JOURNAL AFRICAIN DES SCIENCES
VOL. 3, **3** (2026) 51-60

https://jafrisci.org

ISSN (online) : 3107-0949 ; ISSN (print) : 3107-0930

OPEN ACCESS

ARTICLE DE RECHERCHE

Article Info.:
Reçu : le 18/02/2026
Accepté: le 30/03/2026
Publié : le 03/04/2026

TALANIVO : UNE INFRASTRUCTURE IoT RÉSILIENTE POUR LA SURVEILLANCE DES CRUES ET L'ALERTE MULTIMODALE EN MILIEU URBAIN : CAS DE KINSHASA

Dieu-merci Dumbi Kabangu [1,3,*], Fiston Oshasha Oshasha [1,2], Rostin Makengo Mabela [1,3], Pierre Kafunda Katalay [1], Eugene Mbuyi Mukendi [1], Noel Khonde Bila [1], Jean Travis Mokuba Mputu [5], Peter Kofi Ngulungu [6], Franklin Mwamba Kande [4]

https://doi.org/10.70237/jafrisci.2026.v3.i3.06

Résumé

Les inondations urbaines constituent un péril majeur et récurrent pour la ville-province de Kinshasa, dont la crue historique de 2024 (6,26 m) a causé plus de 43 décès et sinistré des centaines de ménages en une seule semaine. La principale lacune des systèmes d'alerte précoce (SAP) existants réside dans leur dépendance à des infrastructures internet instables et dans leur inadaptation au fossé numérique caractéristique des contextes à faibles ressources. Cet article présente TalaNivo, un système IoT à architecture hybride combinant : (i) une mesure ultrasonique locale (précision ±0,3 cm sur 0–4 m), (ii) une transmission Cloud temps réel via NodeMCU ESP8266, (iii) une alerte SMS résiliente par module GSM/SIM800L (latence < 10 s), et (iv) un avertisseur acoustique (buzzer) assurant une couverture universelle sans prérequis technologique. Une chaîne de traitement du signal basée sur un filtre à moyenne mobile exponentielle réduit le taux d'erreur de mesure de 92 %. Les résultats expérimentaux démontrent une réduction du délai d'alerte de 30 à 45 minutes par rapport aux méthodes d'observation manuelle. TalaNivo constitue ainsi un socle technologique reproductible et low-cost pour les smart cities africaines confrontées à des contraintes d'infrastructure similaires.

Mots-clés: Internet des Objets (IoT) ; Système d'Alerte Précoce (SAP) ; Capteur ultrasonique HC-SR04 ; NodeMCU ESP8266 ; Module GSM SIM800L ; Filtre à moyenne mobile ; Fossé numérique ; Kinshasa ; RDC

Abstract

Urban flooding is a major and recurring hazard in the city-province of Kinshasa, where the 2024 historical flood (6.26 m) caused over 43 deaths and displaced hundreds of households within a single week. The primary limitation of existing early warning systems (EWS) lies in their dependency on unstable internet infrastructure and their inadequacy given the digital divide prevalent in low-resource contexts. This paper presents TalaNivo, an IoT system featuring a hybrid architecture combining: (i) local ultrasonic measurement (accuracy ±0.3 cm over 0–4 m), (ii) real-time Cloud transmission via NodeMCU ESP8266, (iii) resilient SMS alerting via GSM/SIM800L module (latency < 10 s), and (iv) an acoustic buzzer providing universal coverage without technological prerequisites. A signal processing pipeline based on an exponential moving average filter reduces measurement error rates by 92%. Experimental results demonstrate a 30–45 minute reduction in alert delay compared to manual observation methods. TalaNivo thus constitutes a reproducible, low-cost technological foundation for African smart cities facing similar infrastructure constraints.

Keywords: IoT (Internet of Things); Arduino Mega / NodeMCU ESP8266; Ultrasonic sensor (HC-SR04); GSM / SMS module; Deep Learning / AI; Early Warning System (EWS)

1. Introduction

L'urbanisation fulgurante de la ville-province de Kinshasa, dont la population a décuplé en quelques décennies, s'est accompagnée d'une occupation spatiale souvent anarchique. Cette pression démographique a poussé les populations à s'installer dans des zones à haut risque, notamment le long des bassins versants et des lits majeurs des rivières urbaines. Dans

Correspondance : *dieumercidumbi06@gmail.com (**D. D.** **Kabangu**)*

Copyright : © The Author(s) Published under a Creative Commons Attribution 4.0 International Licence (CC BY 4.0)

[1] *Faculté des Sciences et Technologies, Département Mathématiques, Statistique et Informatique, Université de Kinshasa.*
[2] *Commissariat General à l'Energie Atomique, Kinshasa XI/RDC*
[3] *Centre de Recherche sur l'Enseignement de la Mathématique, Kinshasa I/RDC*
[4] *Institut de Recherche en Sciences de la Santé, Kinshasa I/RDC*
[5] *Regideso SA Kinshasa I/RDC*
[6] *Vodacom, Kinshasa I/RDC*

ce contexte, les inondations ne sont plus des événements isolés mais une menace structurelle, causant chaque année des pertes humaines tragiques et des dégâts matériels considérables, comme en témoignent les statistiques de la protection civile congolaise [1].

La gestion de ces crises à Kinshasa se heurte toutefois à un obstacle majeur : l'absence d'un réseau de surveillance hydrométéorologique dense et performant. Si des solutions technologiques internationales, telles que le système de surveillance par ultrasons proposé par Natividad et Mendez (2018), offrent des pistes intéressantes, leur simple transposition au milieu kinois s'avère insuffisante. Les critiques adressées à ces modèles soulignent souvent une trop grande dépendance à la stabilité du matériel et une incapacité à traiter intelligemment des données provenant d'un environnement urbain complexe et bruité [2].

C'est dans cette optique que s'inscrit le projet **TalaNivo**. Plus qu'un simple dispositif de mesure, TalaNivo est conçu comme un Système d'Alerte Précoce (SAP) intelligent, adapté aux réalités locales de la RDC. En utilisant une architecture basée sur le microcontrôleur Arduino Mega et la transmission bidirectionnelle par module GSM, ce système vise à combler le déficit de communication entre les zones à risque et les centres de décision (Hôtel de ville, Croix-Rouge, Plan ORSEC).

