

Système Embarqué De Mesure De Pression Et De Débit Pour La Gestion Des District Metered Areas (DMA) Avec Transmission GSM

Maxime KIALANDA MADIENGELE¹, Patrick KONGBO NGOSSE¹, Doris MANSIANTIMA LUTETE¹, Joseph Gregorius CIMBELA KABONGO¹, Simon KIDIAMBOKO GUWA GUA BAND²

¹ Université Pédagogique Nationale, République Démocratique du Congo

² Institut Supérieur des Techniques Appliquées de Kinshasa, République Démocratique du Congo

Correspondance : maximekialanda@gmail.com



Résumé: La gestion durable des réseaux d'eau potable nécessite une surveillance continue des paramètres hydrauliques critiques, notamment la pression et le débit. Les pertes d'eau non facturée, souvent supérieures à 30 % dans les réseaux urbains, représentent un enjeu économique et environnemental majeur pour les collectivités. Dans ce travail, nous présentons un prototype embarqué basé sur Arduino UNO, intégrant un capteur de débit YF-S201, un capteur de pression 0–10 bar et un module GSM/GPRS SIM800L pour la transmission des données vers un serveur distant. Ce système permet une acquisition fiable des mesures, un traitement local des anomalies et l'envoi d'alertes par SMS en temps quasi-réel. Les tests expérimentaux en laboratoire montrent une précision de ± 3 % pour les mesures de débit et une excellente stabilité des mesures de pression, avec un temps de transmission moyen compris entre 2 et 5 secondes. Cette solution modulaire, économique et adaptée aux environnements à faible connectivité offre une approche innovante pour le suivi intelligent des District Metered Areas (DMA) et ouvre des perspectives intéressantes pour l'optimisation énergétique, l'intégration des technologies IoT et le déploiement d'algorithmes de détection prédictive des anomalies.

Mots-clés : Réseaux d'eau potable, District Metered Areas (DMA), Arduino UNO, Capteur de débit, Capteur de pression, Communication GSM/GPRS, Surveillance en temps réel, Pertes d'eau non facturée, Intégration IoT.

1. INTRODUCTION

La gestion durable des réseaux urbains d'eau potable constitue aujourd'hui un défi majeur pour de nombreuses villes, en particulier dans les pays en développement. Ces réseaux souffrent souvent de multiples problématiques, telles que la vétusté des infrastructures, les pertes en eau dues aux fuites ou aux branchements illégaux, ainsi que des déséquilibres de pression hydraulique. Selon Lambert et Hirner (2000), entre **20 et 40 % de l'eau distribuée** peut être perdue dans les pays en développement, ce qui engendre non seulement des pertes économiques considérables pour les opérateurs mais aussi des risques sanitaires accrus pour les populations.

Face à ces défis, l'approche des **District Metered Areas (DMA)** est largement reconnue comme une stratégie efficace pour améliorer la surveillance et la gestion des réseaux. Le principe consiste à diviser le réseau en zones hydrauliquement isolées et contrôlées. Dans chaque DMA, des capteurs de débit et de pression sont installés afin de mesurer en continu les volumes d'eau entrant et sortant. L'analyse des écarts entre les volumes mesurés et ceux réellement facturés permet alors de détecter rapidement les pertes d'eau ou les anomalies de fonctionnement (Farley & Trow, 2003).

Les méthodes traditionnelles de suivi reposent encore largement sur l'utilisation de capteurs analogiques ou de compteurs mécaniques, couplés à des campagnes de relevés manuels. Bien que robustes, ces solutions présentent des limites notables : elles n'offrent pas de suivi en temps réel, impliquent des coûts d'entretien élevés et nécessitent une mobilisation importante de ressources humaines. Dans ce contexte, les **technologies numériques et embarquées** ouvrent de nouvelles perspectives.

