

moniteur de la qualité de l'air, portable et autonome, pour particules de $2,5 \mu\text{m}$

Gardez un œil sur votre santé

Laurent Labbe (France)



En cette période de pandémie du COVID-19, on en oublierait presque qu'il existe d'autres raisons de porter un masque. Et qu'il y a des endroits où cela est recommandé, voir nécessaire, depuis bien plus longtemps. Dans les grandes villes d'Asie, les sports en plein air sont souvent problématiques en raison de la pollution de l'air, en particulier pour les particules de $2,5 \mu\text{m}$, également appelées PM2.5. Des concentrations élevées de ces particules dans l'air ambiant peuvent être nocives et même dangereuses pour votre santé. Le moniteur de PM2.5 présenté dans cet article peut être utilisé pour surveiller la qualité de l'air.

J'ai déjà réalisé un moniteur de PM2.5, rechargeable avec un panneau solaire, mais il n'était pas adapté à une utilisation en intérieur. J'ai également conçu une version basée sur un ESP32, où j'ai testé différents capteurs et dont les données étaient envoyées par WiFi à Thingspeak, mais il n'était pas portable. L'idée principale de ce projet est de concevoir un appareil le plus compact possible, alimenté par batterie, avec une autonomie de plusieurs semaines et pouvant afficher en permanence le taux de PM2.5 présent dans l'air. Ce moniteur portable peut être placé à l'extérieur, par exemple avec une ventouse collée sur une fenêtre afin que la mesure soit visible de l'intérieur. Évidemment, vous pouvez parfaitement l'utiliser en intérieur.

Détails de la conception

Le choix du capteur de particules est très important. Dans un précédent projet, j'en ai testé plusieurs types, comme une version d'extérieur : le capteur Sharp GP2Y10. Cependant, si nous souhaitons une conception compacte, seul le capteur Plantower PMS7003 [10] est envisageable. Il dispose d'une interface série pour l'envoi des données mesurées. Lorsque vous commanderez ce capteur, assurez-vous d'acheter également le connecteur correspondant ! Comme ce capteur a besoin de 100 mA sous 5 V (principalement en raison de son mini-ventilateur interne), il ne peut pas fonctionner en continu, les batteries s'épuiseraient en un rien de temps. La tension d'alimentation

est fournie par une batterie au lithium, et il faut un convertisseur CC/CC (3,8 V vers 5 V) possédant une réelle mise hors tension. L'afficheur sélectionné est un LCD alphanumérique monochrome de 2x8. Il consomme moins de 1 mA en affichage permanent. Des afficheurs couleur ou OLED ne conviendraient pas en raison de leur forte consommation électrique, ce qui affecterait gravement l'autonomie du projet. Pour une lecture rapide de la mesure des PM2.5, un bargraphe à LED est ajouté. Les six niveaux présents dans le **tableau 1** sont affichés au moyen de cinq LED avec le niveau le plus élevé signalé par les LED rouge et bleue allumées simultanément (indice bordeaux dans le tableau). Toutes les LED sont de type basse consom-

Air Quality Index (AQI Values)	Levels of Health Concern	Colors
0 to 50	Good	Green
51 to 100	Moderate	Yellow
101 to 150	Unhealthy for Sensitive Groups	Orange
151 to 200	Unhealthy	Red
201 to 300	Very Unhealthy	Purple
301 to 500	Hazardous	Maroon

Tableau 1. Explication des niveaux IQA.

mation, par ex. Série Kingbright WP71xx qui ont un courant direct de 2 mA. Une version faible consommation et forte luminosité peut être envisagée si l'équipement est placé en extérieur.

Un affichage de la température et de l'humidité (optionnel) est prévu à l'aide d'un capteur I²C SHT20/SHT21. Le microprogramme prend également en charge le capteur de température 1-Wire DS18B20, mais il n'a pas été testé dans ce projet.

