

Rapport Technique – Projet Balance Connectée

Titouan Gardy-Lognon & Léonard Deloi

Encadrant : Loïc Barrande

Organisme : IUT Mesures Physiques – Aix-Marseille Université

Année universitaire : 2025-2026

Résumé

Ce projet avait pour objectif la conception et la mise en œuvre d'une balance connectée en se servant d'un capteur à jauge de contrainte SEN-HX711-01 et d'un microcontrôleur ESP32 UPESY Wroom. La chaîne d'acquisition permet de mesurer des masses comprises entre 0 et 1000 g maximum et d'envoyer les données en temps réel vers un tableau de bord Node-RED via le protocole MQTT. On a étudié deux scénarios métrologiques : l'étalonnage de la chaîne de mesure et sa vérification. Les données issues du capteur sont traitées après étalonnage pour obtenir la masse, son incertitude élargie et le mode de fonctionnement (étalonné ou vérifié). Le but de ce projet est d'obtenir le constat de vérification et le certificat d'étalonnage de la balance.

Mots-clés : Capteurs, Wifi, HX711, ESP32, MQTT, Node-RED, métrologie, étalonnage, vérification, incertitude.

Sommaire

1. Introduction
 2. Description de la chaîne de mesure
Étude métrologique
 4. Interface et traitement numérique
 5. Résultats et discussion
 6. Conclusion et perspectives
 - Annexes
-

1. Introduction

Le projet Balance constitue une suite logique des notions vues dans les TP précédents. Il consiste à concevoir une chaîne d'acquisition complète pour la mesure de masse, incluant la partie matérielle (capteur et microcontrôleur), logicielle (WiFi + MQTT), ainsi que la partie métrologique (étalonnage et vérification).

Deux scénarios sont considérés :

- **Scénario 1 :** Étalonnage à l'aide de masses étalonnées.

- **Scénario 2 :** Vérification à l'aide de masses de classe F1.

Les données sont transmises via le réseau de l'établissement Eduroam vers un broker Node-red, puis affichées sur le dashboard de celui-ci permettant une visualisation en temps réel de notre masse accompagnée de son incertitude.

2. Description de la chaîne de mesure

2.1 Schéma de principe

Capteur HX711 → ESP32 (WiFi Eduroam) → Broker MQTT → Node-RED Dashboard. **2.2**

Composants matériels

Élément	Référence	
Capteur	SEN-HX711-01	Obtenir les données
Microcontrôleur	ESP32 UPESY Wroom	Acquisition, traitement et communication Wi-Fi
Support	Plateau + barre	Support mécanique du capteur
Masses	Classe F1	Références d'étalonnage et de vérification

2.3 Logiciels utilisés

- **PlatformIO / Visual Studio Code** : développement du programme ESP32.
- **Broker MQTT de l'IUT** : assurant la communication entre l'ESP32 et Node-RED.
- **Node-RED** : interface graphique et dashboard.

3. Étude métrologique

Voici les différentes étapes ayant conduit à la création d'un certificat d'étalonnage ainsi qu'à l'établissement d'un constat de vérification.

Détermination de l'incertitude d'étalonnage

La première étape du travail a consisté à déterminer l'incertitude d'étalonnage. Il s'agit d'une incertitude composée, regroupant plusieurs sources indépendantes d'erreurs potentielles. L'incertitude composée est définie par la relation suivante :

$$u_c = \sqrt{u_q^2 + u_r^2 + u_T^2 + u_e^2 + u_p^2 + u_a^2}$$

où :

- u_q : incertitude de quantification du capteur,
- u_r : incertitude de répétabilité (écart type des mesures répétées),
- u_T : incertitude liée à la température,
- u_e : incertitude due à l'étalon de référence,
- u_p : incertitude de la procédure expérimentale,
- u_a : incertitude liée à l'acquisition et au traitement numérique.

Chaque composante a été évaluée expérimentalement. Pour cela, plusieurs séries de mesures ont été réalisées, comprenant jusqu'à dix pesées successives d'une même masse étalon. L'écart type obtenu a permis de quantifier la dispersion des mesures et d'évaluer la répétabilité.

Évaluation expérimentale des incertitudes

Les incertitudes ont été déterminées à partir d'expériences répétées dans des conditions stables de température et d'humidité. Chaque facteur a été isolé et quantifié à l'aide d'un traitement statistique approprié (calculs de moyenne, écart type, et coefficients d'étalonnage).

