
Université de Poitiers, Année universitaire 2024–2025

U.F.R. Sciences Fondamentales Appliquées

Master 1 TDSI - parcours Objets Connectés

Station Météo

Projet Module Systèmes Embarqués 2024

GROUSSARD Tristan & DJESSOU Koundeme Nobel & MORET Maxime

Table des matières

Introduction	1
1 Cahier des charges	2
1.1 Objectifs détaillés	2
1.2 Table des Entrées/Sorties	2
1.3 Spécifications fonctionnelles	2
1.3.1 Acquisition des données	2
1.3.2 Traitement et stockage	3
1.3.3 Interface utilisateur	3
1.3.4 Gestion de l'énergie	3
2 Analyse technique des composants	3
2.1 Caractéristiques du shield ST X-NUCLEO-IKS01A3	3
2.2 Étude des capteurs	3
2.2.1 Température, humidité et pression	3
2.2.2 Anémomètre et girouette	4
2.2.3 Pluviomètre	4
2.3 Solution de communication radio	5
2.3.1 Module LoRa	5
2.3.2 Module Bluetooth Low Energy (BLE)	5
2.3.3 Module NRF24L01+	5
3 Analyse préliminaire	6
3.1 Organisation du système	7
3.2 Diagramme des bords du modèle	7
3.3 Diagramme de flot de données	8
3.4 Diagramme de flot d'événements	9
3.5 Machine d'états / GRAFCET	9
3.6 Table des interruptions et priorités	11
4 Développement et validation unitaire	11
4.1 Stratégie de test	11
4.2 Capteurs environnementaux (HTS221 et LPS22HH)	12
4.2.1 Configuration	12
4.2.2 Tests réalisés	12
4.3 Anémomètre et Girouette	12
4.3.1 Configuration matérielle	12
4.3.2 Validation	12
4.4 Pluviomètre	13
4.4.1 Configuration matérielle	13
4.4.2 Tests de validation	13
4.5 Interface utilisateur LCD	13
4.5.1 Configuration	13
4.5.2 Tests effectués	14
4.6 Stockage sur carte SD	14
4.6.1 Configuration	14
4.6.2 Validation	14
5 Intégration et validation finale	15
5.1 Tests de validation finale	15

6	Tableau récapitulatif des fonctionnalités	15
7	Tableau récapitulatif des taches	16
	Conclusion	17

Table des figures

1	Interface utilisateur	6
2	Bords du modèle	7
3	Flot de données	8
4	Flot d'événements	9
5	GRAFCET Principal	10
6	GRAFCET Pluie et Vent	10
7	Machine d'états Interface	11
8	Tests des capteurs environnementaux	12
9	Directions du vent et mise en veille (vue de la console)	13
10	Mesure de pluviométrie (vue de la console)	13
11	Interface utilisateur - Page principale	14

Introduction

Le réchauffement climatique est un des défis majeurs auquel l'humanité aura à faire face dans les prochaines années. L'influence de l'activité humaine, longtemps contestée, ne fait plus aucun doute. D'après un récent rapport de l'Organisation Météorologique Mondiale, 2019 est la 5^{ème} année la plus chaude depuis le début des relevés météorologiques en 1850. La température moyenne en 2018 est de 1°C supérieure à celle relevée à l'ère préindustrielle.

Selon les travaux des scientifiques du GIEC, si l'humanité veut continuer à vivre sur la planète sans subir des changements climatiques catastrophiques mettant en cause sa survie et celle de tous les êtres vivants, cette température moyenne ne devra pas excéder 1.5°C d'ici à la fin de ce siècle.

Dans ce contexte, il est intéressant de pouvoir disposer d'un équipement permettant de relever les différentes grandeurs météorologiques du lieu où l'on se trouve.

L'objectif de ce projet, utilisant un système embarqué, est donc de concevoir et de réaliser une station météorologique.

1 Cahier des charges

1.1 Objectifs détaillés

L'objectif de ce projet est de réaliser une station météorologique utilisant une carte STM32F746G Discovery. Cette station doit être capable de mesurer :

- La température
- La pression atmosphérique
- L'humidité
- La luminosité
- La direction et la vitesse du vent
- La quantité d'eau tombée en une journée (pluviométrie)

Ces mesures seront affichées et stockées directement sur la station (en utilisant le LCD et le lecteur de carte SD de la carte Discovery) et pourront également être transmises par radio vers un dispositif distant (smartphone, Raspberry Pi, etc.).

1.2 Table des Entrées/Sorties

TABLE 1 – Table des Entrées/Sorties du système

Composant	Type	Interface	Pins STM32	Caractéristiques
HTS221	Entrée	I2C1	PB8 (SCL) PB9 (SDA)	Humidité : 0-100% Temp : -40 à +120°C
LPS22HH	Entrée	I2C1	PB8 (SCL) PB9 (SDA)	Pression : 260-1260 hPa
Anémomètre	Entrée	GPIO	PC6	2,4km/h = 1Hz
Girouette	Entrée	ADC	PA8	16 positions (0-360°)
Pluviomètre	Entrée	GPIO	PA15	0,2794mm/impulsion
Écran LCD	Sortie	LTDC	Multiple pins	480x272 pixels
Carte SD	E/S	SDIO	PC8-PC11 (données) PC12 (CLK) PD2 (CMD)	Mode 4-bits

1.3 Spécifications fonctionnelles

La station météorologique doit répondre aux fonctionnalités suivantes :

1.3.1 Acquisition des données

- Mesure de la température ambiante (plage de -40°C à +120°C)
- Mesure du taux d'humidité relative (0-100%)
- Mesure de la pression atmosphérique (260-1260 hPa)
- Mesure de la vitesse du vent (conversion 2,4 km/h = 1 Hz)
- Mesure de la direction du vent (16 positions sur 360°)
- Mesure de la pluviométrie (résolution de 0,2794 mm par basculement)