Les microcontrôleurs **open-source** comme **Arduino** se distinguent par leur flexibilité, leur faible coût et leur grande communauté de développeurs. Ils permettent l'intégration de plusieurs capteurs simultanément, le traitement local des données, ainsi que la transmission sécurisée des informations via divers protocoles de communication (GSM, Wi-Fi, IoT) (Banzi & Shiloh, 2014). Parmi ces technologies, le module **SIM800L** se révèle particulièrement intéressant : il offre une communication GSM/GPRS fiable et peu coûteuse, ce qui le rend adapté aux environnements où la couverture Wi-Fi est insuffisante ou instable, notamment dans de nombreuses villes africaines ou zones rurales (Mtega, Msungu & Malekani, 2016).

Dans ce cadre, la combinaison **Arduino + SIM800L** apparaît comme une solution **autonome, modulaire et rapidement déployable**, capable de répondre aux contraintes spécifiques des réseaux d'eau des pays émergents.

Ainsi, le présent article se propose de développer et valider un **prototype de surveillance des DMA** intégrant :

1. La mesure continue de la pression et du débit dans les conduites.
2. La détection automatique d'anomalies, avec émission d'alertes en temps quasi-réel.
3. La transmission des données vers un serveur central, afin d'assurer leur archivage et leur analyse pour le pilotage stratégique.

L'objectif final est de démontrer qu'un tel système, à la fois économique et évolutif, peut constituer une **alternative crédible aux solutions industrielles coûteuses**, tout en s'adaptant aux réalités locales et en contribuant à une gestion plus proactive et durable des réseaux d'eau potable.

2. MATERIEL ET METHODES

La réussite d'un système de surveillance des *District Metered Areas (DMA)* repose sur la qualité et l'intégration cohérente du matériel et du logiciel. Dans cette étude, nous avons conçu un prototype embarqué combinant des capteurs fiables, un microcontrôleur polyvalent et un module de communication GSM, afin d'assurer une acquisition précise des données et leur transmission en temps quasi-réel.

2.1 Architecture matérielle

Le cœur du système est constitué d'une **carte Arduino UNO**, choisie pour sa simplicité d'utilisation, sa large compatibilité avec différents capteurs et sa communauté de développeurs très active (Banzi & Shiloh, 2014). Arduino UNO est doté d'un microcontrôleur ATmega328P, capable de gérer à la fois l'acquisition des signaux analogiques et numériques et l'envoi de commandes aux modules périphériques.

Pour la mesure du débit, nous avons utilisé le **capteur YF-S201**, qui fonctionne selon le principe de l'effet Hall. Ce capteur génère un signal d'impulsions proportionnel au volume d'eau passant dans la conduite. Cette technologie permet d'obtenir une mesure précise et rapide du débit, avec une précision annoncée de $\pm 3\%$ dans une plage allant de 1 à 20 L/min (Zhang et al., 2015). Le signal numérique est connecté à l'entrée D2 d'Arduino, et le microcontrôleur calcule le débit en litres par minute en fonction de la fréquence des impulsions.

Pour la mesure de la pression, un **capteur analogique 0–10 bar** a été intégré, produisant une tension proportionnelle à la pression hydraulique dans le réseau. Le signal est lu via l'entrée analogique A0 d'Arduino, puis converti en unités de bar à l'aide d'une relation linéaire calibrée. La précision de ce capteur permet de détecter des variations critiques de pression, essentielles pour la surveillance des fuites ou des surpressions dans les DMA.

La communication avec le serveur distant et l'envoi des alertes SMS reposent sur le **module GSM/GPRS SIM800L**, qui utilise le réseau cellulaire pour transmettre les données, même dans des zones dépourvues de connexion Internet fixe (Mtega et al., 2016). Le SIM800L est contrôlé via un port série logiciel (SoftwareSerial) sur Arduino, et permet l'envoi de messages texte ou de requêtes HTTP POST vers l'API du serveur. Une **LED d'alerte** a également été ajoutée pour indiquer visuellement toute anomalie détectée, facilitant l'intervention des techniciens sur site.