L'incertitude élargie a ensuite été calculée à l'aide du facteur de couverture $k = 2$, correspondant à un niveau de confiance de 95 % :

$$U = k \times u_c \text{ avec } k = 2$$

Création du certificat d'étalonnage

Une fois les incertitudes calculées, un certificat d'étalonnage a été généré. Ce certificat indique pour chaque point de mesure : la valeur mesurée, la valeur de référence, l'erreur de justesse et l'incertitude élargie correspondante. Il atteste de la traçabilité métrologique de la chaîne de mesure et garantit la fiabilité des résultats produits par la balance.

Les valeurs obtenues montrent que les erreurs observées restent inférieures aux limites métrologiques imposées pour les masses de classe F1. L'appareil est donc considéré comme conforme du point de vue de l'étalonnage.

Constat de vérification

Le constat de vérification a pour objectif de s'assurer que la balance respecte les erreurs maximales tolérées (EMT) définies par la réglementation métrologique et permet de définir une casse à la balance. Pour ce faire, plusieurs masses étalonnées ont été pesées et comparées à leurs valeurs de référence. Les erreurs obtenues ont été confrontées aux limites d'acceptation.

Si $|\text{Erreur}| + u_c \leq \text{EMT}$, alors la balance est jugée conforme pour la gamme de mesure concernée et pour la classe donnée. Dans le cas contraire, on augmente la classe et on regarde si on est conforme au nouvel EMT.

3.1 Étalonnage

Les mesures ont été effectuées avec des masses étalonnées (1 g à 200 g). On se sert des données brutes renvoyées par le capteur et on trouve une relation pour se rapporter à une unité connue. La relation de calibration

entre la tension du HX711 et la masse réelle est :

$$m = a \times X + b$$

où : a est le coefficient de sensibilité et b est la valeur de décalage qu'on utilise pour la tare

3.3 Calcul des incertitudes de mesures : Les incertitudes de mesures ont été évaluées selon la méthode de combinaison quadratique :

$$u_c = \sqrt{u_r^2 + u_f^2 + u_j^2}$$

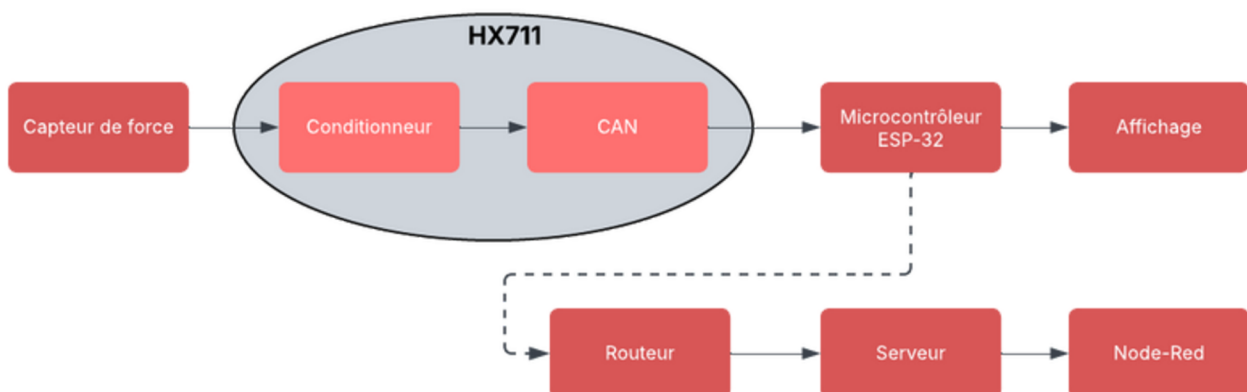
L'incertitude élargie est donnée par :

$$U = k \times u_c \text{ avec } k = 2$$

Les sources d'incertitude considérées sont :

