrigation system and meteorological variables on WDEL

Authors	System variables				Meteorological variables						
	$D_{\text{nozzle}}$	$D_{\text{drop}}$	$h$	$P$	$U$	$T$	RH	$e_s - e_0$	$R$	$ET_0$	
Frost and Schwalen (1955)	–			+	+	+	–	+			
Seginer (1971)					+	+	–		+		
Hermsmeier (1973)			+		+	+	–				
Yazar (1984)				+	+	+		+			
Edling (1985)		–	+		+						
Trimmer (1987)	–			+	+			+			
Keller and Bliesner (1990)	–			+	+					+	
Faci and Bercero (1991)					+						
Tarjuelo (1995)		–			+	+	–				
Silva and James (1988)		–			+	+	–				
Montero (1999)				+	+			+			
Tarjuelo et al. (2000)	–	–	+	+	+			+			
Faci et al. (2001)	–				+	+					
Playán et al. (2004)					+						

The considered variables are:  $D_{\text{nozzle}}$  (nozzle diameter),  $D_{\text{drop}}$  (drop diameter),  $h$  (nozzle elevation),  $P$  (operating pressure),  $U$  (wind speed),  $T$  (air temperature), RH (relative humidity),  $e_s - e_0$  (vapour pressure deficit),  $R$  (solar radiation), and  $ET_0$  (evapotranspiration).

WDEL signifie "Wind Drift and Evaporation Loss"

TABLEAU 17 – Tableau général des vitesses d'infiltration (mm/h) pour différents types de sols proposé par SAWA & FRENKEN, 2001

**Tableau 4**

**Vitesses d'infiltration types pour différents sols**

Type de sol	Vitesse d'infiltration (mm/h)
Argile	1 - 7
Limon argileux	7 - 15
Limon fin	15 - 25
Limon sableux	25 - 40
Sable	>40

TABLEAU 18 – Triangle textural fourni par la FAO, 2006 ayant permis de déterminer la texture du sol des parcelles au Bénin.

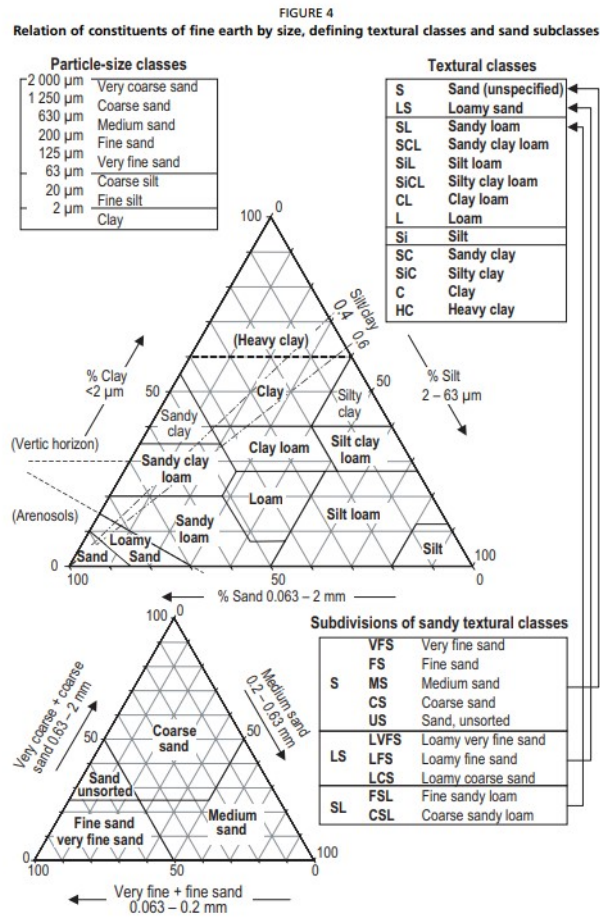


TABLEAU 19 – Coût (FCFA) du matériel d'irrigation au mètre et à l'unité, fourni par l'entreprise ABD Consulting Inc © et utilisé pour l'installation des systèmes en mars 2023 dans la région du sud-ouest Bénin.

Matériel (au mètre / à l'unité)	Coût (FCFA)
Bande perforée	110
Tube PVC 50mm	750
Té 50x32mm	3 500
Coude 50x32mm	3 000
Vanne 32mm	1 200
Té 50mm	3 500
HDPE 32 mm	4 500
Colle à PVC (1L)	12 000

TABLEAU 20 – Adaptation du dimensionnement réalisé au Bénin sur base des trois scénarios envisagés chez les producteurs béninois.

Scénario considéré	Alexandre		Patrice	Christian
	Parcelle 1	Parcelle 2		
Situation actuelle	380m <sup>2</sup>	380m <sup>2</sup>	270m <sup>2</sup>	240m <sup>2</sup>
A*	1500m (50m)	1800m (50m)	2000m (150m)	2600m (60m)
B**	17 B (540m <sup>2</sup> )	17 B (540m <sup>2</sup> )	16 B (510m <sup>2</sup> )	17 B (540m <sup>2</sup> )
C***	7 B (600m <sup>2</sup> )	7 B (600m <sup>2</sup> )	7 B (600m <sup>2</sup> )	7 B (600m <sup>2</sup> )

Scénario (A)\* : l'éloignement maximale de la pompe à partir d'un système de dimension identique à ce qui est déjà installé, en comparaison avec l'éloignement actuelle entre parenthèse.

Scénario (B)\*\* : le nombre maximal de bande de 12 m est calculé, pour un éloignement actuelle de la pompe.

Scénario (C)\*\*\* : le nombre maximale de bande de 30 m est calculé, pour un éloignement actuelle de la pompe.