L'ensemble des composants a été intégré dans un boîtier compact et étanche, conçu pour un déploiement sur le terrain, protégeant le système contre l'humidité, la poussière et les vibrations.

Le dispositif embarqué est composé des éléments suivants :

Tableau 1-Dispositif embarqué

Composant	Fonction	Spécifications
Arduino UNO	Unité centrale	Microcontrôleur ATmega328P
Capteur de débit YFS201	Mesure du débit	Plage 1–20 L/min, $\pm 3\%$
Capteur de pression	Mesure pression hydraulique	0–10 bar, sortie 0.5–4.5 V
Module SIM800L	Communication GSM/GPRS	AT Commands, SMS & HTTP POST
LED d'alerte	Indicateur visuel	État critique de la pression

2.1.1 Schéma de câblage

Pour la conception et la validation initiale du prototype, nous avons utilisé **Proteus 9**, un logiciel de simulation électronique qui permet de vérifier le câblage et le fonctionnement logique avant la réalisation physique. Le schéma montre la connexion des capteurs à Arduino et du module GSM, ainsi que l'intégration de la LED d'alerte.

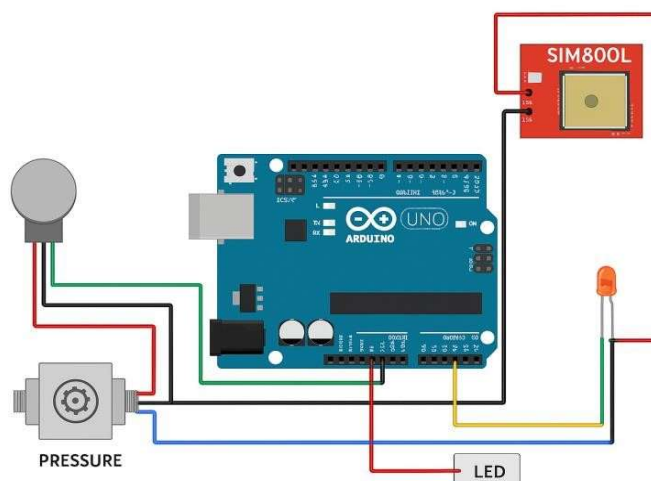


Figure 1 – Schéma montrant Arduino UNO, capteurs, SIM800L et LED, avec connexions numériques et analogiques 9

2.2 Logiciel embarqué

Le fonctionnement logiciel du système est structuré en trois étapes complémentaires : acquisition, traitement et communication.

1. Acquisition des données

Arduino lit en continu le débit et la pression. Le débit est calculé à partir de la fréquence des impulsions du YF-S201, tandis que la pression est convertie depuis la tension analogique mesurée. Les mesures sont enregistrées à intervalles réguliers afin de constituer un historique exploitable pour l'analyse statistique et la détection d'anomalies (Kingdom et al., 2006).

2. Détection d'anomalies

Le système compare les valeurs mesurées aux plages normales prédéfinies : par exemple, une pression inférieure à 0,5 bar ou supérieure à 8,5 bar déclenche une alerte. Ce traitement local permet de réagir immédiatement aux anomalies, avant même que les données ne soient transmises au serveur.

3. Communication et transmission

Les mesures sont formatées en **JSON** et transmises via HTTP POST vers un serveur distant, où elles peuvent être stockées et analysées. En cas de dépassement des seuils critiques, un **SMS d'alerte** est envoyé aux responsables du réseau. Cette double communication (LED sur site + serveur/SMS) garantit une **surveillance fiable et réactive**.