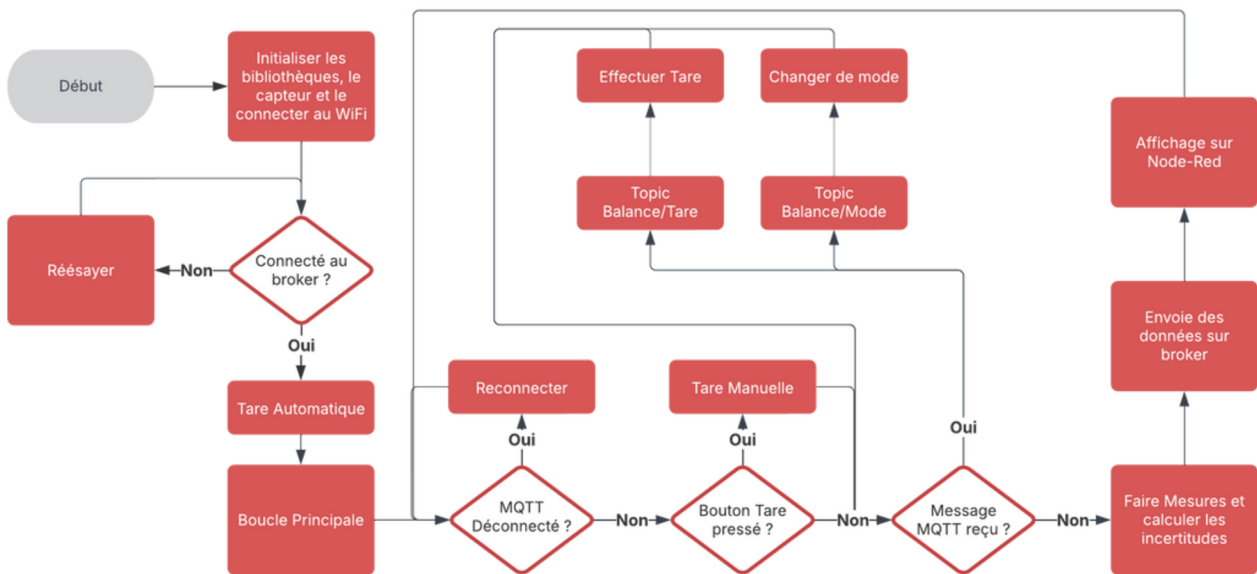
- **Répétabilité U_r** : elle correspond à la dispersion des mesures obtenues dans les mêmes conditions expérimentales. Elle est évaluée à partir de l'écart type de la moyenne des mesures successives effectuées pour une même masse étalon.
- **Étalon U_f** : incertitude des masses de référence.
- **Résolution du capteur U_j** : plus petite variation que le capteur peut détecter

Chaîne d'acquisition



4. Interface et traitement numérique

4.1 Logigramme du programme ESP32



4.2 Code ESP32

Le programme embarqué sur l'ESP32 gère l'ensemble des opérations nécessaires à la mesure et à la transmission des données.

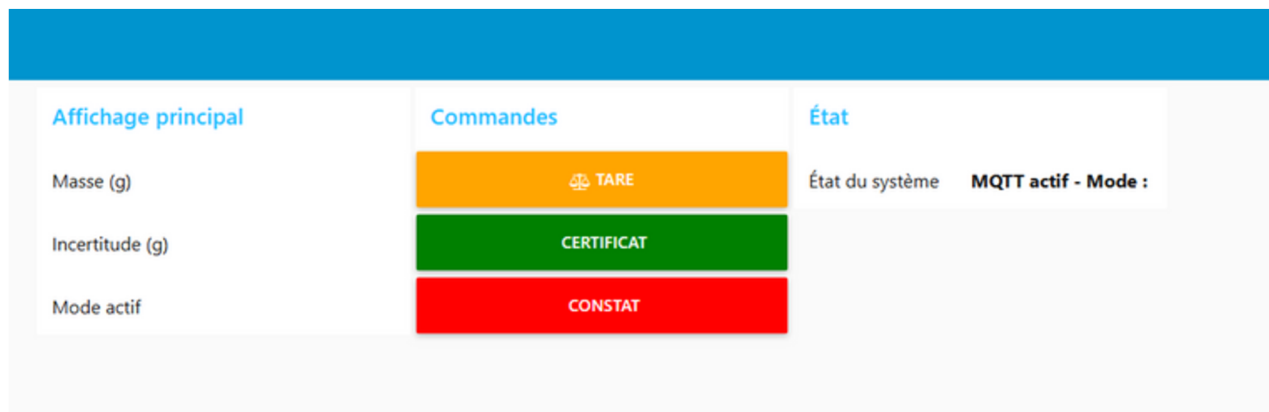
Il remplit plusieurs fonctions clés :