Le cœur du projet est un PIC18F2520, accompagné d'un MAX931 pour surveiller la tension de la batterie et d'un LTC4054 pour la recharger. La consommation globale du détecteur dépend principalement de l'intervalle entre les mesures. Selon la spécification du PMS7003, il doit être mis sous tension pendant au moins 30 s avant que la première mesure fiable puisse être effectuée. Par défaut, l'intervalle est réglé sur 20 mn, mais il pourra être modifié dans le menu. Avec cet intervalle et une batterie de 1000 mAh, ce détecteur peut fonctionner pendant deux semaines sans le recharger. N'importe quelle batterie au lithium, LiPo ou de forme prismatique convient, cependant ses dimensions dépendent du boîtier. Pour ce projet, et ayant déjà conçu un boîtier compact, j'ai fait en sorte que la batterie soit la plus grande possible (en volume) dans l'espace restant. J'ai trouvé une batterie de 1100 mAh qui s'adapte parfaitement.

Caractéristiques de l'affichage de PM2.5

La mesure du niveau de particules de 2,5 µm est effectuée à intervalles réguliers. Celle-ci peut être ajustée dans le menu entre 10 mn et 60 mn, 20 mn étant un bon compromis entre précision de mesure et consommation électrique. Toutes les heures, le programme calcule la moyenne des dernières mesures conservées dans un tableau. Il existe plusieurs façons de calculer le niveau de qualité de l'air

(associé aux PM2.5). Dans ce projet, deux méthodes sont implémentées :

- IQA : moyenne arithmétique sur 24 h
- IQA nouvelle version : moyenne glissante pondérée sur les 12 h dernières heures (appelée NQI). La mesure la plus récente a un poids plus important que celle faite il y a 11 h.

Par défaut, la méthode NQI est employée. Les LED du bargraphe peuvent afficher :

- La mesure la plus récente
- La moyenne sur une heure
- L'IQA ou le NIQ

Les LED peuvent être désactivées pendant la nuit pour économiser les batteries. Une photo-résistance mesure la luminosité ambiante et permute le mode (jour/nuit).

Une option intéressante est l'affichage instantané du niveau de PM2.5 en temps réel. Le capteur est actif en permanence et la valeur affichée est actualisée toutes les secondes. Cependant, cette option consomme beaucoup d'énergie et décharge la batterie en peu de temps.

Les autres valeurs pouvant être affichées sont :

- La température et l'humidité
- La tension de la batterie sur 3 chiffres (par exemple « 384 » signifie 3,84 V)
- Lorsque la tension de la batterie est faible, les LED clignotent, indiquant qu'il faut recharger l'appareil

Un port est prévu pour connecter, en option, une cellule photovoltaïque de 5 V pour permettre le rechargement lors d'une utilisation en extérieur.

Les paramètres du menu sont enregistrés dans l'EEPROM du microcontrôleur. **Toutes les autres valeurs ainsi que les tableaux et les variables sont réinitialisés lorsque l'appareil est mis hors tension ou redémarré.**

Calcul de l'indice de qualité de l'air

Il existe de nombreuses méthodes pour calculer l'indice de qualité de l'air. Dans ce projet, deux versions sont implémentées. La première est la moyenne sur les dernières 24 h en utilisant la méthode de calcul des États-Unis (voir [1] pour des détails sur cette méthode). L'inconvénient de cette méthode est qu'elle utilise une moyenne glissante sur 24 h. Par conséquent, la valeur affichée est influencée par des mesures relativement anciennes. Pour cette raison, la seconde méthode de calcul (**NowCast**) repose sur une moyenne pondérée. La mesure effectuée lors de la dernière heure a un poids plus fort dans le calcul final que celle d'il y a 11 h. C'est aussi une moyenne glissante, mais sur 12 h. Baptisée NQI (**New Quality Index**), elle garde les mêmes limites que la première méthode. Vous trouverez en [2] une explication détaillée de cette méthode. Mais pour faire simple, la valeur mesurée lors de l'heure précédente (H-1) possède un poids de 50%, celle de H-2 a un poids de 25%, celle de H-3 a un poids de 2,5%, etc. L'algorithme est discuté en [3].

Le matériel

Le schéma de la **figure 1** montre les entrailles de ce moniteur de la qualité de l'air. Le convertisseur élévateur CC/CC du capteur PMS7003 est un LT3525ESC6-5 (U6). Il s'agit d'un convertisseur élévateur dit « à coupure réelle » (**true shutdown** en anglais). La plupart des convertisseurs élévateurs CC/CC ont une fonction d'arrêt qui stoppera simplement la commutation du transistor dans le circuit. Mais la tension de sortie suivra toujours l'entrée à travers la bobine et le circuit consommera toujours de l'énergie. Les circuits à coupure réelle arrêtent bel et bien le convertisseur et aucun courant ne peut circuler vers la sortie. Le seul vrai problème avec ce circuit intégré est de le souder. Il est vraiment petit, de la pâte à braser et une station à air chaud sont recommandées...

