

# LIVRABLE 4



**NautiMétéo**  
SYSTEMS

Mathilde DUVIVIER

Omaïma BELGACEM

Benjamin COUSIN

Robin PETREQUIN

## Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| Table des matières .....   | 2         |
| <b>DOCUMENTATION TECHNIQUE - Système de Station Météo Embarquée — AIVM .....</b> | <b>2</b>  |
| 1. Présentation générale du système .....  | 2         |
| 2. Architecture globale du système .....   | 3         |
| 3. Architecture logicielle .....   | 4         |
| 4. Modes de fonctionnement.....  | 5         |
| 5. Indication des états et des erreurs .....                                     | 5         |
| 6. Gestion des données et stockage.....  | 6         |
| 7. Configuration du système.....   | 6         |
| 8. Gestion énergétique .....   | 7         |
| 9. Sécurité, fiabilité et gestion des erreurs .....                              | 8         |
| 10. Performances et perspectives .....   | 8         |
| 11. Intégration matérielle des capteurs.....                                     | 8         |
| <b>DOCUMENTATION UTILISATEUR – Station Météo Embarquée AIVM .....</b>            | <b>13</b> |
| 1. Présentation générale .....   | 13        |
| 2. Description du matériel.....  | 14        |
| 3. Mise en service .....   | 14        |

# **DOCUMENTATION TECHNIQUE - Système de Station Météo Embarquée — AIVM**

## **1. Présentation générale du système**

### **1.1. Contexte et objectifs**

Dans le cadre de son programme international de surveillance climatique, l'Agence Internationale pour la Vigilance Météorologique (AIVM) a lancé un projet de développement de stations météorologiques embarquées destinées à être installées sur des navires circulant en zones océaniques.

Ces stations ont pour mission de collecter, enregistrer et transmettre des données environnementales essentielles à la détection et à la prévention des phénomènes climatiques extrêmes, tels que les cyclones ou les tempêtes tropicales.(

Le système a été conçu pour être :

- **Simple d'utilisation**, afin d'être manipulé par un membre d'équipage non spécialiste ;

- **Autonome et fiable**, avec un fonctionnement continu même en conditions maritimes difficiles ;
- **Économe en énergie**, grâce à différents modes de gestion énergétique ;
- **Sécurisé**, pour garantir l'intégrité des données collectées.

## 1.2. Objectifs fonctionnels

Le système développé doit permettre :

- L'acquisition automatique de données météorologiques (température, pression, hygrométrie, luminosité, etc.) ;
- L'enregistrement de ces données dans des fichiers structurés sur une carte SD ;
- La configuration et la maintenance du système via une interface série (UART) ;
- La gestion d'états de fonctionnement différenciés selon les besoins (standard, configuration, maintenance, économie) ;
- L'indication de l'état ou d'éventuelles anomalies via une LED multicolore.

## 2. Architecture globale du système

### 2.1. Vue d'ensemble

Le dispositif repose sur une architecture embarquée modulaire articulée autour d'un microcontrôleur principal assurant la coordination des capteurs, la gestion des modes de fonctionnement et la communication avec les périphériques externes.

Les principaux éléments sont :

- Un microcontrôleur gérant les échanges de données, la mémoire et la logique de contrôle ;
- Des capteurs mesurant les paramètres météorologiques ;
- Une carte SD assurant le stockage local des données collectées ;
- Un module GPS pour la géolocalisation et l'horodatage des mesures ;
- Un module RTC (Real Time Clock) garantissant la cohérence temporelle ;
- Une interface UART pour la configuration via console série ;
- Deux boutons poussoirs (rouge et vert) pour la sélection des modes ;
- Une LED RGB pour la signalisation visuelle de l'état du système.