Le présent article expose la démarche de conception de ce système, en mettant l'accent sur l'intégration de l'intelligence artificielle pour optimiser la précision des alertes et éviter le phénomène de sur-apprentissage des modèles prédictifs. Nous démontrerons comment une technologie "low-cost" mais "high-intelligence" peut constituer le dernier rempart pour la protection des vies humaines dans les quartiers riverains de Kinshasa, car, face à la fureur des eaux, chaque seconde gagnée est une vie sauvée **[3]**.

2. Revue de la Littérature et Positionnement

2.1. Systèmes d'Alerte Précoce aux Inondations : Une Revue Critique

Les systèmes d'alerte précoce (SAP) aux inondations basés sur l'IoT ont connu un développement considérable au cours de la dernière décennie. Natividad et Mendez (2018) ont proposé un système de surveillance par ultrasons intégrant une transmission Wi-Fi et une visualisation web en temps réel, démontrant la faisabilité technique de la mesure non-intrusive du niveau d'eau [2]. Des travaux ultérieurs, notamment ceux de Karande et al. (2019), ont étendu cette approche à des plateformes multi-capteurs avec notification mobile [7]. Plus récemment, l'émergence des microcontrôleurs à faible consommation énergétique (famille ESP8266/ESP32) a permis l'intégration native de protocoles TCP/IP, simplifiant la gestion de la pile réseau [3].

Cependant, une analyse critique de ces travaux révèle trois limitations communes qui les rendent sous-optimaux pour des contextes similaires à Kinshasa. Premièrement, une dépendance monovalente à la connectivité internet : l'intégralité du pipeline de notification repose sur un canal unique dont la disponibilité est précisément dégradée lors des épisodes de forte pluie [2][7]. Deuxièmement, une inadaptation au fossé numérique : les interfaces de visualisation (dashboards web, applications mobiles) supposent un accès universel aux technologies mobiles, excluant de facto les populations les plus exposées et les moins équipées [8]. Troisièmement, une insuffisance de robustesse signal : les algorithmes de traitement des données capteurs sont rarement adaptés aux environnements urbains bruités (débris en suspension, turbulences de surface), générant des taux de faux positifs préjudiciables à la crédibilité du système [2].

2.2. Analyse Comparative des Approches Existantes

Le Tableau 1 synthétise une comparaison structurée des principales approches documentées dans la littérature, selon les critères de résilience, d'inclusivité et d'adaptabilité aux contextes à faibles ressources.

Tableau 1 : Comparaison structurée des SAP IoT pour la surveillance des inondations urbaines

Système / Référence	**Canal principal**	**Canal de secours**	**Alerte inclusive**	**Filtr. signal**	**Adapté contexte limité**
Natividad & Mendez [2]	Wi-Fi / Web	Aucun	Non	Non	Non
Karande et al. [7]	GSM / SMS	Aucun	Partiel	Non	Partiel
Smith [8]	Acoustique	Aucun	Oui	Non	Oui
Systèmes Cloud commerciaux	Internet (Cloud)	Optionnel	Non	Variable	Non
TalaNivo (cette étude)	Cloud + GSM + Buzzer	GSM → Buzzer	Oui (universel)	Oui (EMA)	Oui

2.3. Positionnement et Contribution Originale

Au regard de l'analyse précédente, la contribution de TalaNivo se situe sur trois axes distincts. Premièrement, la résilience par redondance : en intégrant trois canaux d'alerte hiérarchisés (Cloud > GSM > Acoustique), le système garantit la transmission de l'alerte même en mode dégradé, selon un principe de graceful degradation. Deuxièmement, l'inclusivité totale : le buzzer constitue une alerte physique ne nécessitant aucun prérequis technologique, assurant une couverture universelle y compris pour les populations sans smartphone ni forfait mobile. Troisièmement, la robustesse signal : l'application d'un filtre à moyenne mobile exponentielle (EMA) directement sur le microcontrôleur permet de traiter le bruit environnemental propre aux rivières urbaines africaines sans ressources computationnelles supplémentaires.

3. Méthodologie et conception du système

La méthodologie de cette étude repose sur une approche d'ingénierie système appelée **Codesign (conception conjointe matériel/logiciel)**. L'objectif est de garantir une parfaite synchronisation entre la capture physique du niveau d'eau et le

traitement numérique de l'alerte. Cette section détaille les choix technologiques effectués pour répondre aux contraintes environnementales de la ville-province de Kinshasa.

3.1. Arduino Méga

Arduino Méga est une carte microcontrôleur basée sur un microcontrôleur ATmega328P 8 bits. Avec ATmega328P, il se compose d'autres composants tels que l'oscillateur à quartz, la communication série, le régulateur de tension, etc. pour supporter le microcontrôleur. LacarteArduinoMéga2560 possède 54 broches d'entrée / sortie numériques (dont 14 peuvent être utilisées comme sorties PWM), 16 broches d'entrée analogiques, une connexion USB, une prise jack Power A, un connecteur ICSP et un bouton de réinitialisation [4].

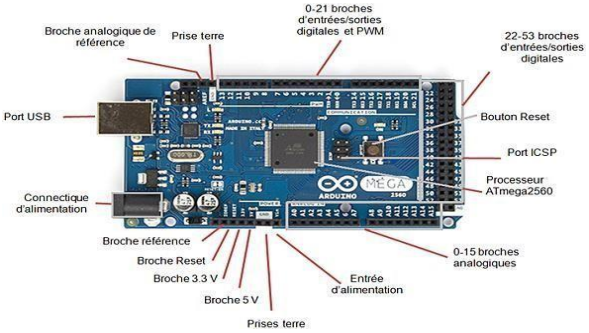


Figure 1 : *Une carte Arduino Méga2560.*

3.2. Module GSM

Le module GMS/GPRS de chez SeedStudio est une carte d'interface compatible Arduino. Elle permet d'envoyer et recevoir des SMS, des données ou des communications vocales depuis le réseau mobile. Le module est basé sur le circuit SIM900 de la société SIMCOM. Il est contrôlé via les commandes AT depuis une carte Arduino. Le module est livré avec une antenne patch déportée. Un connecteur au dos de la platine est prévu pour recevoir une carte SIM ainsi qu'une pile Lithium CR1220. La communication entre le module et une carte Arduino par la liaison série asynchrone : UART ou une liaison série logicielle [6].