1.3.2 Traitement et stockage

- Calcul des moyennes sur différentes périodes (horaire, journalière)
- Détection des valeurs extrêmes (minimum et maximum)
- Stockage des données sur carte SD
 - Format de fichier structuré pour exploitation ultérieure
 - Horodatage de chaque mesure
 - Organisation par jour/mois
- Conservation de l'historique des mesures

1.3.3 Interface utilisateur

- Affichage en temps réel sur écran LCD 480x272 pixels
 - Valeurs courantes des capteurs
 - Graphiques d'évolution
- Navigation entre différents écrans
 - Écran principal des mesures
 - Écrans détaillés par type de mesure
 - Écran de configuration
 - Écran des graphiques
- Configuration système
 - Réglage date et heure

1.3.4 Gestion de l'énergie

- Optimisation de la consommation énergétique
- Adaptation de la fréquence d'échantillonnage selon les besoins
- Utilisation des modes basse consommation lorsque possible

2 Analyse technique des composants

2.1 Caractéristiques du shield ST X-NUCLEO-IKS01A3

- **LSM6DSO** : Accéléromètre 3D ($\pm 2 / \pm 4 / \pm 8 / \pm 16g$) et gyroscope 3D ($\pm 125 / \pm 250 / \pm 500 / \pm 1000 / \pm 2000$ dps)
- **LIS2MDL** : Magnétomètre 3D (± 50 gauss)
- **LIS2DW12** : Accéléromètre 3D ($\pm 2 / \pm 4 / \pm 8 / \pm 16g$)
- **LPS22HH** : Capteur de pression (baromètre à sortie numérique absolue de 260-1260 hPa)
- **HTS221** : Capteur d'humidité relative et de température
- **STTS751** : Capteur de température (plage de $-40C$ à $+125C$)

2.2 Étude des capteurs

2.2.1 Température, humidité et pression

La récupération des données des capteurs sur la carte d'extension **X-NUCLEO-IKS01A3** se fait principalement via le bus **I2C** (Inter-Integrated Circuit).

Configurations possibles

La carte peut être configurée de deux manières différentes pour la communication I2C :

- **Mode standard** : Tous les capteurs sont connectés sur un seul bus I2C.
- **Mode SensorHub** :
 - **LSM6DSO** et **LIS2DW12** sont connectés au bus **I2C2**.
 - Les autres capteurs (**LIS2MDL**, **LPS22HH**, **HTS221**, **STTS751**) sont connectés au **LSM6DSO** via le bus **I2C1**.

Le choix du mode se fait par la configuration des cavaliers **JP7** et **JP8** sur la carte.

Particularités

- La carte s'interface avec les microcontrôleurs **STM32** via la broche **I2C1**.
- Il est possible de modifier le port I2C par défaut si nécessaire.
- Le **LSM6DSO** peut fonctionner comme un hub I2C pour les autres capteurs. Cette flexibilité dans la configuration du bus I2C permet d'adapter la carte à différents besoins et scénarios d'utilisation.

2.2.2 Anémomètre et girouette

Le capteur de vitesse du vent, ou **anémomètre**, est de type à coupelles. Il mesure la vitesse du vent en fermant un contact lorsqu'un aimant passe devant un interrupteur.

- Une vitesse de vent de **2,4 km/h** provoque la fermeture de l'interrupteur une fois par seconde.
- L'interrupteur de l'anémomètre est connecté aux deux conducteurs intérieurs du câble **RJ11** partagé par l'anémomètre et la girouette (broches 2 et 3).

Le capteur de direction du vent, ou **girouette**, est le plus complexe des trois capteurs.

- Il possède huit interrupteurs, chacun connecté à une résistance différente.
- L'aimant de la girouette peut fermer deux interrupteurs à la fois, ce qui permet d'indiquer jusqu'à **16 positions différentes**.
- Une résistance externe peut être utilisée pour former un diviseur de tension, produisant une tension de sortie mesurable avec un convertisseur analogique-numérique.

Les valeurs de résistance pour toutes les 16 positions possibles sont données dans le tableau du document source. Les valeurs de résistance pour les positions intermédiaires sont le résultat de deux résistances adjacentes connectées en parallèle lorsque l'aimant de la girouette active deux interrupteurs simultanément.

2.2.3 Pluviomètre

Le capteur de pluie utilise le principe du « **tipping bucket** », aussi appelé **auge basculeur**. Ce type de pluviomètre est constitué de deux petits récipients montés sur un axe horizontal. Lorsqu'un récipient est rempli par l'eau de pluie, il bascule sous son poids, vidant son contenu et permettant à l'autre récipient de se remplir. Chaque basculement ferme un contact électrique qui peut être enregistré par un compteur numérique ou une interruption de microcontrôleur.

Récupération des données de pluviométrie avec le STM32

Pour récupérer l'information de pluviométrie avec le **STM32**, il faut :

- Connecter l'interrupteur du pluviomètre aux deux conducteurs centraux d'un câble **RJ11**.
- Configurer une broche du **STM32** en entrée d'interruption pour détecter la fermeture du contact.
- Compter le nombre d'interruptions pour déterminer la quantité de pluie tombée.
Chaque basculement correspond à une quantité de pluie précise. Dans ce cas, chaque basculement de l'auget représente **0,2794 mm** de pluie.