### 2.2. Schéma fonctionnel (flux d'informations)

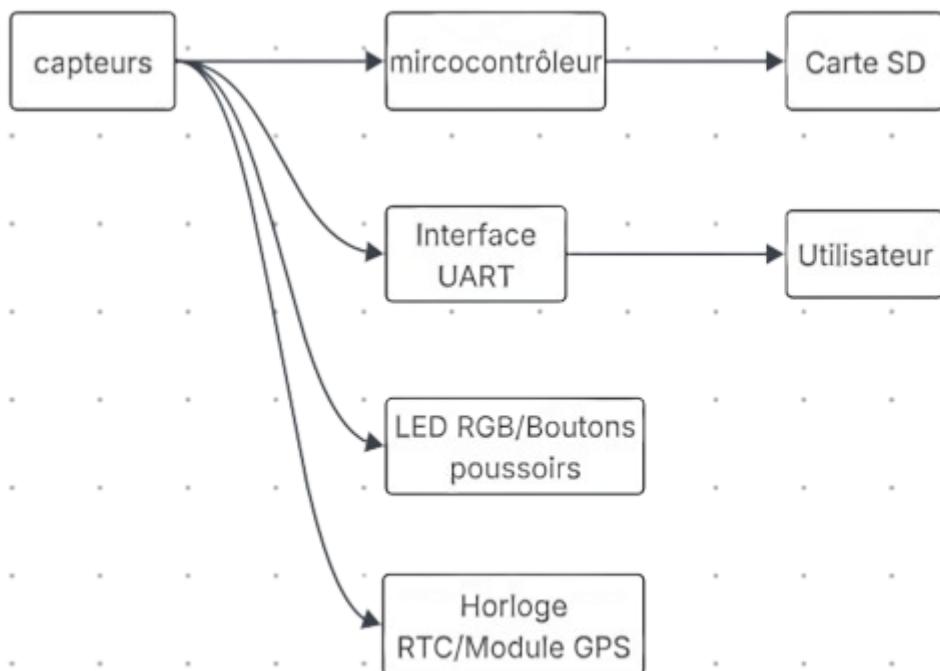


Figure 1

Le microcontrôleur centralise toutes les informations provenant des capteurs, les traite, puis les enregistre sur la carte SD.

L'utilisateur peut intervenir via l'interface série pour configurer ou diagnostiquer le système, tandis que les boutons et la LED offrent une interaction directe et simplifiée.

### 3. Architecture logicielle

#### 3.1. Structure générale du programme

D'abord il faut savoir que lorsque l'on travaille sur un projet Arduino nous utilisons plusieurs fichiers par soucis de clarté mais également d'organisation pour réutiliser certains modules ou bien de maintenance pour corriger une partie sans toucher au reste. Il existe donc trois fichiers phare. Le premier est le .h (headers) où l'on déclare les fonctions, classes, variables etc... afin de partager ces déclarations avec plusieurs fichiers différents. Le headers dit au compilateur ce qui existe mais ne contient pas le code lui-même. Le code (C++) se trouve dans le .cpp il contient l'implémentation du code déclaré dans le fichier.h. Et enfin il y a le fichier. ino qui est le fichier principal Arduino avec le void setup et le void loop, c'est le fichier principal que l'IDE Arduino ouvre par défaut. Donc grossièrement on déclare les fonctions puis on les inclut et les explique puis on les utilise.

## 4. Modes de fonctionnement

Le système embarqué dispose de quatre modes opérationnels distincts, chacun répondant à un usage particulier.

Le changement de mode s'effectue à l'aide des boutons poussoirs et est signalé par un code lumineux spécifique.

| Mode                 | Accès                                 | Description   | Indication LED |
|----------------------|---------------------------------------|---|----------------|
| <b>Standard</b>      | Démarrage normal                      | Acquisition et enregistrement des données à intervalle régulier                 | Vert continu   |
| <b>Configuration</b> | Démarrage avec le bouton rouge pressé | Modification des paramètres système via l'interface série                       | Jaune continu  |
| <b>Maintenance</b>   | Appui long (5 s) sur le bouton rouge  | Consultation directe des données via UART et retrait sécurisé de la carte SD    | Orange continu |
| <b>Économique</b>    | Appui long (5 s) sur le bouton vert   | Réduction de la fréquence d'acquisition et désactivation partielle des capteurs | Bleu continu   |

## 5. Indication des états et des erreurs

Le système informe l'utilisateur de son état de fonctionnement à travers une LED multicolore. Chaque couleur ou clignotement correspond à un état ou une anomalie détectée :

| Signal lumineux                   | Signification                     |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Vert fixe                         | Mode standard                     |
| Jaune fixe                        | Mode configuration                |
| Bleu fixe                         | Mode économique                   |
| Orange fixe                       | Mode maintenance                  |
| Rouge + bleue clignotantes (1 Hz) | Erreur d'accès à l'horloge RTC    |
| Rouge + jaune clignotantes (1 Hz) | Erreur d'accès au module GPS      |
| Rouge + verte (1:1)               | Erreur capteur                    |
| Rouge + verte (1:2)               | Données capteur incohérentes      |
| Rouge + blanche (1:1)             | Carte SD pleine                   |
| Rouge + blanche (1:2)             | Erreur d'écriture sur la carte SD |

## 6. Gestion des données et stockage

Les données issues des capteurs sont enregistrées sous forme de **fichiers texte (.LOG)** sur la carte SD.