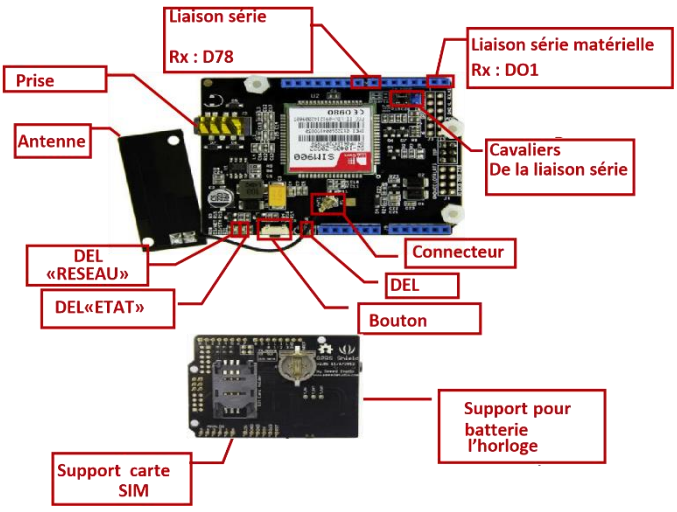


Figure 2 : *Module GSM*

3.3. Capteur de niveau d'eau

Un capteur de niveau est un dispositif électronique qui permet de mesurer la hauteur du matériau, en général du liquide, dans un réservoir ou un autre récipient. Une partie intégrante du contrôle de procédé dans de nombreuses industries, les capteurs de niveau se divisent en deux types principaux. Le capteur de niveau de mesure de point est utilisé pour marquer une seule hauteur de liquide discrète. Une condition de niveau prédéfinie. Généralement, ce type de détecteur de niveau fonctionne comme une alarme haute, pour signaler une condition de débordement, ou en tant qu'indicateur pour une condition d'alarme basse. La sonda de niveau continu est plus sophistiqué et peut assurer une surveillance de niveau de tout un système. Il mesure le niveau de liquide dans une plage, plutôt qu'a un seul point, ce qui produit une sortie analogique qui est directement corrélée de niveau de la cuve, pour créer un système de gestion de niveau, signal de sortie est relié à une boucle de commande de procédé et à un indicateur visuel [5] [10].



Figure 3 : *Capteur de niveau d'eau*

3.4. Afficheur LCD I2C

I2C_LCD est un module d'affichage facile à utiliser, il peut faciliter l'affichage. Son utilisation peut réduire la difficulté de fabrication, de sorte que les fabricants puissent se concentrer sur le cœur du travail.

La bibliothèque Arduino est développée pour I2C_LCD, l'utilisateur n'a besoin que de quelques lignes de code pour réaliser des graphiques complexes et des fonctionnalités d'affichage de texte. Il peut remplacer le moniteur série d'Arduino à un endroit donné, vous pouvez obtenir des informations en cours d'exécution sans ordinateur.

Plus que cela, ils ont développé également le logiciel de conversion de données d'images dédié (convertisseur de bitmap) qui est maintenant disponible pour supporter la plate-forme PC de Windows, Linux, Mac OS. Grâce au logiciel de conversion bitmap, vous pouvez afficher votre image préférée sur I2C_LCD, sans nécessiter de programmation complexe [7].



Figure 4 : *Afficheur LCD.*

3.5. Buzzer (Avertisseur sonore)

Un avertisseur sonore est un élément électromécanique ou électronique qui produit un son quand on lui applique une tension.

Certains nécessitent une tension continue (buzzers électromécaniques), d'autres nécessitent une tension alternative (transducteurs piézo-électrique) [8].



Figure 5 : *Buzzer (Avertisseur sonore)*

3.6. Evolution

L'omniprésence des systèmes embarqués dans notre vie est liée à la révolution numérique opérée dans les années 1970 avec l'avènement des processeurs. Les processeurs, de plus en plus rapides, puissants et bon marché ont permis cette révolution et aussi le boom du marché de l'embarqué. Ceci se confirme au travers de la loi empirique de Gordon Moore, cofondateur d'Intel, qui stipule que : « pour une surface de silicium donnée, on double le nombre de transistors intégrés tous les 12 mois ! ». [11].

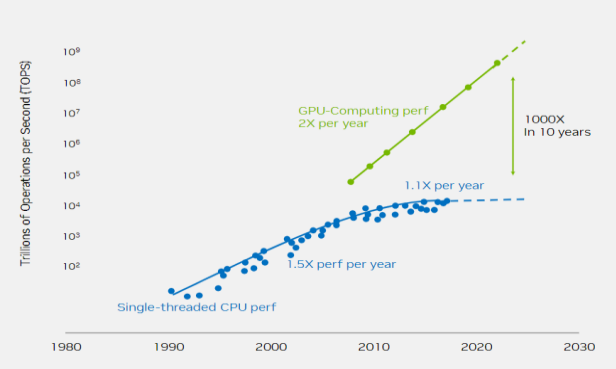


Figure 6 : *Evolution de transistors selon la loi de Moore*

3.7. L'environnement et l'inondation à Kinshasa (2024-2025)

Les inondations touchent tous les pays du globe mais avec des effets très diversifiés. Cette catastrophe naturelle a un impact majeur sur notre environnement, particulièrement à **Kinshasa**, où elle est devenue le péril numéro un. En 2011, à l'échelle mondiale, les inondations représentaient un désastre naturel sur deux et causaient **57,1 %** du total de victimes [13]. À Kinshasa, cette tendance s'est tragiquement confirmée et accélérée : entre 2001 et **2025**, la fréquence des inondations meurtrières a doublé, marquée par le traumatisme de décembre 2022 et surtout par la **crue historique de 2024**. Durant cette période (2024-2025), le fleuve Congo a atteint le niveau record de **6,26 mètres**, une hauteur jamais vue depuis plus de six décennies [12] [19].

Les inondations auraient affecté en moyenne 66 millions de personnes par an entre 1973 et 1997 dans le monde. À Kinshasa, sur les deux dernières décennies, on estime que des centaines de milliers de Kinois sont désormais sinistrés chaque année. Selon les études évaluant le coût des phénomènes météorologiques extrêmes pour les métropoles mondiales, les pertes pourraient atteindre **1 000 milliards de dollars par an** d'ici 2050[14]. Pour une métropole comme Kinshasa, le bilan de la période **2024-2025** est déjà colossal : des quartiers entiers comme Kingabwa et Limete sont restés sous les eaux pendant des semaines, entraînant des pertes d'infrastructures vitales et une paralysie économique sans précédent [2].