2.3 Solution de communication radio

Pour la transmission des données vers un dispositif distant, plusieurs solutions de communication radio ont été étudiées. Les critères principaux de sélection étaient :

- Compatibilité avec le STM32F746
- Faible consommation énergétique
- Portée adaptée à l'usage
- Facilité d'intégration

Après analyse, voici les solutions potentielles identifiées :

2.3.1 Module LoRa

- **Avantages :**
 - Très faible consommation
 - Longue portée (plusieurs kilomètres)
 - Idéal pour les applications IoT
- **Inconvénients :**
 - Débit limité
 - Nécessite une infrastructure réseau

2.3.2 Module Bluetooth Low Energy (BLE)

- **Avantages :**
 - Très faible consommation
 - Communication directe avec smartphones
 - Bibliothèques disponibles pour STM32
- **Inconvénients :**
 - Portée limitée (10-100m)
 - Connexion point à point

2.3.3 Module NRF24L01+

- **Avantages :**
 - Très faible consommation
 - Communication bidirectionnelle
 - Interface SPI simple
 - Coût réduit
- **Inconvénients :**
 - Portée moyenne (100m max)
 - Sensible aux interférences

3 ANALYSE PRÉLIMINAIRE

Pour notre application, le module NRF24L01+ semble le plus adapté car il offre un bon compromis entre consommation énergétique, facilité d'intégration et performances. De plus, son interface SPI est directement compatible avec le STM32F746 et sa bibliothèque est bien documentée.

3 Analyse préliminaire

Afin que tout fonctionne au mieux, on a eu plusieurs séances de travail en groupe pour bien comprendre le fonctionnement de chaque capteur et de la carte STM32F746G Discovery. Voici les questions principales auxquelles on a répondu lors de ces séances de travail :

- Comment fonctionne chaque capteur ?
- Comment sont-ils connectés à la carte STM32 ?
- Combien de timers seront utilisés ? A quoi vont servir ces timers ?
- Quelles sont les fonctionnalités nécessaires pour l'interface utilisateur ?
- Comment stocker les données sur la carte SD ?
- Que souhaite t-on afficher sur l'écran LCD ?
- Comment gérer les interruptions pour les capteurs de vitesse et de pluie ?
- Tout doit fonctionner à quelle fréquence ?
- Quel sera la fréquence pour chaque timer ?
- Comment gérer les erreurs ?

Après avoir répondu à ces questions, nous avons défini le prototype de notre interface utilisateur :

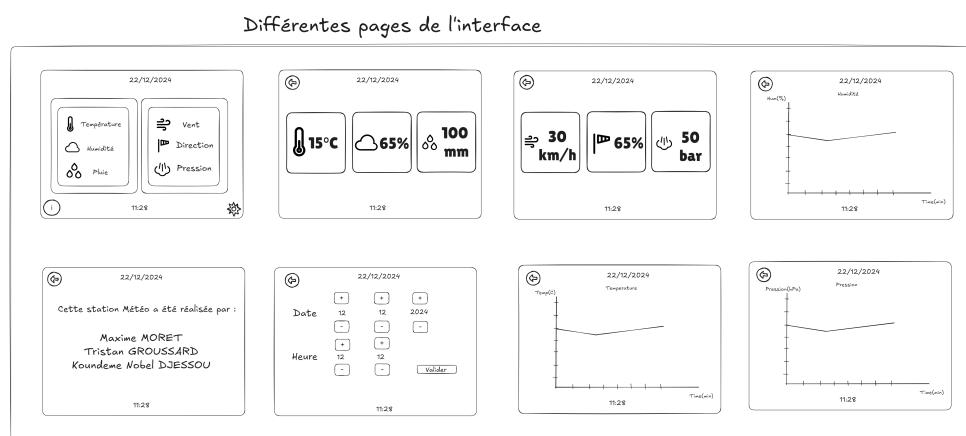


FIGURE 1 – Interface utilisateur

Notre interface utilisateur est divisée en cinq parties principales :

- L'écran principal : affichage des grandeurs mesurées en temps réel
- Deux pages qui affichent les valeurs en temps réel des capteurs
- L'écran configuration qui permet de configurer la date et l'heure
- La page des informations qui affiche les informations sur le projet
- Les pages des graphiques (température, humidité, pression)

Une fois cette interface définie, nous avons pu commencer à travailler sur les différents diagrammes de flot de données, de flot d'événements et de GRAFCET.

3.1 Organisation du système

Le système peut être divisé en trois sous-systèmes principaux interagissant entre eux :

- **Système d'acquisition** : gestion des capteurs et conversion des données
- **Système de traitement** : traitement des données et gestion des interruptions
- **Système d'interface** : affichage LCD et stockage SD

3.2 Diagramme des bords du modèle

Le diagramme des bords du modèle montre les interactions entre le STM32 et ses périphériques externes :