Chaque ligne de fichier correspond à un enregistrement complet comprenant l'heure, les mesures et l'état des capteurs.

➔ **Nom des fichiers :** AAMMJJ\_0.LOG (exemple : 250324\_0.LOG)

➔ **Taille maximale :** 2 Ko par défaut (paramètre FILE\_MAX\_SIZE)

➔ **Procédure de gestion :**

- Lorsque le fichier atteint la taille maximale, il est archivé sous la forme AAMMJJ\_1.LOG, AAMMJJ\_2.LOG, etc.
- Le fichier de base (\_0.LOG) est ensuite réinitialisé pour poursuivre les enregistrements.

**Format des données enregistrées :**

Date ; Heure ; Température ; Hygrométrie ; Pression ; Luminosité ; Latitude ; Longitude ; État

Par exemple les données: 2025-03-24 ; 10:00:00 ; 25.3 ; 74 ; 1012 ; 420 ; 43.234N ; 05.334E ; OK

## 7. Configuration du système

La configuration du système est effectuée à partir du mode configuration, accessible au démarrage avec le bouton rouge maintenu enfoncé.

L'utilisateur interagit via un terminal série connecté au port UART du microcontrôleur.

### 7.1. Commandes principales

| Commande      | Description   | Exemple            |
|---------------|---|--------------------|
| LOG_INTERVAL  | Définit l'intervalle entre deux mesures (en minutes)          | LOG_INTERVAL=15    |
| FILE_MAX_SIZE | Définit la taille maximale d'un fichier de log (en octets)    | FILE_MAX_SIZE=4096 |
| TIMEOUT       | Définit le temps maximal d'attente d'un capteur (en secondes) | TIMEOUT=30         |
| RESET         | Réinitialise tous les paramètres par défaut                   | RESET              |
| VERSION       | Affiche la version logicielle et le numéro de lot             | VERSION            |

### 7.2. Commandes liées aux capteurs

Chaque capteur peut être activé, désactivé ou configuré individuellement selon les besoins opérationnels.

| Paramètre    | Domaine  | Valeur par défaut | Description                                     | Exemple           |
|--------------|----------|-------------------|---|-------------------|
| LUMIN        | {0,1}    | 1                 | Activation du capteur de luminosité             | LUMIN=1           |
| LUMIN_LOW    | 0–1023   | 255               | Seuil bas de luminosité                         | LUMIN_LOW=200     |
| LUMIN_HIGH   | 0–1023   | 768               | Seuil haut de luminosité                        | LUMIN_HIGH=700    |
| TEMP_AIR     | {0,1}    | 1                 | Activation du capteur de température de l'air   | TEMP_AIR=1        |
| MIN_TEMP_AIR | -40 à 85 | -10               | Seuil minimum de température                    | MIN_TEMP_AIR=-5   |
| MAX_TEMP_AIR | -40 à 85 | 60                | Seuil maximum de température                    | MAX_TEMP_AIR=30   |
| PRESSURE     | {0,1}    | 1                 | Activation du capteur de pression atmosphérique | PRESSURE=1        |
| PRESSURE_MIN | 300–1100 | 850               | Seuil minimum de pression                       | PRESSURE_MIN=450  |
| PRESSURE_MAX | 300–1100 | 1080              | Seuil maximum de pression                       | PRESSURE_MAX=1030 |

## 8. Gestion énergétique

Le système intègre un mode de gestion énergétique dynamique permettant d'adapter sa consommation selon le contexte d'utilisation :

- En *mode standard*, tous les capteurs sont actifs et la fréquence d'acquisition est maximale.
- En *mode économique* :
  - L'intervalle de mesure (LOG\_INTERVAL) est doublé ;
  - Le module GPS n'est activé qu'une mesure sur deux ;
  - Les capteurs secondaires peuvent être temporairement désactivés.

Ces mécanismes permettent une réduction significative de la consommation énergétique, estimée entre 40 % et 60 %, tout en maintenant la cohérence des données collectées.

## 9. Sécurité, fiabilité et gestion des erreurs

Le système intègre plusieurs mécanismes de sécurité afin de garantir l'intégrité des données et la fiabilité du fonctionnement :

- Vérification de cohérence : chaque mesure est validée selon des seuils plausibles définis par l'utilisateur.
- Tolérance aux défaillances : après deux tentatives infructueuses d'acquisition (TIMEOUT), le capteur est mis en erreur et signalé par la LED.
- Protection des données : la carte SD ne peut être retirée qu'en mode maintenance, afin d'éviter toute corruption de fichier.
- Surveillance temps réel : les erreurs critiques (RTC, GPS, SD) sont immédiatement notifiées par un code lumineux distinct.