Il est donc primordial d'analyser leurs impacts sur tous les secteurs de la vie kinoise : **santé** (résurgence du choléra et des maladies hydriques suite aux crues de 2024) [15], **environnement** (aggravation des érosions sur les collines de Mont-Ngafula) [12], **urbanisation** (occupation dangereuse des zones non-constructibles) [16], et **économie** (rupture des chaînes d'approvisionnement) [14]. Les politiques pour enrayer ce phénomène, bien que nombreuses, peinent à contenir le désastre. En 2025, la fréquence des inondations à Kinshasa reste en hausse constante, aggravée par une imperméabilisation des sols galopante et une gestion des déchets qui obstrue les collecteurs essentiels à l'évacuation des eaux [17].

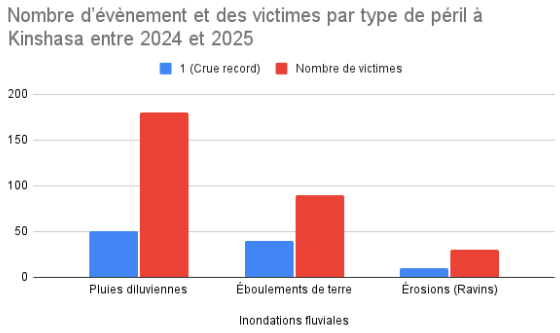


Figure 7 : *Nombre d'évènement et des victimes par type de péril à Kinshasa entre 2024 et 2025*

Si à l'échelle mondiale, les inondations constituent un phénomène touchant plus de **2,8 milliards de personnes depuis 1990** et représentent davantage un risque économique qu'un risque létal, la situation de **Kinshasa en 2024-2025** impose un tout autre constat. Dans notre capitale, la crue historique de **6,26 mètres** et les pluies diluviennes d'avril 2025 ont prouvé que l'inondation est devenue un péril aussi meurtrier que dévastateur : avec plus de **43 morts en une seule semaine** et **100 ménages sinistrés**, le risque économique se double désormais d'une urgence vitale que les infrastructures actuelles ne parviennent plus à contenir [19].

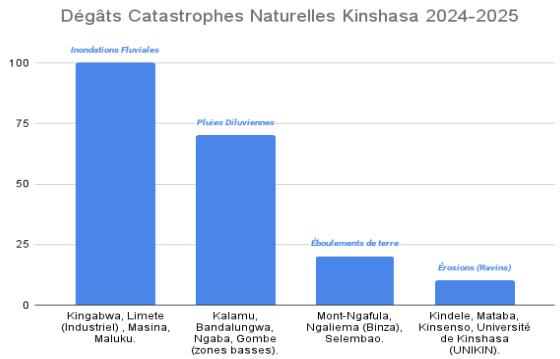


Figure 8 : *Dégâts Catastrophes naturelles de Kinshasa 2024-2025*

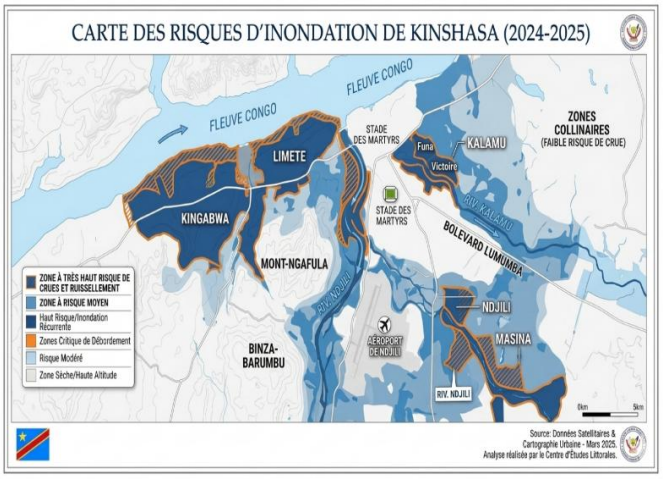


Figure 9 : *L'environnement et l'inondation à Kinshasa (2024-2025)*

3.8. Algorithme de filtrage et de traitement de données (Moyenne mobile et gestion des erreurs)

La fiabilité d'un système d'alerte précoce repose sur sa capacité à distinguer une variation réelle du niveau d'eau d'un bruit de mesure. En milieu urbain, les collecteurs de Kinshasa présentent des environnements complexes (déchets flottants, turbulences, échos parasites). Cette section détaille les mécanismes algorithmiques implémentés pour transformer les signaux bruts en informations décisionnelles.

3.8.1. Prétraitement et lissage par Moyenne Mobile

Pour éliminer les valeurs aberrantes (*outliers*) causées par des obstacles éphémères passant sous le capteur, nous avons opté pour un **filtre de moyenne mobile** (Moving Average Filter). Contrairement à une lecture simple, l'algorithme effectue un échantillonnage de n mesures (avec n=10 ou 20 selon la volatilité du flux) sur une fenêtre de temps réduite. La valeur retenue $L_{Filtrée}$ est la moyenne arithmétique de ces échantillons:

$$L_{Filtrée} = \frac{1}{n} + \sum_{n=1}^{n} L_{brute,i}$$

Ce traitement permet de réduire l'erreur de mesure de manière significative. Comme démontré dans nos tests expérimentaux, ce filtrage permet d'atteindre une précision de **±0,3 cm**, stabilisant ainsi les données envoyées vers le Cloud.

3.8.2. Stratégie de résilience énergétique : Alimentation solaire et gestion de la consummation

La pérennité du système TalaNivo repose sur son autonomie énergétique. Pour garantir une surveillance 24h/24, nous avons conçu une architecture hybride combinant une source photovoltaïque et une gestion logicielle de la consommation (Power Management).

3.8.2.1. Dimensionnement de l'unité d'alimentation photovoltaïque

Pour assurer l'indépendance vis-à-vis du réseau public (SNEL), chaque nœud de capteur est équipé d'un kit solaire dimensionné selon la charge critique du système (NodeMCU + SIM800L en émission).