Le régulateur LP2980 3,3 V (U7) est commandé par U1, un comparateur à hystérésis MAX931. Il éteint le régulateur si la tension de la batterie descend en dessous de 3,2 V et ne peut être réactivé que si celle-ci dépasse 3,8 V. Cette fonction, pas forcément utile en mode normal, est nécessaire lors de l'utilisation d'un panneau solaire pour la recharge. Le MAX931 stoppera également le convertisseur CC/CC via la diode D5 pour éviter les démarrages involontaires lorsque la batterie est faible. La liaison série est partagée entre le connecteur externe J8 (pour le monitoring et

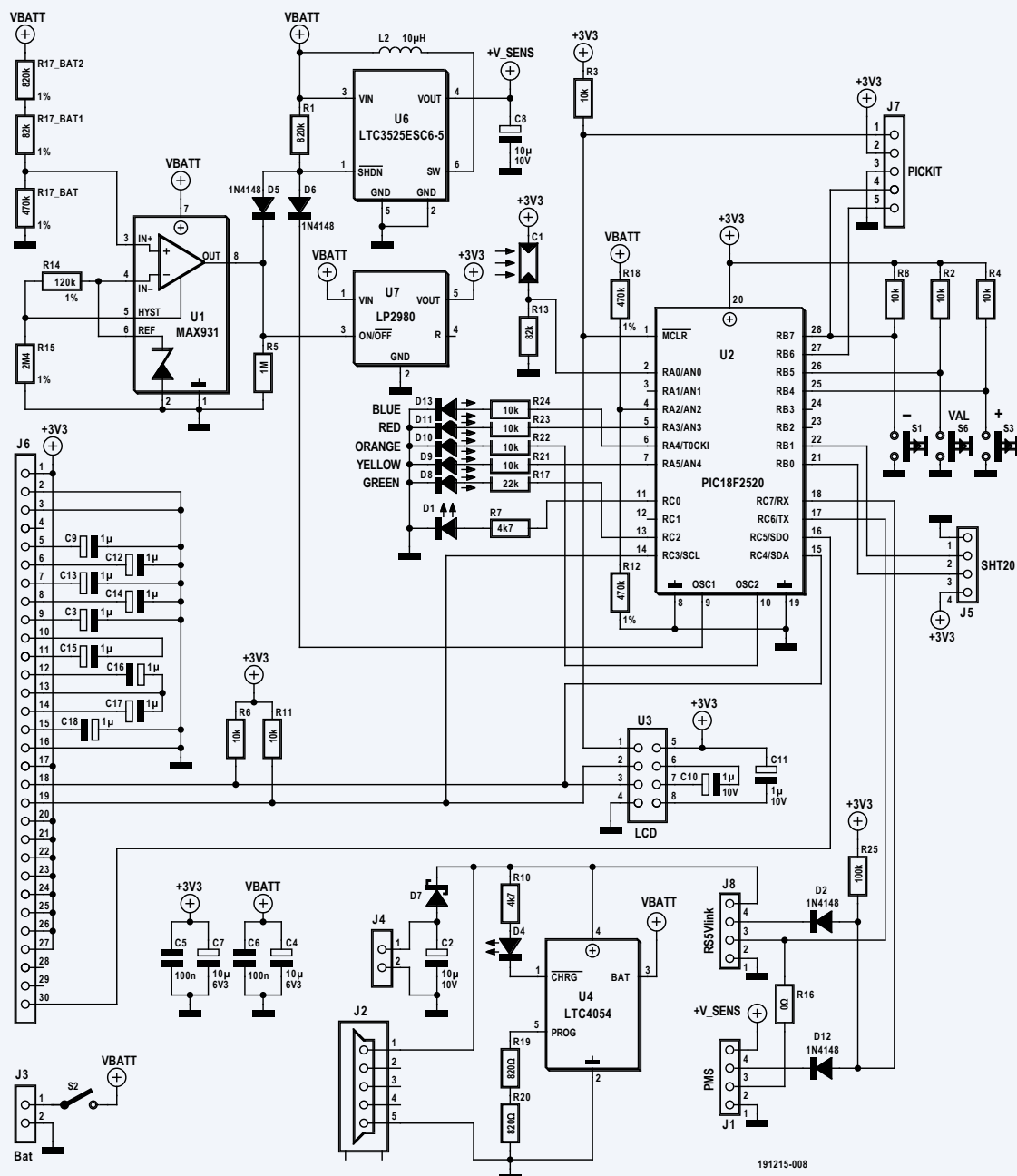


Figure 1. Schéma du moniteur de PM2.5.