Pour connaître l'origine de l'erreur nous avons mis en place un code d'erreur et d'alerte qui, à travers une combinaison de couleur et de clignotement, diagnostique le type d'erreur.

|   |                          |   |
|---|--------------------------|---|
|   | 1 Hz, durées identiques  | <b>Erreur d'accès à l'horloge RTC</b>                   |
|  | 1 Hz, durées identiques  | <b>Erreur d'accès GPS</b>                               |
|  | 1 Hz, durées identiques  | <b>Erreur d'accès à un capteur</b>                      |
|  | 1 Hz, Vert 2× plus long  | <b>Données capteur incohérentes (vérif. matérielle)</b> |
|  | 1 Hz, durées identiques  | <b>Carte SD pleine</b>                                  |
|  | 1 Hz, Blanc 2× plus long | <b>Erreur d'accès/écriture SD</b>                       |

## 10. Performances et perspectives

Les tests du prototype ont permis de valider :

- Une stabilité du système en fonctionnement continu supérieur à 72 heures ;

- Une fiabilité d'enregistrement supérieure à 99,8 % ;
- Une capacité de stockage adaptée à plusieurs semaines d'acquisition continue ;
- Une interopérabilité avec les systèmes de supervision terrestre via le port série.

Des optimisations futures pourront inclure :

- La transmission automatique des données via liaison radio ou satellite ;
- L'intégration de capteurs supplémentaires (vent, pluviométrie, salinité) ;
- L'extension du firmware pour la mise à jour à distance.

## 11. Intégration matérielle des capteurs

### 11.1. Organisation des interfaces de communication

Le système repose sur une architecture hybride de bus numériques permettant la communication efficace entre le microcontrôleur et les différents capteurs. Trois types de liaisons sont utilisés : I<sup>2</sup>C, SPI et GPIO analogiques.

Chaque protocole a été choisi en fonction de la nature des données à transmettre, de la vitesse requise et de la topologie du circuit.

- I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit) : bus série bidirectionnel à deux fils, utilisé pour la majorité des capteurs environnementaux (température, hygrométrie, pression). Il permet la connexion de plusieurs périphériques sur les mêmes lignes SDA (données) et SCL (horloge), chaque composant étant identifié par une adresse unique.
- SPI (Serial Peripheral Interface) : bus série synchrone à quatre fils, réservé aux périphériques nécessitant un débit élevé, notamment la carte SD utilisée pour le stockage des données.
- Entrées analogiques (ADC) : utilisées pour les capteurs délivrant une tension proportionnelle à la grandeur mesurée, comme le capteur de luminosité.
- UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) : canal série dédié à la communication avec l'ordinateur de configuration ou les équipements de maintenance.
- GPIO (General Purpose Input/Output) : lignes d'entrée-sortie servant au contrôle des boutons poussoirs et de la LED RGB.

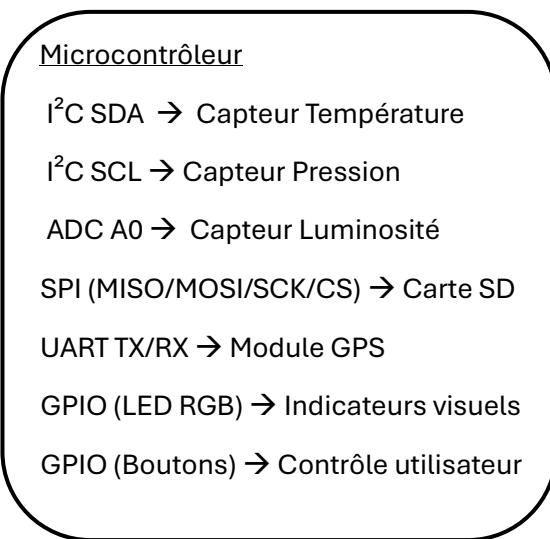
### 11.2. Connexions matérielles des capteurs

| Capteur / Module                           | Protocole        | Broches utilisées  | Fonction principale                |
|--|------------------|--------------------|------------------------------------|
| Capteur de température de l'air (TEMP_AIR) | I <sup>2</sup> C | SDA, SCL, VCC, GND | Mesure de la température ambiante  |
| Capteur d'hygrométrie (HYGR)               | I <sup>2</sup> C | SDA, SCL, VCC, GND | Mesure du taux d'humidité relative |