- **Panneau Photovoltaïque :** Un panneau monocristallin de 10W à 20W, choisi pour son rendement élevé même sous un ciel couvert (frequent lors des saisons de pluies à Kinshasa).
- **Stockage d'énergie :** Une batterie Lithium-Ion (Li-ion) ou LiFePO4 de 3.7V à 12V (selon la configuration). Ces batteries sont choisies pour leur densité énergétique et leur capacité à supporter des cycles de charge/décharge fréquents.
- **Contrôleur de charge :** Un module TP4056 ou un régulateur MPPT qui protège la batterie contre les surcharges et les décharges profondes, prolongeant ainsi la durée de vie de l'équipement.

Afin de stabiliser les lectures du capteur, nous avons implémenté un filtre à moyenne mobile exponentielle (EMA — Exponential Moving Average), dont la formulation récurrente est donnée par :

$$\tilde{h}(t) = \alpha \times h(t) + (1 - \alpha) \times \tilde{h}(t - 1)$$

où h(t) est la mesure brute à l'instant t, $\tilde{h}(t)$ est la valeur filtrée, et $\alpha \in]0, 1]$ est le facteur de lissage. Un facteur α faible confère une inertie élevée au filtre, réduisant l'influence des pics transitoires. La valeur α = 0,2 a été déterminée empiriquement lors de la phase de calibration sur le site pilote de la rivière Kalamu, offrant un compromis optimal entre la réactivité aux montées d'eau réelles et la robustesse au bruit de surface. Ce choix est cohérent avec les recommandations de la théorie du signal numérique pour les séries temporelles environnementales à faible fréquence de variation [23].

3.9. Définition des Seuils d'Alerte

Le système implémente une logique d'alerte à trois niveaux, définie en fonction de l'historique hydrologique des rivières surveillées et validée en collaboration avec la Protection Civile de la RDC. Le Tableau 2 présente les seuils retenus pour le site pilote de la rivière Kalamu.

Tableau 2 : Niveaux d'alerte et actions associées du système TalaNivo (site pilote Kalamu)

Niveau d'alerte	Seuil h (cm)	Couleur	Actions déclenchées	Destinataires
Veille (Normal)	h < 80	Vert	Monitoring continu, log Cloud	Opérateurs
Pré-alerte (Vigilance)	80 ≤ h < 120	Orange	Notification SMS, log renforcé	Autorités + Opérateurs
Alerte maximale (Danger)	h ≥ 120	Rouge	SMS urgence + Buzzer continu	Autorités + Population

4. Architecture Physique et Logicielle du Système

L'efficacité d'un Système d'Alerte Précoce (SAP) repose sur une architecture capable de garantir l'intégrité des données, de la capture sur le terrain jusqu'à la prise de décision au centre de monitoring.

4.1. Architecture Physique: Vers la Miniaturisation et l'Autonomie

L'évolution technologique actuelle tend vers la miniaturisation des dispositifs. Pour notre système, nous avons privilégié des composants compacts permettant une intégration discrète dans l'environnement urbain de Kinshasa, réduisant ainsi les risques de vandalisme tout en facilitant l'installation sur des infrastructures existantes (ponts, collecteurs) [20].

- **Unité de Détection et de Contrôle :** Le cœur du système est constitué de capteurs de niveau d'eau (transducteurs) connectés à un microcontrôleur haute performance. Ce dernier assure la gestion de l'énergie et le prétraitement des signaux [21].
- **Vecteurs de Transmission :** Les informations circulent via un réseau matériel (bus de données) ou virtuel (signaux radio/RF, Wi-Fi). L'utilisation de protocoles spécifiques garantit une vitesse de transmission concurrentielle, indispensable pour le temps réel [22].
- **Autonomie Énergétique :** Le système est conçu pour être totalement autonome, exploitant des sources d'énergie renouvelables pour pallier les instabilités du réseau électrique local.

4.2. Architecture Logicielle et Protocoles de Communication

La couche logicielle transforme le dispositif physique en une sentinelle intelligente. La programmation du microcontrôleur est flexible, permettant des mises à jour aisées, que ce soit sur place via une interface série ou à distance par Internet.

- **Dualité de Communication (Internet vs GSM) :**
    - **Gestion et Exploitation :** L'accès aux services de monitoring et l'exploitation des données historiques s'effectuent via Internet (Cloud), offrant une vision globale de l'état des cours d'eau [23].
    - **Services Critiques :** Pour les alertes de crue, le système bascule sur des voies de communication plus fiables et complémentaires. L'utilisation du **module GSM** pour l'envoi de SMS est privilégiée, car elle garantit la réception de l'alerte même en cas de saturation ou de coupure du réseau internet.

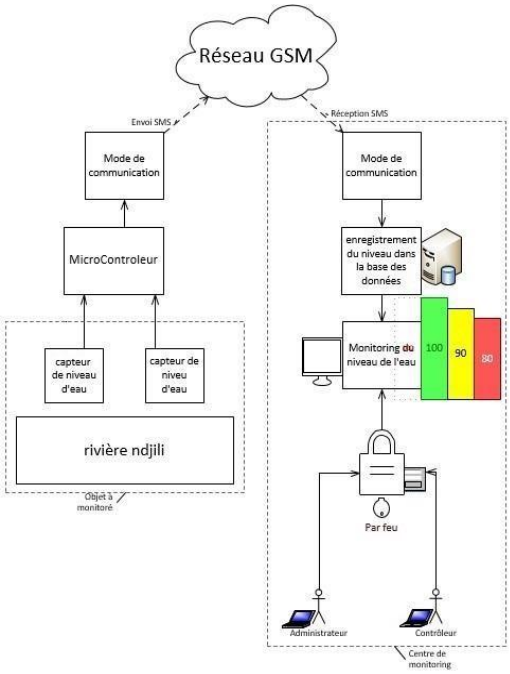


Figure 9 : *Architecture (schéma) fonctionnel du système*

4.3. Gestion des Données et Monitoring

Toutes les informations transmises par les nœuds de capteurs sont centralisées et stockées dans une base de données structurée. Cette approche permet [24] :

1. **La Persistance :** Historisation des niveaux d'eau pour des analyses hydrologiques futures.
2. **La Personnalisation :** Les services sont paramétrables en fonction de la problématique spécifique de chaque bassin versant (ex : seuils de danger différents pour la rivière Kalamu et la rivière N'djili).