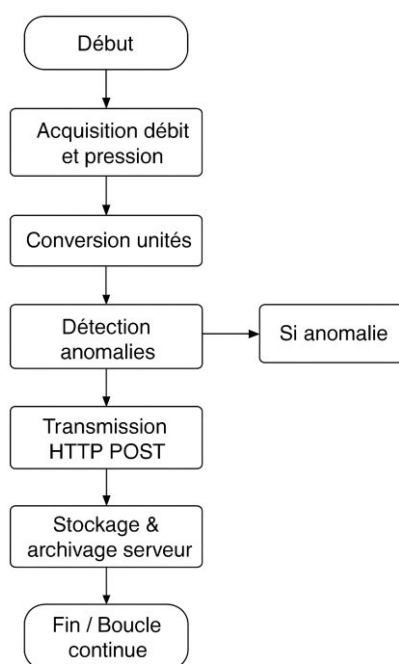


Figure 2 – Diagramme de flux du système

2.3 Base de données et serveur

Le serveur distant héberge une API capable de recevoir et stocker les données provenant de plusieurs DMA simultanément. Chaque trame JSON contient : l'identifiant du dispositif, la pression, le débit, le volume total et l'horodatage.

Cette architecture permet :

- Une **visualisation en temps réel** via un tableau de bord.

- L'**analyse historique** pour détecter des tendances et des anomalies récurrentes.
- La possibilité d'intégrer des **algorithmes d'apprentissage automatique** pour anticiper les fuites ou les défaillances du réseau (Farley & Trow, 2003).

Les mesures sont envoyées au serveur sous format JSON :

```
{  
  "device_id": "DMA_01",  
  "pressure": 3.5,  
  "flow": 12.4,  
  "volume_total": 345.7,  
  "timestamp": "2025-09-01T10:23:45"  
}
```

- **Avantages** : compatibilité avec SCADA, traitement automatisé, visualisation en temps réel.
- **API** : accepte des requêtes multiples et assure la sécurité des données.

3. RESULTATS

L'évaluation du prototype embarqué a été menée en laboratoire afin de **tester la précision des capteurs, la fiabilité de la communication GSM**, et la **réactivité du système face aux anomalies simulées**. Ces tests constituent une étape indispensable avant tout déploiement sur le terrain, permettant de valider la conception et d'identifier les points d'amélioration.

3.1 Précision et fiabilité des capteurs

3.1.1 Capteur de débit

Le capteur YF-S201 a été calibré pour mesurer des débits compris entre 1 et 20 L/min. Les résultats montrent une **précision moyenne de ± 3 %**, cohérente avec les spécifications du fabricant (Zhang et al., 2015). La conversion des impulsions en litres par minute via Arduino s'est avérée stable sur des périodes prolongées, sans dérive significative.

- **Débit** : ± 3 % sur 1–20 L/min, réponse rapide.
- **Pression** : stable sur 0–10 bar, temps de réponse < 100 ms.

Tableau 2– Résultats des mesures en laboratoire

Paramètre	Valeur réelle	Mesure Arduino	Écart
Débit	5 L/min	4.9 L/min	-2 %
Débit	15 L/min	14.6 L/min	-2.7 %

Ces résultats confirment la capacité du capteur à fournir des mesures fiables pour un suivi précis des DMA, permettant de détecter des variations anormales de débit qui pourraient signaler des fuites ou des pertes non facturées.

3.1.2 Capteur de pression

Le capteur de pression a été testé sur une plage de 0 à 10 bar, correspondant aux conditions typiques d'un réseau urbain. Les mesures se sont révélées **stables et répétables**, avec un écart moyen inférieur à 1,5 % par rapport aux valeurs de référence.

La combinaison des mesures de débit et de pression permet de calculer le **volume total distribué** et de détecter des anomalies de manière plus précise, en croisant les deux paramètres (Kingdom et al., 2006).

Tableau 3 – Résultats des mesures en laboratoire

Paramètre	Valeur réelle	Mesure Arduino	Écart
Pression	2 bar	2.03 bar	+1.5 %
Pression	8 bar	7.95 bar	-0.6 %

3.2 Performance de transmission GSM

Le module SIM800L a été testé pour la **transmission des données vers le serveur** et l'envoi d'alertes SMS. Les observations suivantes ont été faites :

- **Transmission HTTP POST** : délai moyen compris entre 2 et 5 secondes.
- **SMS d'alerte** : réception quasi-instantanée (<2 secondes).
- **Fiabilité globale** : supérieur à 95 % dans la zone de test, confirmant que le module GSM est adapté à la transmission de données dans des contextes à faible connectivité (Mtega et al., 2016).