le téléchargement) et le PMS7003 (connecté à J1). Le signal TX du microcontrôleur est connecté aux deux connecteurs. Le signal RX est, quant à lui, connecté via une fonction OU logique créée avec les diodes D2 et D12. Comme le microprogramme n'envoie pas de commandes au PMS dans sa version actuelle, la résistance R16 (0 Ω) n'est pas montée. Pour le capteur SHT20/21, la connexion I²C se fait par émulation logicielle, via RB0 et RB1, sans utiliser l'I²C interne du PIC (réservé à l'affichage). L'afficheur est un LCD de Eastrising, de type COG (*Chip-on-Glass*) à 8x2 caractères, piloté par I²C [7]. Il est connecté via U3. Le chargeur de batterie au lithium est un

LTC4054 (ou un EUP8054 équivalent, U4). Il peut être alimenté soit par USB (J2) soit avec un panneau solaire externe connecté à J4. Le courant est limité à 400 mA par les deux résistances R19 et R20. La LED D4 indique que la batterie est en charge, elle est placée à proximité du connecteur USB. Le connecteur J4 sert à connecter un panneau solaire de 5 V, qui rechargera la batterie via la diode Schottky D7. Les cinq LED du bargraphe (D8 à D11 et D13) sont commandées par le PIC. La résistance de limitation de courant de chaque LED dépend du type de LED utilisé (faible puissance ou non) et de la tension directe de chaque LED

de couleur. La LED D1 (rouge) s'allume lorsque le convertisseur CC/CC est actif et donc lorsque le capteur de particules fonctionne. Concernant l'afficheur, les condensateurs C10 et C11 peuvent être compris entre 1 μ F et 2,2 μ F, pour une tension de 10 V. Le rétroéclairage de l'afficheur n'est pas utilisé (et peut être retiré avant le montage). Il est attaché au circuit imprimé avec du ruban adhésif double face. Il est recommandé d'acheter l'afficheur avec son connecteur spécifique. La luminosité permettant le mode jour/nuit est détectée par une photorésistance (C1) placée sur le panneau avant. Elle est connectée à l'entrée analogique AN0 du microcontrôleur.

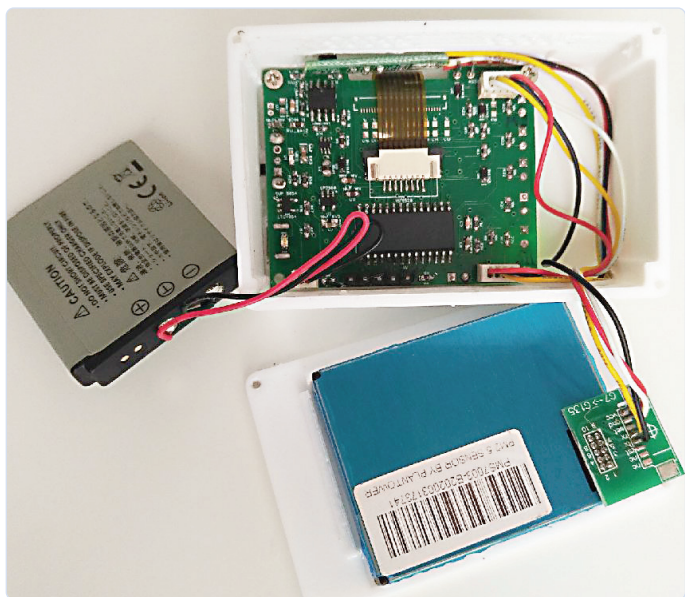


Figure 2. Le circuit imprimé, la batterie et le capteur PMS7003 dans le boîtier ouvert.



Figure 3. Le moniteur de PM2.5 dans son boîtier imprimé en 3D, vue de face.