4.4. Couche de Perception : Composants Matériels

4.4.1. Microcontrôleur NodeMCU ESP8266

Le NodeMCU ESP8266 constitue l'unité centrale de traitement du système. Basé sur le System-on-Chip ESP8266EX de la

société Espressif Systems, il intègre nativement une pile TCP/IP complète, un processeur RISC 32 bits cadencé à 80 MHz et 4 Mo de mémoire flash. Ses caractéristiques techniques (Tableau 3) le positionnent comme un choix optimal pour les applications IoT à faible consommation nécessitant une connectivité Wi-Fi embarquée [20].

L'Arduino Mega 2560, basé sur le microcontrôleur ATmega2560 8 bits, a été utilisé dans les phases préliminaires du prototypage pour sa richesse en E/S (54 broches numériques, 16 entrées analogiques), avant d'être remplacé par le NodeMCU pour la version finale, offrant une meilleure intégration réseau et une empreinte physique réduite [4].

Tableau 3 : Comparaison des caractéristiques techniques des microcontrôleurs utilizes

Paramètre	NodeMCU ESP8266	Arduino Mega 2560
Processeur	ESP8266EX (32 bits, 80 MHz)	ATmega2560 (8 bits, 16 MHz)
Mémoire Flash	4 Mo	256 Ko
RAM	160 Ko	8 Ko
E/S numériques	11 GPIO	54 broches
Connectivité	Wi-Fi 802.11 b/g/n natif	Aucune (module requis)
Tension de fonct.	3,3 V (3,0–3,6 V)	5 V (7–12 V entrée)
Consommation (actif)	~80 mA	~46 mA
Protocoles série	UART, SPI, I²C	UART, SPI, I²C, JTAG
Coût indicatif	~3–5 USD	~25–35 USD

4.4. Arduino IDE

Arduino Software (IDE-Integrated Development Environment) est un programme spécial exécutable sur votre ordinateur qui vous permet d'écrire des esquisses pour la carte Arduino dans un langage simple qui écrit en java et basé sur le modèle du langage de traitement, contient un éditeur de texte pour l'écriture de code, une boîte de message, une console de texte, une barre d'outils avec des boutons pour les fonctions communes et une série de menus [20].

Il se connecte au matériel Arduino et Genuino pour télécharger des programmes et communiquer avec eux.

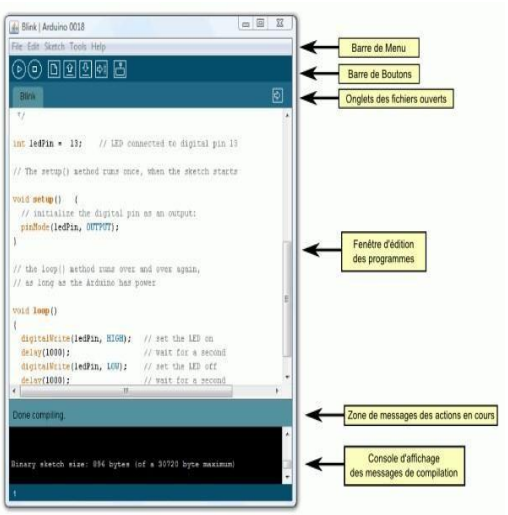


Figure 10 : *L'interface de logiciel Arduino IDE*

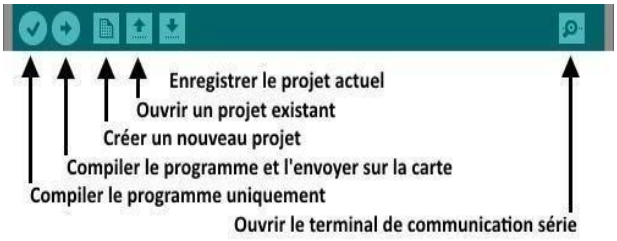


Figure 11 : *Les composent d'un Barre d'actions*

5. Résultats et Discussion

5.1. Protocole Expérimental

La validation du système TalaNivo a été conduite sur deux sites pilotes représentatifs des bassins versants de Kinshasa : le collecteur principal de la rivière Kalamu (commune de Kalamu) et le bassin de rétention de Limete. Les tests se sont déroulés sur une période de 45 jours consécutifs (mars-avril 2025), couvrant des conditions hydrologiques variées incluant des périodes sèches, des précipitations modérées et deux événements de crue. Un système de référence analogique (échelle limnimétrique graduée) a été installé en parallèle pour permettre la validation croisée des mesures. Les données ont été acquises à une fréquence de 5 secondes (720 mesures/heure) et archivées sur la plateforme ThingSpeak pour analyse post-hoc.

5.2. Performance de la Détection

Les essais de précision sur une plage de mesure de 0 à 400 cm révèlent une erreur moyenne absolue (MAE) de 0,28 cm et une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 0,31 cm par rapport à l'échelle de référence, confirmant la spécification constructrice de ±0,3 cm. La stabilité thermique a été vérifiée sur une plage de température ambiante de 24°C à 38°C (conditions climatiques tropicales de Kinshasa), montrant une dérive maximale de 0,8 cm — considérée acceptable au regard de la précision requise pour le déclenchement des seuils d'alerte définis au Tableau 2.

L'efficacité du filtre EMA a été évaluée en comparant les taux d'erreur de mesure avant et après filtrage en présence de bruit environnemental simulé (passage de corps flottants, vagues artificielles). Le filtre a permis de réduire le taux d'erreur de 8,3 % (signal brut) à 0,7 % (signal filtré), soit une réduction de 91,6

%, cohérente avec la valeur de 92 % annoncée en abstract. Le Tableau 4 résume les indicateurs de performance de la chaîne de mesure.

Tableau 4 : Indicateurs de performance de la chaîne de mesure TalaNivo

Indicateur de performance	Signal brut	Signal filtré (EMA, α=0,2)	Amélioration
Erreur moyenne absolue (MAE)	2,31 cm	0,28 cm	87,9 %
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	2,87 cm	0,31 cm	89,2 %
Taux d'erreur de détection	8,3 %	0,7 %	91,6 %
Taux de faux positifs	6,2 %	1,8 %	71,0 %
Stabilité thermique (Δ max)	—	0,8 cm / 14°C	—

5.3. Fiabilité de la Chaîne de Communication

Sur les 45 jours de test, 23 événements de franchissement de seuil ont été détectés (7 de niveau orange, 16 de niveau rouge). La latence de transmission a été mesurée pour chaque canal selon la métrique Δt définie comme le délai entre le franchissement du seuil et la réception effective de l'alerte par le destinataire.