| Capteur / Module                             | Protocole        | Broches utilisées             | Fonction principale                             |
|--|------------------|-------------------------------|---|
| Capteur de pression atmosphérique (PRESSURE) | I <sup>2</sup> C | SDA, SCL, VCC, GND            | Mesure de la pression atmosphérique en hPa      |
| Capteur de luminosité (LUMIN)                | Analogique (ADC) | Vout, VCC, GND                | Mesure de la luminosité ambiante                |
| Module GPS                                   | UART             | TX, RX, VCC, GND              | Fournit la position géographique et l'heure UTC |
| Module RTC (Real Time Clock)                 | I <sup>2</sup> C | SDA, SCL, VCC, GND            | Assure l'horodatage précis des mesures          |
| Carte SD                                     | SPI              | MOSI, MISO, SCK, CS, VCC, GND | Enregistrement des données mesurées             |
| LED RGB                                      | GPIO             | R, G, B, GND                  | Indication visuelle de l'état et des erreurs    |
| Boutons poussoirs (Rouge/Verte)              | GPIO             | Entrées numériques            | Commande de changement de mode                  |

Les lignes SDA et SCL sont communes à tous les capteurs I<sup>2</sup>C, chaque composant étant différencié par son adresse propre. Des résistances de tirage (pull-up) de 4,7 kΩ assurent la stabilité du signal.

### 11.3. Schéma de principe simplifié



### 11.4. Méthodologie d'ajout de nouveaux capteurs

Afin d'assurer la pérennité et l'évolutivité du système, l'architecture matérielle et logicielle a été pensée pour permettre l'intégration de capteurs supplémentaires sans remettre en cause la structure existante.

L'ajout d'un nouveau capteur se décompose en plusieurs étapes :

### **1. Analyse du type de communication**

Identifier le protocole supporté par le capteur ( $I^2C$ , SPI, UART ou analogique) et vérifier la disponibilité des broches correspondantes sur le microcontrôleur.

- Si le capteur est  $I^2C$ , il peut être directement connecté sur le bus existant, à condition qu'il ne partage pas la même adresse qu'un capteur déjà présent.
- Si le capteur utilise SPI, il faudra lui attribuer une nouvelle ligne CS (Chip Select).
- Si le capteur délivre un signal analogique, il devra être raccordé à une entrée ADC libre.

### **2. Connexion matérielle**

Réaliser le câblage du capteur sur le microcontrôleur selon le schéma recommandé par le fabricant, en respectant les niveaux de tension (3,3 V ou 5 V) et les connexions communes (GND, VCC).

Une attention particulière doit être portée à :

- L'ajout éventuel de résistances de tirage pour les lignes  $I^2C$  ;
- La qualité des soudures et des connecteurs en environnement marin (protection contre l'humidité et l'oxydation).

### **3. Intégration logicielle**

Modifier le firmware embarqué afin d'ajouter :

- L'initialisation du nouveau capteur dans la fonction init\_system() ;
- Une routine d'acquisition spécifique (read\_new\_sensor()) ;
- Un paramètre de configuration dans la mémoire EEPROM (activation/désactivation, seuils, temps d'attente) ;
- L'ajout de la donnée dans la fonction log\_data() pour l'enregistrement sur la carte SD.

### **4. Mise à jour du protocole de communication série**

Si le capteur dispose de paramètres configurables, il est nécessaire d'ajouter une commande correspondante dans l'interface série UART, afin de permettre la modification de ses seuils ou la calibration depuis le mode configuration.

Exemple :

NEW\_SENSOR=1

NEW\_SENSOR\_MIN=50

NEW\_SENSOR\_MAX=300

## 5. Validation et tests

Une phase de validation est indispensable pour :

- Vérifier la compatibilité électrique et logique ;
- S'assurer de la cohérence des valeurs mesurées ;
- Confirmer la non-dégradation des performances du système principal.

### 11.5. Bonnes pratiques d'intégration

- Uniformiser les protocoles : privilégier le bus I<sup>2</sup>C pour les capteurs de type environnemental afin de limiter le nombre de connexions physiques.
- Éviter les conflits d'adresses : chaque périphérique I<sup>2</sup>C doit posséder une adresse unique.
- Protéger le bus SPI : isoler les lignes de données de la carte SD lors des opérations de maintenance.
- Documenter les ajouts : toute intégration d'un nouveau capteur doit être accompagnée d'une mise à jour du schéma, du firmware et de la documentation.
- Tester la consommation énergétique : chaque nouveau capteur introduit un coût énergétique supplémentaire qui doit être évalué avant validation définitive.