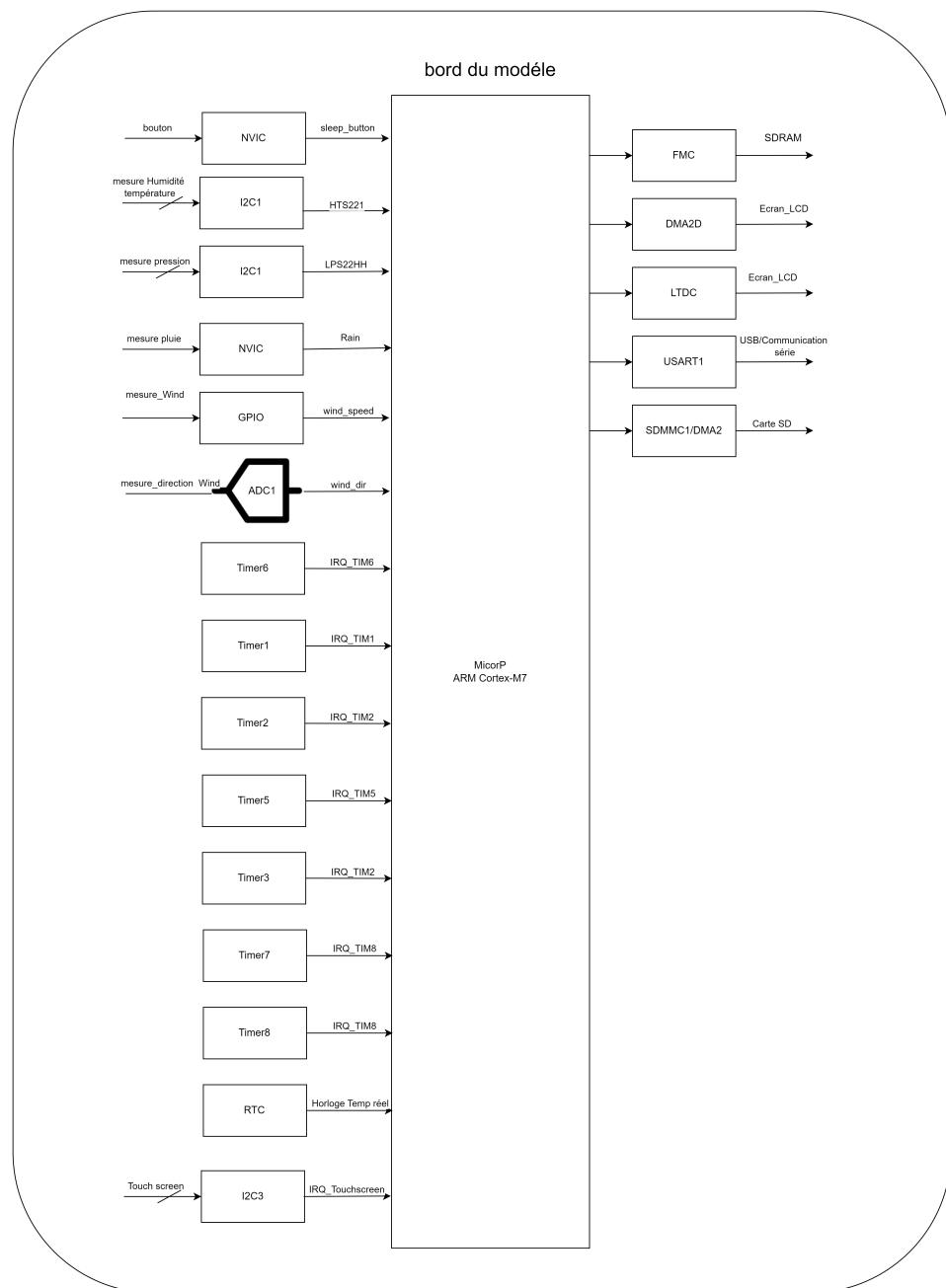


FIGURE 2 – Bords du modèle

Les principaux éléments sont :

- **Capteurs I2C** : HTS221 (température/humidité) et LPS22HH (pression)
- **Capteurs à impulsions** : anémomètre et pluviomètre
- **Capteur analogique** : girouette
- **Interface utilisateur** : écran LCD
- **Stockage** : carte SD

3.3 Diagramme de frot de données

Le diagramme de frot de données illustre le cheminement des données à travers le système :

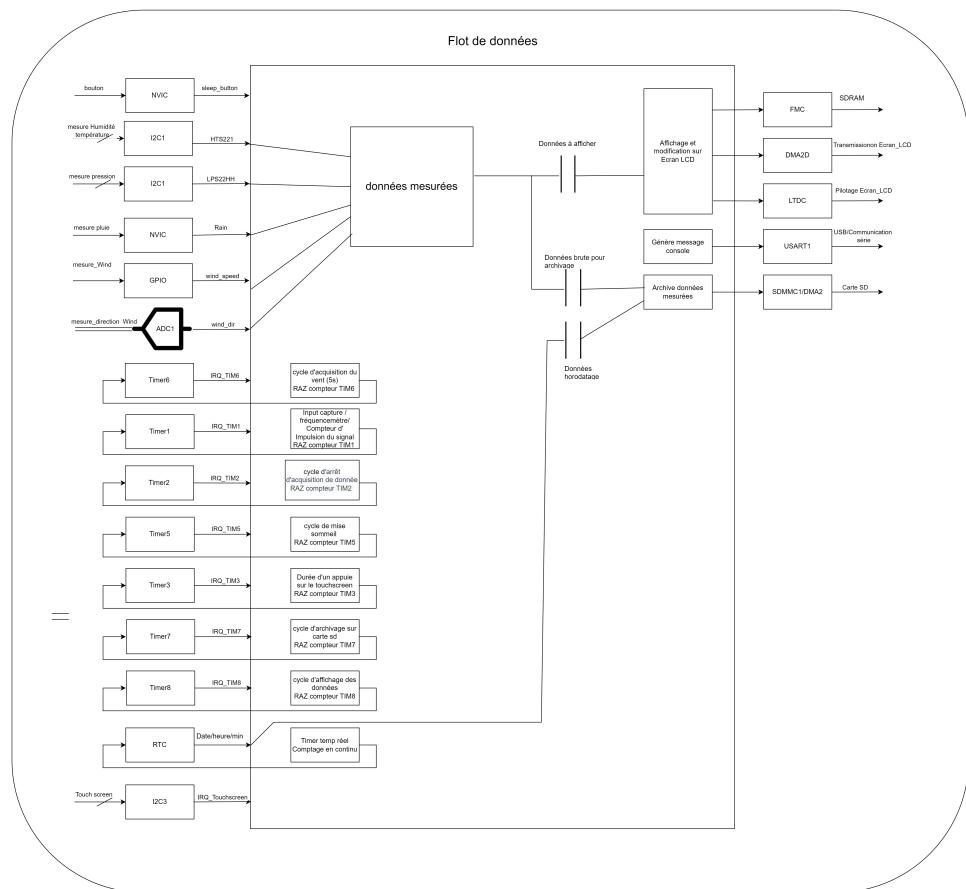


FIGURE 3 – Flot de données

Les principales transformations sont :