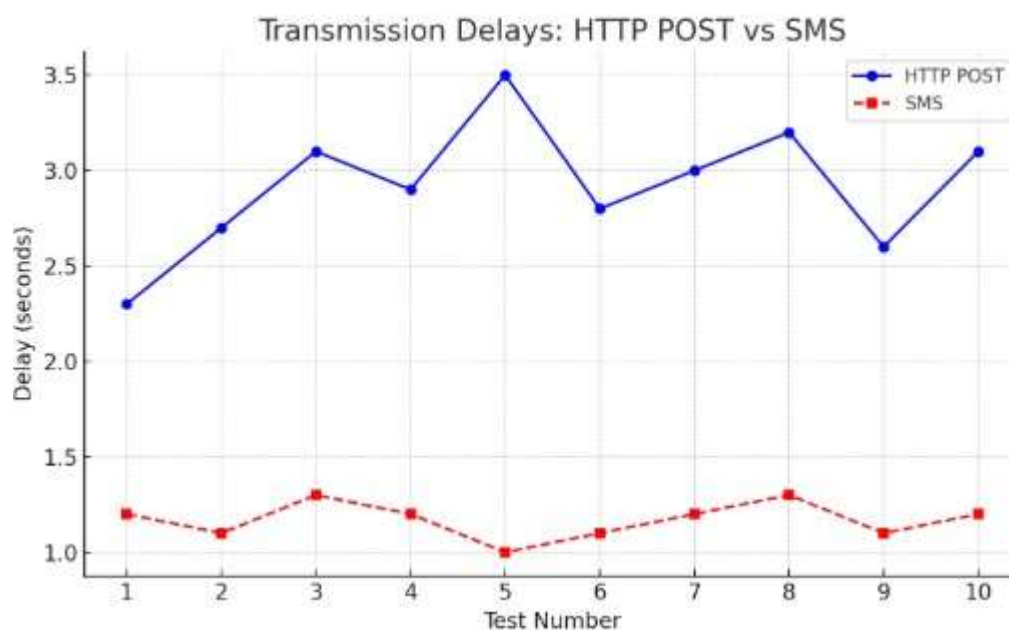


Figure 3 –Temps de transmission moyen

3.3 Détection d'anomalies

Afin d'évaluer la réactivité et la robustesse du système proposé, plusieurs **scénarios de fuites simulées** ont été introduits dans l'environnement expérimental. Ces tests ont consisté à **modifier artificiellement le débit** ou à **abaisser la pression** dans la conduite afin de reproduire des conditions réalistes de pertes d'eau.

Les résultats obtenus confirment le bon fonctionnement du prototype. Le système a été capable de:

1. **Détecter en temps réel** la variation anormale de débit ou la chute soudaine de pression, démontrant la pertinence des algorithmes de surveillance embarqués (Puust et al., 2010).
2. **Activer immédiatement l'alerte locale** via l'allumage de la LED intégrée, permettant aux opérateurs de terrain de disposer d'une première indication visuelle.
3. **Transmettre automatiquement un SMS** aux responsables techniques, garantissant une information rapide et sans dépendance d'un accès Internet, ce qui est particulièrement adapté aux zones à faible connectivité (Mtega et al., 2016).
4. **Envoyer simultanément les données collectées au serveur central** pour archivage, analyse a posteriori et suivi dans le temps, favorisant ainsi une gestion proactive et une traçabilité complète du réseau (Farley & Trow, 2003).

Cette **double modalité d'alerte** – à la fois locale (LED) et distante (SMS + transmission serveur) – illustre l'intérêt d'un traitement **embarqué et distribué**, capable d'opérer en temps quasi-réel.