- Tare automatique et manuelle : une tare automatique est effectuée à chaque mise sous tension de la balance afin de garantir que la mesure démarre à zéro. Une tare manuelle peut également être déclenchée via le bouton GPIO0 de l'ESP32 permettant de remettre la balance à zéro à tout moment.
- Acquisition et filtrage : le programme lit la valeur brute du HX711 sur 10 échantillons consécutifs, puis calcule la moyenne pour réduire le bruit de mesure et améliorer la stabilité de la lecture.
- Calcul et mise en forme : la masse est calculée à partir de la tension moyenne mesurée et de la relation d'étalonnage $m = a * X + b$
- L'incertitude élargie correspondante est ensuite associée à la valeur.
- Transmission via MQTT : les données sont envoyées au réseau sous la forme d'un message JSON publié sur le topic balance/masse.
- Ce message contient trois champs :

```
{"masse": 123.45, "incertitude": 0.57, "mode": "etalonnee"}
```

où :

- masse correspond à la valeur mesurée en grammes,
- incertitude à l'incertitude élargie associée,
- mode indique si la balance fonctionne en mode étalonné ou mode vérifié.



4.3 Dashboard Node-RED

Le tableau de bord Node-RED a été conçu pour permettre de visualiser les résultats de la balance sans avoir besoin du terminal de VSCode

Il se compose de trois zones principales : l'affichage des mesures, les commandes utilisateur, et l'état du système.

Affichage principal :

Cette section regroupe les grandeurs mesurées et calculées en temps réel :

- Masse (g) : valeur moyenne calculée par l'ESP32 à partir des mesures du capteur HX711.
- Incertitude (g) : incertitude élargie associée à la mesure affichée.
- Mode actif : indique le mode de fonctionnement actuel de la balance (Étalonné ou Vérifié).

Commandes :

Trois boutons interactifs permettent de piloter la balance à distance :

- TARE : envoie une commande MQTT sur le topic balance/tare afin de remettre la balance à zéro.
- CERTIFICAT : permet de basculer en mode étalonné, correspondant au scénario d'étalonnage métrologique.
- CONSTAT : active le mode vérifié, pour le scénario de vérification métrologique.

État du système :

Cette zone fournit des informations sur la connectivité et le fonctionnement général :

- Indication de l'état de la communication MQTT (ex. : MQTT actif).
- Affichage du mode actuellement sélectionné.
- Un retour visuel est prévu en cas de perte de connexion ou de commande non reçue.

5. Résultats et discussion

Les résultats montrent une linéarité satisfaisante de la balance sur l'ensemble de la plage (0–1000 g). L'incertitude élargie obtenue est de l'ordre de 0.02 g à 200 g. Une dérive du signal a été observée au-delà de 600 g due à la saturation du capteur HX711. La communication MQTT s'est révélée stable, avec un temps de latence moyen inférieur à 200 ms.

6. Conclusion et perspectives

Le projet Balance a permis de concevoir une chaîne d'acquisition complète, fiable et communicante. L'objectif initial de mesure de masse connectée a été atteint, incluant la dimension métrologique (étalonnage et vérification).

Améliorations possibles : - Ajout d'un filtrage numérique (moyenne glissante, Kalman). - Intégration d'un affichage OLED local. - Extension de la plage de mesure via un capteur de plus forte capacité. - Automatisation de la calibration multi-points.

IUT d'Aix-Marseille - Département Mesures Physiques
Instrumentation Avancée - Année 2025-2026

CERTIFICAT D'ETALONNAGE

Objet :	Verification metrologique d'une balance electronique a capteur HX711
Appareil :	ESP32 + HX711 + Plateau Plexiglas
Lieu :	IUT d'Aix-Marseille - Département Mesures Physiques
Date :	20 / 10 / 2025
Redige par :	Leonard Deloi et Titouan Gardy
Verifie par :	Loïc Barrande

1. Conditions de verification

- Classe des masses utilisees : F1
- Plage de mesure de la balance : 0 - 200 g
- Resolution d'affichage : 0,001 g
- Temperature ambiante : 22,9 - 24,1 degC
- Vibrations : Absence de perturbations detectees

Les mesures sont effectuees apres tarage de la balance a vide.

Des masses classees F1 sont placees successivement sur le plateau (1 g, 2 g, 5 g, 10 g, 50 g, 100 g, 200 g).