- Acquisition des données brutes des capteurs
- Conversion et mise en forme des données
- Calcul des moyennes et statistiques
- Formatage pour affichage et stockage

3.4 Diagramme de flot d'événements

Le diagramme de flot d'événements montre la séquence des événements système :

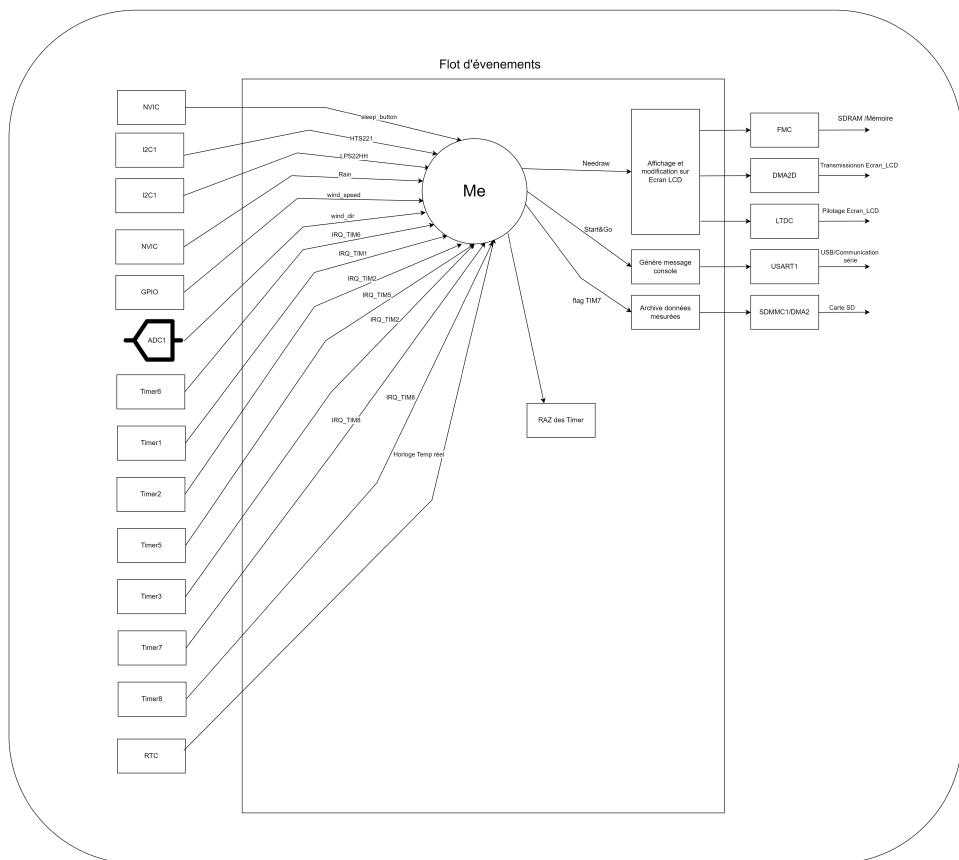


FIGURE 4 – Flot d'événements

Les principaux événements sont :

- Interruptions des capteurs à impulsions
- Timers d'échantillonnage
- Événements utilisateur (interface LCD)
- Événements de stockage SD

3.5 Machine d'états / GRAFCET

La machine d'états globale du système se présente comme suit :

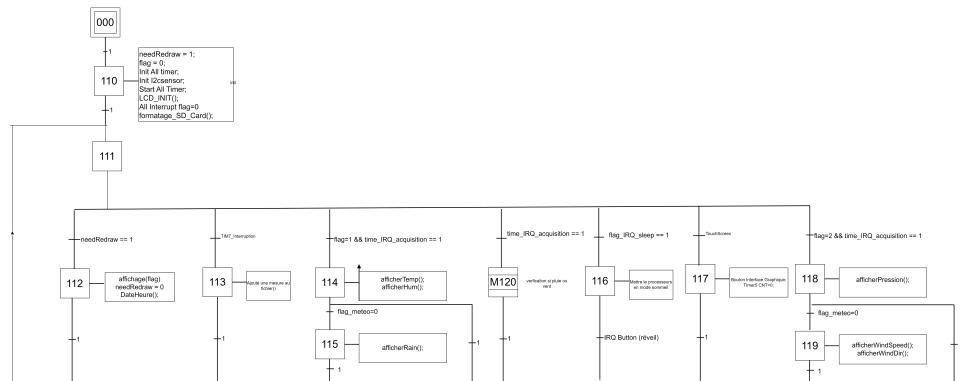


FIGURE 5 – GRAFCET Principal

Les principaux états sont :

- Initialisation du système
- Acquisition des données
- Traitement et mise à jour des mesures

Les sous machines d'états sont représentées dans les diagrammes suivants :