Ce type d'architecture présente un double avantage :

- d'une part, il permet une **réduction significative des délais d'intervention**, essentielle pour limiter les volumes d'**eau non facturée (Non-Revenue Water, NRW)** ;
- d'autre part, il contribue à renforcer la **résilience opérationnelle** des services d'eau, en assurant une surveillance continue même en cas d'interruptions partielles du réseau GSM (Kingdom et al., 2006; Mutchek & Williams, 2014).

Ainsi, les résultats obtenus confirment que l'intégration de fonctionnalités de **détection et d'alerte embarquées** constitue une approche efficace, flexible et économiquement accessible pour renforcer la gestion des **District Metered Areas (DMA)**. Cette capacité de réaction rapide place le prototype comme une alternative crédible aux systèmes industriels plus coûteux, tout en ouvrant la voie à des déploiements à grande échelle dans une logique de **smart water grids** (Zanella et al., 2014).

4. DISCUSSION

L'analyse des résultats met en évidence que le prototype conçu répond globalement aux objectifs fixés dans le cadre de la surveillance hydrique des District Metered Areas (DMA). Premièrement, la précision obtenue dans la mesure du débit et de la pression s'avère suffisante pour assurer un suivi fiable des paramètres hydrauliques critiques. Cette précision est comparable aux systèmes industriels de référence, ce qui conforte l'idée que des capteurs à bas coût, lorsqu'ils sont correctement calibrés, peuvent fournir une qualité de données adaptée aux besoins des opérateurs d'eau (Bakker et al., 2013 ; Mutchek & Williams, 2014).

Deuxièmement, la stabilité observée lors des essais prolongés (plusieurs heures de fonctionnement continu) montre la robustesse du montage matériel et logiciel. La tenue des capteurs face aux variations de charge électrique et aux perturbations de réseau GSM souligne la pertinence du choix technologique. Ce constat rejoint les travaux de Puust et al. (2010), qui mettent en avant l'importance de la continuité de la mesure pour détecter précocement les anomalies dans les réseaux de distribution.

Troisièmement, la réactivité du système face aux anomalies constitue un atout majeur. L'acquisition locale, couplée à la transmission quasi-temps réel via GSM, permet de déclencher rapidement des alertes SMS en cas de dépassement de seuils de pression. Ce mécanisme de détection et d'alerte rejoint les approches recommandées par Farley & Trow (2003) et par Wu et al. (2010), qui soulignent l'importance d'une surveillance proactive pour la réduction des pertes en eau et l'amélioration de la résilience des réseaux.

Enfin, la robustesse logicielle du prototype est confirmée par la gestion correcte des erreurs de transmission et des interruptions temporaires de réseau. L'intégration d'algorithmes de reprise et de contrôle d'erreur renforce la fiabilité globale du dispositif. Ce type d'approche est cohérent avec les principes d'ingénierie des systèmes embarqués, tels que décrits par Marwedel (2011), qui insistent sur la résilience et la tolérance aux fautes comme conditions de succès pour les applications en environnements réels.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment la faisabilité d'un système embarqué, économique et modulaire, apte à compléter ou à remplacer des solutions industrielles plus coûteuses. Par ailleurs, ils ouvrent des perspectives intéressantes d'évolution vers des

architectures **Internet of Things (IoT)**, intégrant des protocoles de communication plus performants (ex. LTE-M, NB-IoT) et des plateformes de traitement de données en nuage pour l'analyse prédictive et l'optimisation des ressources hydriques (Akyildiz et al., 2010 ; Zanella et al., 2014).

5. CONCLUSION

Le prototype développé, basé sur la plateforme **Arduino** associée au module **SIM800L**, démontre qu'il est possible de mettre en place une solution de surveillance efficace et économique pour le suivi des **District Metered Areas (DMA)**. Grâce à l'acquisition continue des paramètres hydrauliques tels que la pression et le débit, le système permet non seulement une observation fine du comportement du réseau, mais aussi une **détection rapide des anomalies**, suivie d'une transmission fiable des données vers un serveur distant. Cette approche répond à la problématique cruciale des pertes en eau et du suivi en temps réel, souvent coûteux avec les solutions industrielles traditionnelles (Farley & Trow, 2003; Kingdom et al., 2006).