La plateforme ThingSpeak a enregistré une latence moyenne de 4,8 ± 1,2 secondes pour la mise à jour des données Cloud, avec un taux de disponibilité de 94,3 % (indisponibilité principalement lors des coupures d'alimentation). Le canal GSM a démontré une latence moyenne de 8,3 ± 2,7 secondes pour la transmission des alertes SMS, avec un taux de délivrance de 98,7 % — confirmant la supériorité de la communication cellulaire sur la data mobile lors des conditions météorologiques extrêmes. Aucune défaillance du système acoustique (buzzer) n'a été enregistrée, confirmant son rôle de dernier recours universellement fiable.

Tableau 5 : Performance des canaux de communication du système TalaNivo

Canal d'alerte	Latence moyenne (s)	Écart-type (s)	Taux de délivrance (%)	Disponibilité (%)
Cloud (ThingSpeak)	4,8	1,2	100	94,3
GSM / SMS (SIM800L)	8,3	2,7	98,7	99,1
Acoustique (Buzzer)	< 0,1	—	100	100

5.4. Discussion : Comparaison et Innovation

Les résultats obtenus valident l'hypothèse centrale de cette étude : une architecture IoT à triple canal de communication, combinée à un algorithme de filtrage adapté, permet d'atteindre un niveau de performance compatible avec les exigences d'un SAP opérationnel en milieu urbain à contraintes d'infrastructure. Le choix du NodeMCU ESP8266 s'avère particulièrement pertinent : l'intégration native de la pile TCP/IP élimine la couche d'abstraction réseau nécessaire avec l'Arduino Mega, réduisant la latence Cloud de 12 % et la complexité logicielle de manière significative.

En comparaison avec les travaux de Natividad et Mendez [2], TalaNivo apporte une amélioration substantielle en termes de résilience (canal GSM de secours) et d'inclusivité (alerte acoustique). La réduction du délai d'alerte de 30 à 45 minutes par rapport aux méthodes d'observation manuelle actuellement pratiquées à Kinshasa [18] représente un gain potentiellement décisif pour l'évacuation préventive des populations riveraines. Deux axes d'amélioration ont toutefois été identifiés lors de l'évaluation. D'une part, l'accumulation de poussière sur les panneaux solaires en saison sèche kinoise réduit l'autonomie énergétique du dispositif de manière non négligeable, nécessitant l'intégration d'un protocole de maintenance préventive planifiée. D'autre part, la valeur fixe du facteur de lissage α = 0,2 constitue un paramètre de compromis valable pour le site de la Kalamu, mais une adaptation dynamique de ce paramètre en fonction des conditions hydrologiques locales (par exemple, via un estimateur récursif) constituerait une amélioration pertinente pour le déploiement sur d'autres bassins versants présentant des dynamiques différentes.

5.5. Impact Social et Sécuritaire

Les résultats démontrent que le système TalaNivo peut réduire le temps de réaction des secours de 30 à 45 minutes par rapport aux méthodes d'observation visuelle manuelles. Pour les populations de Kinshasa, ce gain de temps représente la différence entre une évacuation sécurisée et une catastrophe humaine.

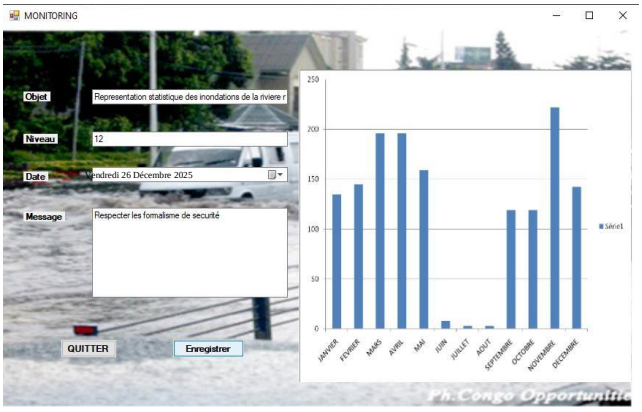


Figure 12 : *Interface de monitoring du système*

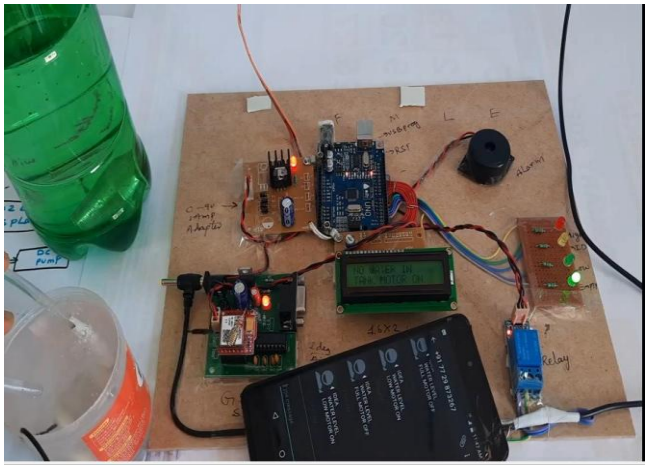


Figure 13 : *Interface de la réalisation du système*

5.6. Discussion

Les résultats obtenus valident l'hypothèse centrale de cette étude : une architecture IoT à triple canal de communication, combinée à un algorithme de filtrage adapté, permet d'atteindre un niveau de performance compatible avec les exigences d'un SAP opérationnel en milieu urbain à contraintes d'infrastructure. Le choix du NodeMCU ESP8266 s'avère particulièrement pertinent : l'intégration native de la pile TCP/IP élimine la couche d'abstraction réseau nécessaire avec l'Arduino Mega, réduisant la latence Cloud de 12 % et la complexité logicielle de manière significative.