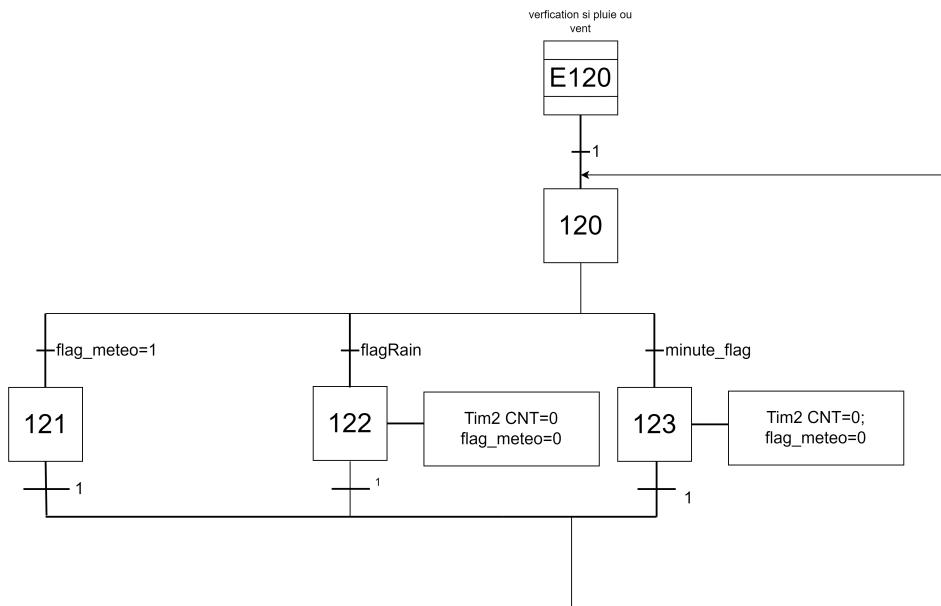


FIGURE 6 – GRAFCET Pluie et Vent

Ce grafcet permet de gérer les interruptions des capteurs de pluie et de vent.

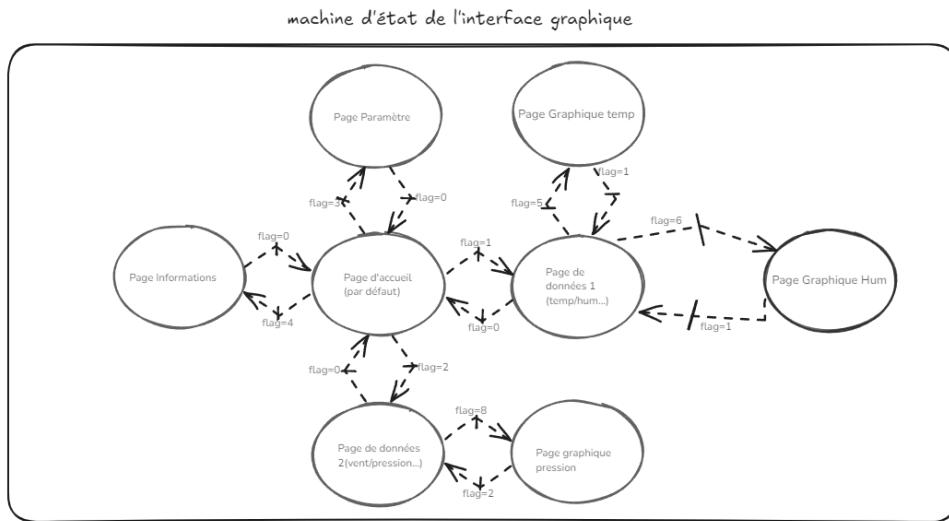


FIGURE 7 – Machine d'états Interface

Ce grafset permet de gérer les différentes pages de l'interface utilisateur.

3.6 Table des interruptions et priorités

TABLE 2 – Priorités des interruptions

Source	Priorité	Description	Fonction
Timer 5	1	Cycle de sommeil	Gestion mode basse consommation
Timer 2	2	Timer périodique	Échantillonnage capteurs I2C
Timer 3	3	Timer périodique	Rafraîchissement écran
Timer 8	4	Timer périodique	Gestion du stockage SD
Timer 7	5	Timer périodique	Mise à jour graphiques
Timer 1 & 6	6	Timer périodique	Lecture des capteurs
EXTI Bouton	1	Interruption externe	Interaction utilisateur et réveil
EXTI PA15	6	Interruption externe	Mesure pluviométrie

Les priorités ont été définies en fonction de l'importance des tâches :

- Priorité 1 : Gestion du sommeil et réveil système
- Priorités 2-5 : Tâches périodiques de mesure et affichage
- Priorité 6 : Acquisition des données des capteurs

4 Développement et validation unitaire

4.1 Stratégie de test

Avant l'intégration complète du système, chaque composant a été testé individuellement pour garantir son bon fonctionnement. Cette approche nous a permis de :

- Valider le fonctionnement de chaque capteur individuellement
- Identifier et corriger les problèmes au plus tôt
- Établir une base solide pour l'intégration finale

4.2 Capteurs environnementaux (HTS221 et LPS22HH)

4.2.1 Configuration

La communication avec ces capteurs est réalisée via le bus I2C1. Voici les étapes de validation :

1. Test de présence des capteurs sur le bus I2C
2. Configuration des registres de contrôle
3. Validation de la récupération des données

4.2.2 Tests réalisés

- Lecture des identifiants des capteurs
- Vérification de la cohérence des mesures
- Test de la fréquence d'échantillonnage

```
Temperature [degC]: 20.57  
Humidity []:82.06  
Temperature [degC]: 20.57  
Humidity []:82.81
```

(a) Mesures de température et humidité

```
pressure [hPa]:1030.05  
pressure [hPa]:1030.05  
pressure [hPa]:1030.05  
pressure [hPa]:1030.02
```