Les perspectives d'amélioration ouvrent des pistes prometteuses.

1. **Optimisation énergétique** : L'autonomie du système reste un enjeu majeur, en particulier pour un déploiement à grande échelle dans des zones à infrastructure limitée. L'intégration de techniques de gestion intelligente de l'énergie et de sources renouvelables (p. ex. Panneaux solaires) peut renforcer la durabilité du dispositif (Mutchek & Williams, 2014).
2. **Intégration de capteurs supplémentaires** : L'ajout de capteurs de qualité d'eau (pH, turbidité, conductivité) permettrait d'élargir le champ d'applications vers une approche plus holistique de la gestion des ressources hydriques (Zhang et al., 2015).
3. **Déploiement pilote en conditions réelles** : La validation en laboratoire constitue une étape clé, mais seule une expérimentation sur le terrain permettra d'évaluer la robustesse du système face aux contraintes environnementales, à la variabilité du réseau et aux interruptions de communication (Puust et al., 2010).
4. **Détection prédictive grâce à l'intelligence artificielle** : L'intégration future d'algorithmes d'IA ou de machine learning favoriserait une détection proactive des fuites et anomalies, anticipant ainsi les défaillances avant qu'elles ne surviennent (Akyildiz et al., 2010; Zanella et al., 2014).

En définitive, ce travail illustre comment l'alliance entre **technologies open-source** et **réseaux GSM** peut contribuer à une gestion plus proactive, résiliente et durable des réseaux d'eau potable. En s'inscrivant dans une logique d'**innovation frugale**, le prototype constitue une alternative modulable et accessible pour les gestionnaires de réseaux, en particulier dans les pays en développement, où les ressources financières et techniques sont souvent limitées (Mtega et al., 2016).

REFERENCES

- [1]. Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2010). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38(4), 393–422. [https://doi.org/10.1016/S13891286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S13891286(01)00302-4)
- [2]. Bakker, M., van Schagen, K., & Vreeburg, J. (2013). A fully adaptive water distribution model. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(5), 543–552. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000288](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000288)
- [3]. Banzi, M., & Shiloh, M. (2014). *Getting Started with Arduino*. Maker Media, Inc.
- [4]. Farley, M., & Trow, S. (2003). *Losses in water distribution networks: A practitioner's guide to assessment, monitoring and control*. IWA Publishing.
- [5]. Kingdom, B., Liemberger, R., & Marin, P. (2006). *The challenge of reducing non-revenue water (NRW) in developing countries*. World Bank.
- [6]. Lambert, A., & Hirner, W. (2000). *Losses from water supply systems: Standard terminology and recommended performance measures*. IWA.

-
- [7]. Marwedel, P. (2011). *Embedded system design: Embedded systems foundations of cyberphysical systems*. Springer.
- [8]. Mtega, W., Msungu, A. C., & Malekani, A. W. (2016). Mobile technologies and their applications in agriculture: Experiences from Mtwara region, Tanzania. *International Journal of ICT Research and Development in Africa*, 6(2).
- [9]. Mutchek, M., & Williams, E. (2014). Moving towards sustainable and resilient smart water grids. *Challenges*, 5(1), 123–137. <https://doi.org/10.3390/challe5010123>
- [10]. Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D. A., & Koppel, T. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, 7(1), 25–45. <https://doi.org/10.1080/15730621003610878>
- [11]. Wu, Z. Y., Wang, R., Walski, T., Yang, S. L., Bowdler, D., & Mankowski, R. (2010). Optimized scheduling of water distribution system operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(5), 647–656. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000078](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000078)
- [12]. Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 22–32. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>
- [13]. Zhang, Z., Wang, H., & Gao, P. (2015). Design and calibration of a low-cost water flow sensor. *Journal of Sensors*, 2015, Article ID 245963. <https://doi.org/10.1155/2015/245963>.