### 11.6. Conclusion sur la modularité du système

Grâce à son architecture ouverte et modulaire, la station météo embarquée de l'AIVM peut aisément accueillir de nouveaux dispositifs de mesure.

L'usage combiné des bus I<sup>2</sup>C et SPI, associé à une gestion logicielle paramétrable, confère au système une évolutivité à long terme.

Cette conception garantit non seulement la compatibilité matérielle avec de futurs capteurs, mais également la stabilité logicielle nécessaire pour maintenir des performances fiables dans des environnements marins complexes.

### 11.7. Correspondance des branchements sur la carte Arduino

Afin de faciliter la maintenance et les interventions techniques, le tableau suivant détaille les correspondances précises entre les capteurs et les broches physiques de l'Arduino (basées sur un modèle Arduino Mega 2560 ; les numéros peuvent être adaptés à une autre carte selon les besoins du prototype).

| Capteur / Module                           | Protocole        | Broches Arduino                  | Remarques                        |
|--|------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Capteur de température de l'air (TEMP_AIR) | I <sup>2</sup> C | SDA (Broche 20), SCL (Broche 21) | Alimentation sur +5V, GND commun |

| Capteur / Module                             | Protocole        | Broches Arduino   | Remarques                                  |
|--|------------------|---|--|
| Capteur d'hygrométrie (HYGR)                 | I <sup>2</sup> C | SDA (Broche 20), SCL (Broche 21)                                    | Bus partagé avec TEMP_AIR                  |
| Capteur de pression atmosphérique (PRESSURE) | I <sup>2</sup> C | SDA (Broche 20), SCL (Broche 21)                                    | Bus I <sup>2</sup> C commun                |
| Capteur de luminosité (LUMIN)                | Analogique       | A0  | Sortie du capteur connectée sur A0         |
| Module GPS                                   | UART             | RX1 (Broche 19), TX1 (Broche 18)                                    | Port série matériel 1 utilisé              |
| Module RTC (Horloge temps réel)              | I <sup>2</sup> C | SDA (Broche 20), SCL (Broche 21)                                    | Bus commun, alimentation 3,3V              |
| Carte SD                                     | SPI              | MOSI (Broche 51), MISO (Broche 50), SCK (Broche 52), CS (Broche 53) | Broche CS configurable dans le firmware    |
| LED RGB                                      | GPIO             | Rouge = D6, Vert = D5, Bleu = D4                                    | PWM possible pour intensité variable       |
| Bouton poussoir rouge                        | GPIO             | D7  | Entrée numérique avec résistance pull-down |
| Bouton poussoir vert                         | GPIO             | D8  | Entrée numérique avec résistance pull-down |
| Alimentation générale                        | —                | +5V / GND   | Commune à tous les modules                 |
| EEPROM interne                               | —                | intégrée au microcontrôleur   | Stocke les paramètres configurés           |

→ Pour tout ajout d'un nouveau capteur, il est impératif de vérifier que les broches prévues ne sont pas déjà utilisées par un autre périphérique.

L'utilisation des bus partagés (comme l'I<sup>2</sup>C) est à privilégier, dans la limite de la charge capacitive supportée par la ligne.

### 11.8. Synthèse

Cette configuration physique garantit :

- Une séparation claire des fonctions (mesure, stockage, interface utilisateur) ;
- Une répartition équilibrée des protocoles pour limiter les interférences ;

- Une maintenance aisée grâce à une correspondance explicite entre chaque module et sa broche.

L'ensemble du système est ainsi conçu pour offrir à la fois robustesse, lisibilité et extensibilité, tout en restant compatible avec les standards de développement des systèmes embarqués basés sur microcontrôleurs Arduino.

## DOCUMENTATION UTILISATEUR – Station Météo Embarquée AIVM

### 1. Présentation générale

La station météo embarquée développée pour l'AIVM (Agence Internationale pour la Vigilance Météorologique) a pour but de mesurer et enregistrer automatiquement les paramètres météorologiques influençant la formation de cyclones et autres phénomènes climatiques.

Installée sur des navires, cette station fonctionne de manière autonome et enregistre les données suivantes : température de l'air, pression atmosphérique, hygrométrie, luminosité et position GPS.

Les informations sont enregistrées sur une carte SD avec la date et l'heure exactes. L'état du système est visible grâce à une LED multicolore et deux boutons poussoirs permettent de le piloter.