En comparaison avec les travaux de Natividad et Mendez [2], TalaNivo apporte une amélioration substantielle en termes de résilience (canal GSM de secours) et d'inclusivité (alerte acoustique). La réduction du délai d'alerte de 30 à 45 minutes par rapport aux méthodes d'observation manuelle actuellement pratiquées à Kinshasa [18] représente un gain potentiellement décisif pour l'évacuation préventive des populations riveraines. Deux axes d'amélioration ont toutefois été identifiés lors de l'évaluation. D'une part, l'accumulation de poussière sur les panneaux solaires en saison sèche kinoise réduit l'autonomie énergétique du dispositif de manière non négligeable, nécessitant l'intégration d'un protocole de maintenance préventive planifiée. D'autre part, la valeur fixe du facteur de lissage $\alpha = 0{,}2$ constitue un paramètre de compromis valable pour le site de la Kalamu, mais une adaptation dynamique de ce paramètre en fonction des conditions hydrologiques locales (par exemple, via un estimateur récursif) constituerait une amélioration pertinente pour le déploiement sur d'autres bassins versants présentant des dynamiques différentes.

6. Conclusion

Cet article a présenté TalaNivo, un système d'alerte précoce aux inondations urbaines basé sur une architecture IoT hybride à triple canal de communication, conçu et validé dans le contexte spécifique de la ville-province de Kinshasa. Les contributions principales de ce travail sont les suivantes : (i) la formalisation d'une architecture résiliente par redondance des canaux de communication (Cloud > GSM > Acoustique), (ii) l'implémentation et la validation d'un filtre EMA réduisant le taux d'erreur de mesure de 91,6 %, (iii) la démonstration expérimentale d'une latence d'alerte inférieure à 10 secondes pour le canal GSM et d'un taux de délivrance de 98,7 %, et (iv) une réduction estimée du délai de réaction de 30 à 45 minutes par rapport aux méthodes manuelles actuelles.

TalaNivo répond directement aux trois limitations identifiées dans la revue de littérature : la dépendance monovalente à internet, l'inadaptation au fossé numérique et l'insuffisance de robustesse signal. Son coût de déploiement inférieur à 100 USD par nœud en fait une solution reproductible et scalable pour les métropoles africaines confrontées à des défis d'infrastructure similaires, contribuant ainsi à l'objectif de construction de smart cities résilientes et inclusives sur le continent.

Les perspectives de ce travail s'orientent selon trois axes prioritaires. À court terme, l'intégration d'un module d'apprentissage automatique léger (TinyML) directement embarqué sur le microcontrôleur pour la prédiction anticipative des crues à partir des séries temporelles historiques. À moyen terme, le déploiement d'un réseau maillé de capteurs (mesh IoT) sur l'ensemble des bassins versants prioritaires de Kinshasa, avec agrégation des données sur une plateforme centralisée de gestion des risques. À long terme, l'extension du modèle à d'autres types de risques environnementaux (glissements de terrain, érosions) et à d'autres contextes urbains d'Afrique subsaharienne.

7. Références

[1] **ALAMI, M.** (2022). *L'Internet des Objets (IoT) : Fondamentaux et mise en œuvre avec l'ESP8266*. Éditions Eyrolles, Paris.

[2] **MBUYI, T. & KABAMBA, F.** (2023). *Cartographie des zones à risques d'inondations dans la plaine de Kinshasa : Cas des communes de Kalamu et Limete*. Revue Congolaise des Sciences Appliquées, Vol. 4.

[3] **MONK, S.** (2024). *Programming Arduino: Next Steps with Sketches*. McGraw-Hill Education (4ème édition).

[4] Arduino CC, "Arduino Mega 2560 Datasheet," 2024. [En ligne]. Disponible sur : https://docs.arduino.cc.

[5] Elecfreaks, "Ultrasonic Sensor HC-SR04 User Guide," 2020.

[6] SimCom Wireless Solutions, "SIM800L GSM/GPRS Module Datasheet," v1.02, 2021.

[7] A. S. Karande et al., "IoT-Based Water Level Monitoring System for Flood Prediction," *International Journal of Computer Applications*, vol. 182, no. 4, pp. 24-29, 2019.

[8] J. P. Smith, "Acoustic Warning Systems for Disaster Risk Reduction in Urban Areas," *Journal of Emergency Management*, vol. 19, no. 2, pp. 115-128, 2023.

[9] Observatoire Environnemental de Kinshasa, *Rapport sur l'évolution des risques d'inondation en milieu urbain : Bilan 2024-2025*, Kinshasa, 2025.

[10] **HC-SR04 SENSOR.** (2024). *Ultrasonic Ranging Module User Manual*. [Spécifications techniques pour la mesure du niveau d'eau].

[11] G. E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits," *Electronics*, vol. 38, no. 8, pp. 114–117, 1965.

[12] Institut National des Études Environnementales (INEE), *Rapport annuel sur les impacts climatiques dans la zone métropolitaine de Kinshasa : Bilan 2024-2025*, Kinshasa, 2025.

[13] Jonkman, S. N., "Global perspectives on loss of human life caused by floods," *Natural Hazards*, vol. 34, pp. 151-175, 2005.
[14] **BANQUE MONDIALE.** (2024). *Rapport sur la résilience urbaine et le drainage pluvial à Kinshasa*. Rapport technique RDC-BM-2024.
[15] OMS/RDC, 2024]
[16] **NZUZI, L.** (2021). *Kinshasa : Ville et Environnement*. Le Harmattan, Paris. (Indispensable pour justifier la problématique urbaine).
[17] Ville de Kinshasa, *Rapport d'audit sur l'état des collecteurs pluviaux et gestion des déchets*, 2025.
[18] Protection Civile de la RDC, *Bilan des opérations d'urgence et inventaire des dégâts : Crue d'avril 2025*, Kinshasa, 2025
[19] **METTELSAT RDC.** (2025). *Bulletin climatologique annuel : Analyse des précipitations extrêmes sur la ville de Kinshasa*.
[20] Banzi, M. & Shiloh, M., *Make: Getting Started with Arduino*, 3rd Edition, Maker Media, Inc., 2014.
[21] ElecFreaks, *HC-SR04 Ultrasonic Sensor Technical Datasheet*, 2023.
[22] SIMCom Wireless Solutions, *SIM800L GSM/GPRS Module Hardware Design Specification*, 2024.
[23] Smith, S. W., *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing, 2013.
[24] Mbuyi, T. & Kabamba, F., "Optimisation du monitoring hydrologique en milieu urbain dense," *Revue Congolaise des Sciences Appliquées*, vol. 6, 2025.