L'incertitude elargie (U) est calculee pour un facteur de couverture $k = 2$.

m (g)	E	uc (g)	Uc (k=2)
1,028	0,028	0,04813288	0,09626576
2,029	0,029	0,04813289	0,09626579
5,025	0,025	0,04813297	0,09626594
9,982	-0,018	0,04813323	0,09626646
20,025	0,025	0,04813425	0,0962685
49,933	-0,067	0,0481413	0,0962826
99,857	-0,143	0,04816638	0,09633275
199,969	-0,031	0,04826733	0,09653466

Annexe 1 : Certificat d'étalonnage de la balance

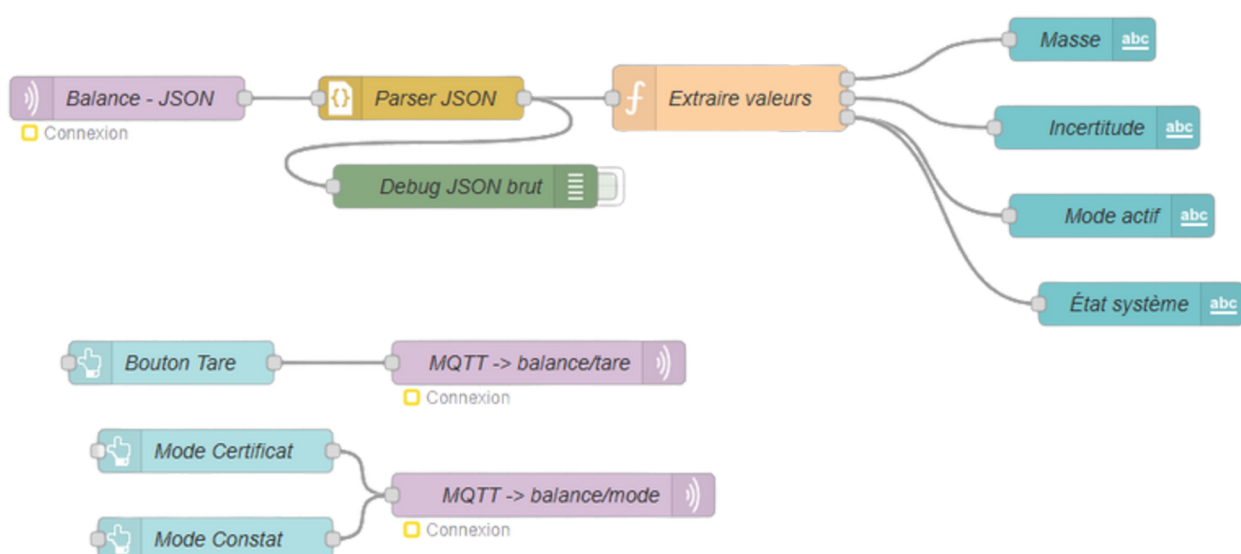
CONSTAT DE VERIFICATION

Appareil : ESP32 + HX711 + Plateau Plexiglas
 Lieu : IUT d'Aix-Marseille - Departement Mesures Physiques
 Date : 20 / 10 / 2025
 Rédigé par : Leonard Deloi et Titouan Gardy
 Vérifié par : Loïc Barrande

m (g)	Uc (k=2) (g)	uc (g)	E (g)	Classe satisfaite
1	0.1503344	0,0751672	0.028	Classe III
2	0.168722	0,084361	0.029	Classe III
5	0.1981593	0,0990797	0.025	Classe III
10	0.250201	0,1251005	-0.018	Classe III
20	0.304304	0,152152	0.025	Classe III
50	0.3595418	0,1797709	-0.067	Classe III
100	0.5853318	0,2926659	-0.143	Classe III
200	1.158729	0,5793643	-0.031	Classe II

Instrument conforme aux exigences de la classe III sur la plage 0-200g

Annexe 2 : Constat de vérification



Annexe 3 : Schéma du flow Node-RED

balance-connectee-HX711-ESP32/

- |
- |—— firmware/ → Code PlatformIO (ESP32 + HX711 + MQTT)
- |—— node-red/ → Flow JSON et dashboard Node-RED
- |—— docs/ → Schémas, logigramme et doc technique
- |—— rapport/ → Constat de vérification et certificat d'étalonnage
- |—— data/ → Mesures d'exemple et fichiers CSV
- |—— README.md → Présentation du projet et mode d'emploi
- |—— .gitignore → Exclusions (fichiers temporaires, secrets...)
- |—— LICENSE → Licence MIT du projet

Annexe 4 : Lien GitHub du code source complet et explication de l'arborescence

<https://github.com/Risx31/balance-connectee-HX711-ESP32>