(b) Mesures de pression

FIGURE 8 – Tests des capteurs environnementaux

4.3 Anémomètre et Girouette

4.3.1 Configuration matérielle

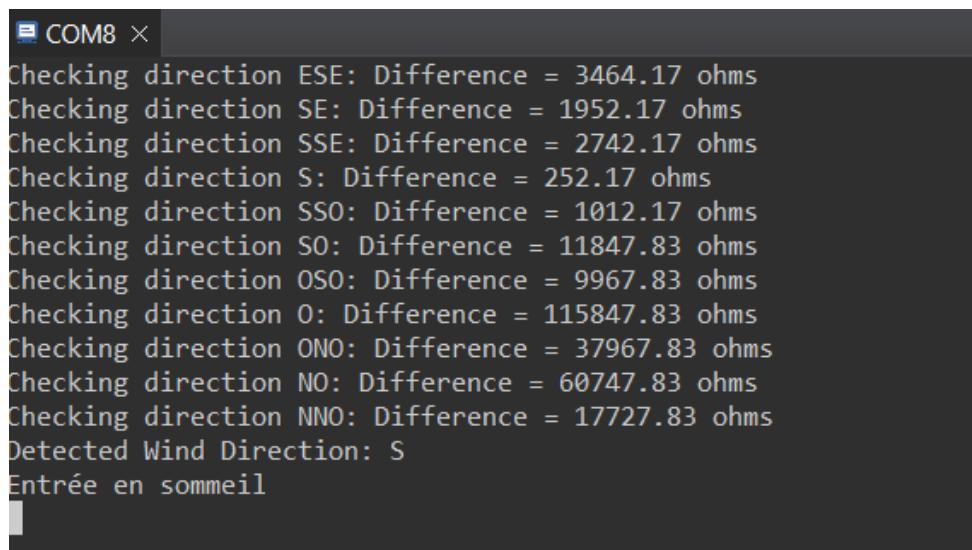
L'anémomètre nécessite :

- Une entrée GPIO configurée en interruption externe
- Une résistance de pull-up pour stabiliser le signal

4.3.2 Validation

Tests effectués à l'aide d'un vrai gyroscope et d'un anémomètre :

- Test des 16 positions de la girouette



```

COM8 ×
Checking direction ESE: Difference = 3464.17 ohms
Checking direction SE: Difference = 1952.17 ohms
Checking direction SSE: Difference = 2742.17 ohms
Checking direction S: Difference = 252.17 ohms
Checking direction SSO: Difference = 1012.17 ohms
Checking direction SO: Difference = 11847.83 ohms
Checking direction OSO: Difference = 9967.83 ohms
Checking direction O: Difference = 115847.83 ohms
Checking direction ONO: Difference = 37967.83 ohms
Checking direction NO: Difference = 60747.83 ohms
Checking direction NNO: Difference = 17727.83 ohms
Detected Wind Direction: S
Entrée en sommeil

```

FIGURE 9 – Directions du vent et mise en veille (vue de la console)

4.4 Pluviomètre

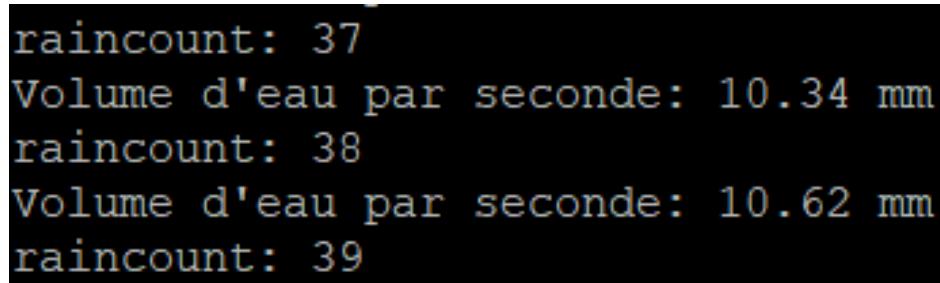
4.4.1 Configuration matérielle

Le pluviomètre de type "tipping bucket" nécessite :

- Une entrée GPIO configurée en interruption externe
- Une résistance de pull-up interne activée
- Configuration de l'antirebond logiciel

4.4.2 Tests de validation

- Test unitaire avec simulation manuelle des basculements
- Vérification du comptage des impulsions
- Validation de la conversion (0,2794 mm par basculement)



```

raincount: 37
Volume d'eau par seconde: 10.34 mm
raincount: 38
Volume d'eau par seconde: 10.62 mm
raincount: 39

```

FIGURE 10 – Mesure de pluviométrie (vue de la console)

4.5 Interface utilisateur LCD

4.5.1 Configuration

- Initialisation du contrôleur LTDC
- Configuration de la résolution (480x272)
- Configuration du format de couleur (RGB565)

4.5.2 Tests effectués

- Test d'affichage des caractères
- Validation du rafraîchissement de l'écran
- Test des différentes zones d'affichage
- Vérification du contraste et de la lisibilité