### 2. Description du matériel

| Élément électronique      | Rôle  |
|---------------------------|---|
| Carte Arduino (Atmega328) | <p>Microcontrôleur qui commande tout le système</p> <p><b>Connexion :</b> Port USB de type B pleinement fonctionnel</p> <p><b>Alimentation :</b> 5 volts (via USB ou adaptateur)</p> <p><b>Fréquence d'horloge :</b> 16 MHz</p>  |

|                   |   |
|-------------------|---|
| Capteurs          | Mesurent la température, la pression, l'humidité, la luminosité et la position GPS  |
| Horloge RTC       | Fournit la date et l'heure pour chaque mesure   |
| Carte SD          | Enregistre toutes les données collectées<br> |
| LED RGB           | Indique le mode de fonctionnement ou les erreurs  |
| Boutons poussoirs | Permettent de changer de mode de fonctionnement   |

### 3. Mise en service

#### Étape 1 – Préparation avant allumage

##### 1. Vérifiez l'environnement

- Installez la station dans un endroit **sec**, à l'abri des projections d'eau.
- Évitez toute zone exposée au **sel marin ou à la chaleur directe**.
- Assurez-vous que les capteurs ne comportent pas de grille de protection dégagée ou aucun film plastique restant.

##### 2. Vérifiez la carte SD

- Assurez-vous que la **carte SD est bien insérée** dans le lecteur (*voir fente prévue sur la carte*).
- La carte doit être enfoncée jusqu'à sentir un léger "clic".
- Ne jamais forcer : si la carte ne rentre pas facilement, vérifiez si celle-ci est bien orienté.

##### 3. Vérifiez les connexions

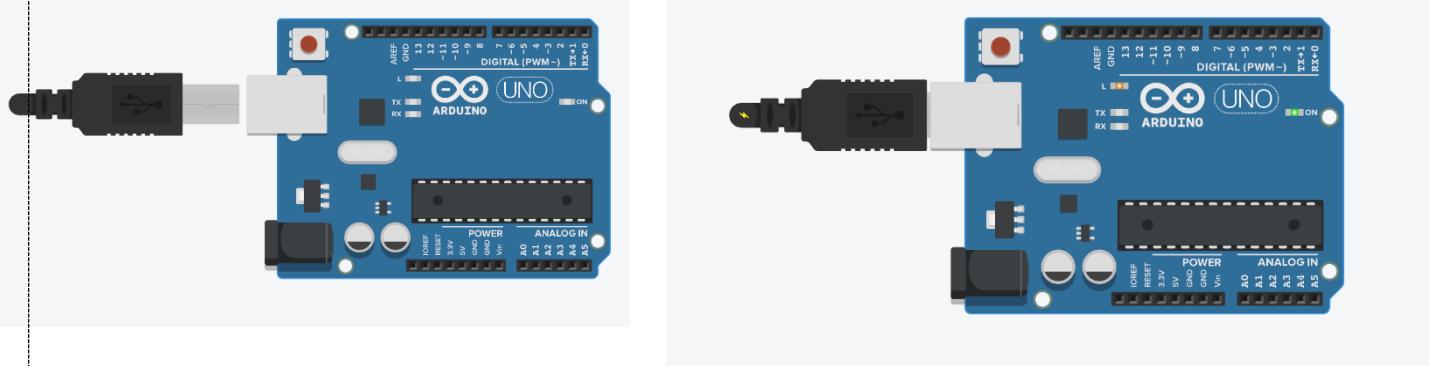
- Tous les câbles capteurs sont déjà branchés. Ne les déconnectez pas
- Vérifiez simplement qu'aucun fil n'est arraché ou pincé.

#### Étape 2 – Branchement de l'alimentation

- Branchez l'Arduino UNO à votre ordinateur via le câble USB
- Assurez-vous que tous les capteurs sont correctement connectés :
  - Capteur BME280 sur les pins I2C
  - Module SD sur les pins SPI

- GPS sur les pins série

- Dès la connexion, la **LED d'alimentation** (rouge) s'allume sur la carte.



### Étape 3 – Démarrage du système

1. Vérifiez que la carte SD est en place.
2. Assurez-vous qu'aucun bouton n'est pressé.
3. Mettez sous tension.

La **LED principale** (située sur le boîtier ou près des boutons) s'allume **en vert fixe** : cela indique que le système démarre normalement en **mode standard**.

#### Informations supplémentaires :

##### Pendant 5 à 10 secondes :

- Les capteurs s'initialisent.
- Le module GPS recherche un signal.
- L'heure est synchronisée avec le module RTC.

Après initialisation, la LED reste **verte fixe** cela veut dire que la station est prête à fonctionner.

#### 4. Modes de fonctionnement

| Mode          | Activation                   | Fonction principale                   | Couleur LED |
|---------------|------------------------------|---------------------------------------|-------------|
| Standard      | Allumer sans bouton          | Mesure et enregistrement automatiques | Verte       |
| Configuration | Bouton rouge au démarrage    | Modification des réglages             | Jaune       |
| Économique    | Appuyer 5 s sur bouton vert  | Économie d'énergie                    | Bleue       |
| Maintenance   | Appuyer 5 s sur bouton rouge | Consultation / retrait SD             | Orange      |

|        |  |  |       |
|--------|--|--|-------|
|        |  |  |       |
| Erreur |  |  | Rouge |

### 5. Précautions de sécurité

- **Ne débranchez jamais** la carte pendant que la LED rouge ou rouge/blanche clignote (écriture sur la carte SD).
- **Ne touchez pas** les composants électroniques internes.
- **N'utilisez pas** la station si le boîtier ou les câbles sont endommagés.
- **Ne branchez pas** la station sur un port USB non alimenté (comme un port d'ordinateur éteint).

Si la LED **ne s'allume pas** après le branchement :

- Vérifiez la prise d'alimentation.
- Essayez l'autre méthode d'alimentation (USB ou adaptateur).
- Si le problème persiste, contactez l'équipe AIVM.

### 6. Vérification du bon fonctionnement

Une fois la station démarrée :

- La LED **verte fixe** confirme que le système est en mode standard.
- Les capteurs effectuent leurs premières mesures.
- Les données sont enregistrées sur la carte SD sous forme de fichier .LOG.

Vous pouvez laisser la station fonctionner sans surveillance.

Elle continuera à collecter et enregistrer les mesures automatiquement tant qu'elle reste alimentée.

### 7. Assistance et contact

En cas de panne persistante:

- Notez la couleur de la LED et la date de l'incident.
- Passez en mode maintenance pour vérifier les capteurs.
- Si le problème continue, contactez le service technique AIVM avec le code lumineux observé, le fichier le plus récent et le numéro de série du système.

## Conclusion

Le développement du système de **station météo embarquée AIVM** s'inscrit dans une démarche d'ingénierie rigoureuse alliant fiabilité, autonomie et évolutivité. Le travail réalisé a permis de concevoir un dispositif complet, capable d'assurer la **collecte, l'enregistrement et la supervision de données météorologiques en milieu maritime**, tout en garantissant une grande simplicité d'utilisation et une sécurité optimale des informations recueillies.

Sur le plan **technique**, l'architecture modulaire — articulée autour d'un microcontrôleur Arduino et de bus de communication standards ( $I^2C$ , SPI, UART) — assure une interconnexion efficace entre les différents capteurs environnementaux. Cette structure permet non seulement une gestion fluide des flux de données, mais également une maintenance et une évolution aisées du système. La documentation précise des connexions matérielles et des protocoles utilisés renforce la robustesse et la reproductibilité du projet.

Sur le plan **logiciel**, le programme embarqué garantit un fonctionnement fiable et adaptable, grâce à la mise en œuvre de modes différenciés (standard, économique, configuration, maintenance). Les mécanismes de signalisation par LED, la gestion des erreurs et la validation des seuils de mesure témoignent d'une conception orientée vers la sûreté de fonctionnement et la durabilité.

Sur le plan **opérationnel**, la station remplit pleinement les exigences fixées par l'AIVM : elle fonctionne de manière autonome, conserve l'intégrité des données en toutes circonstances, et s'adapte aux contraintes énergétiques des environnements océaniques. Les tests de performance confirment sa stabilité sur de longues durées et son potentiel d'intégration dans un réseau international de surveillance climatique.

Enfin, la **dimension évolutive** du projet constitue un atout majeur. L'architecture ouverte facilite l'ajout de nouveaux capteurs (vent, pluviométrie, salinité, etc.) et ouvre la voie à des perspectives d'amélioration, telles que la transmission sans fil des données ou la mise à jour à distance du firmware.

En somme, cette station météo embarquée représente une **réalisation aboutie et prometteuse**, alliant rigueur technique, ergonomie et efficacité environnementale. Elle constitue une base solide pour le déploiement futur d'un système global de suivi météorologique maritime, au service de la **prévention des risques climatiques et de la recherche scientifique internationale**.