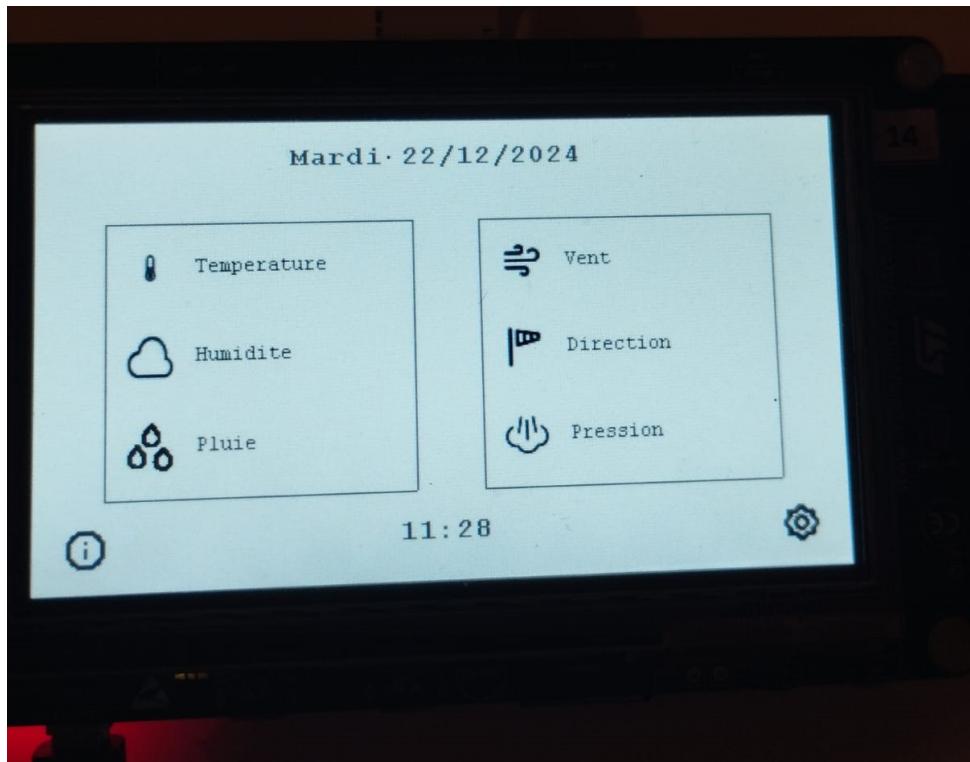


FIGURE 11 – Interface utilisateur - Page principale

4.6 Stockage sur carte SD

4.6.1 Configuration

- Initialisation du contrôleur SDMMC en mode 4 bits
- Configuration du système de fichiers FAT via FatFS
- Configuration du DMA pour les transferts

4.6.2 Validation

- Test de création de fichiers
 - Validation de l'écriture et lecture des données
 - Test de performance en écriture continue
 - Vérification de l'intégrité des données
- [Insérer capture d'écran du contenu d'un fichier de log]

5 Intégration et validation finale

5.1 Tests de validation finale

Tests exhaustifs réalisés pour valider l'ensemble des fonctionnalités :

TABLE 3 – Tests de validation finale

Test	Résultat	Commentaire
Précision mesures	Validé	Dans les tolérances spécifiées
Interface utilisateur	Validé	Temps de réponse satisfaisant
Stockage données	Validé	Pas de perte de données
Gestion erreurs	Validé	Récupération correcte
Performance globale	Validé	Conforme aux spécifications

6 Tableau récapitulatif des fonctionnalités

Ce tableau résume l'état de développement de chaque bloc fonctionnel du projet, ainsi que son état de validation et d'intégration.

TABLE 4 – État des développements et validations

Bloc fonctionnel	Développement	Validation unitaire	Intégration
Capteurs			
Température/Humidité (HTS221)	Effectué	Validé	Intégré
Pression (LPS22HH)	Effectué	Validé	Intégré
Anémomètre	Effectué	Validé	Intégré
Girouette	Effectué	Validé	Intégré
Pluviomètre	Effectué	Validé	Intégré
Interface utilisateur			
Écran d'accueil	Effectué	Validé	Intégré
Affichage des mesures	Effectué	Validé	Intégré
Graphiques temps réel	Effectué	Validé	Intégré
Configuration date/heure	Effectué	Validé	Intégré
Stockage			
Gestion carte SD	Effectué	Validé	Intégré
Sauvegarde des mesures	Effectué	Validé	Intégré
Sous-parties d'assemblage			
Agrégation des mesures	Effectué	Validé	Intégré
Gestion IHM	Effectué	Validé	Intégré
Intégration			
Intégration finale	Effectué	Validé	Intégré

Le tableau ci-dessus présente :

7 TABLEAU RÉCAPITULATIF DES TACHES

- Chaque bloc fonctionnel identifié lors de la décomposition préliminaire
- L'état de développement de chaque bloc
- Le statut de la validation unitaire
- L'état d'intégration dans l'application finale
- Les sous-parties d'assemblage et l'intégration finale

7 Tableau récapitulatif des taches

Ce tableau résume les tâches affectées à chaque membre de l'équipe et leur état d'avancement.

Nom Prénom	Tâche affectée	Tâche effectuée	Implantée version courante
Maxime MORET	Implémentation(lecture et agrégation) des capteurs I2C (Température,pluie,humidité)	Oui	Oui
Maxime MORET et Koundeme Nobel DJESSOU	Implémentation des capteurs de pluviométrie et de vent	Oui	Oui
Koundeme Nobel DJESSOU	Implémentation de l'interface utilisateur (pages de l'interface)	Oui	Oui
Koundeme Nobel DJESSOU	Implémentation de l'interaction de l'écran tactile(Partie 1)	Oui	Oui
Maxime MORET	Implémentation de l'interaction de l'écran tactile(Partie 2)	Oui	Oui
Koundeme Nobel DJESSOU	Implémentation de la RTC	Oui	Oui
Koundeme Nobel DJESSOU	Implémentation de la carte SD	Oui	Oui
Tristan GROUS-SARD	Schématisation Flow de données,Flow d'événements et GRAFCET	Oui	Oui

TABLE 5 – Tâches affectées et effectuées

Conclusion

Ce projet a été d'une grande richesse en termes d'apprentissage. Il nous a permis de mettre en pratique les connaissances acquises en cours de systèmes embarqués. Nous avons pu découvrir les différentes étapes de la conception d'un système embarqué, de la spécification des besoins à la réalisation du système en passant par la conception et la programmation.