Assemblage du circuit imprimé

Le schéma et le circuit imprimé ont été conçus avec le logiciel de CAO DipTrace de Novarm, les fichiers de conception sont disponibles en [9]. Tous les composants à l'exception des LED sont des CMS. La partie la plus difficile à souder est le convertisseur CC/CC, j'ai utilisé de la pâte à braser et une station à air chaud pour le faire. Compte tenu de la compacité du boîtier, il est difficile de monter des connecteurs standards pour les deux capteurs. Il est donc préférable de souder les fils directement sur le circuit. Seuls la batterie et l'afficheur utilisent des connecteurs.

Il existe deux solutions pour programmer le microcontrôleur : connecter un PicKit3 à J7 ou via le connecteur série partagé avec le capteur PMS7003. Dans ce cas, le μC doit être préprogrammé avec un chargeur d'amorçage (**bootloader** en anglais) avant montage et le PMS7003 doit être déconnecté chaque fois que le μC est reprogrammé. Personnellement, j'utilise toujours le chargeur d'amorçage appelé Tiny bootloader, disponible en [6]. Il faut que la version flashée sur le PIC ait la bonne valeur pour le chien de garde (**watchdog** en anglais) (ici 256 ms) et donc la source doit être recompilée avec celle-ci. Les fichiers ASM et HEX de ce chargeur d'amorçage pour le PIC18F2520 font également partie des téléchargements de la page Elektor Labs du projet [9].

Le microprogramme

Le microprogramme est écrit en C, avec une ancienne version du compilateur MikroC. Il

peut être porté sur la nouvelle version, MikroC Pro, mais je n'ai pas essayé. Les fichiers sources et HEX sont disponibles en [9]. Le microprogramme est assez simple :

- Initialisation
- Une boucle sans fin scrute l'état des boutons-poussoirs
- Affichage des différents écrans et du niveau des LED (en fonction de la lecture de la luminosité pour la commutation jour/nuit)
- Toutes les xx minutes, le convertisseur 5 V CC/CC du capteur de particules est activé. 30 s plus tard, la mesure des PM2.5 est lue et le convertisseur CC/CC est désactivé.
- Toutes les heures, la valeur moyenne est calculée
- Enregistrement de cette valeur dans un tableau à 24 positions (pour 24 h)
- Calcul de l'IQA (moyenne glissante sur 24 h) ou NQI (moyenne pondérée, glissante sur 12 h)

La fonction `calculaation_aqi()` calcule la valeur de l'indice de qualité de l'air, suivant le principe de la moyenne simple sur 24 h. Un tableau contient les 24 dernières valeurs et leur simple moyenne est calculée. La fonction `calculaation_nqi()` calcule la valeur pondérée de l'indice de qualité de l'air. La formule est expliquée en [3].

La conversion de ces valeurs en indices (0-500) est effectuée par la fonction `conversion_aqi()`, selon la formule indiquée dans

le document [1] pour les USA.

La boucle principale du microprogramme se termine par une instruction « sleep ». Le processeur se réveille lorsque le chien de garde est de nouveau déclenché, l'intervalle de surveillance doit être réglé sur 256 ms (dans le cas du PIC18F2520, cela doit être fait lors de la programmation du μC). Cet intervalle est suffisamment court pour ne pas manquer les pressions sur les touches. Un temps plus long serait préférable en ce qui concerne la consommation d'énergie, mais il serait alors possible de manquer une pression sur les boutons. Le microprogramme fonctionne également sans capteur de température/humidité câblé, mais bien sûr, l'afficheur affichera alors des valeurs invalides pour la température et l'humidité.

Le boîtier

Le boîtier a été conçu dans ThinkerCad et imprimé sur une imprimante 3D. C'est assez simple, avec des ouvertures pour le capteur SHT sur le dessus ainsi que pour le capteur PMS7003, une pour l'entrée d'air, une pour la sortie. La version la plus récente du boîtier est téléchargeable en [4]. Un support pour cellule solaire est également proposé. Il est fixé au boîtier à l'aide de petits crochets [5].

Cet appareil compact et alimenté par batterie fonctionne parfaitement, mais il est toujours possible d'améliorer ce montage. Par exemple, sur le schéma et le circuit imprimé, on voit le connecteur (J6) prévu pour monter un LCD graphique de faible puissance, à

UTILISATION

Une pression longue sur le bouton **VAL (S6)** permet d'entrer dans le menu de configuration et autorise l'utilisateur à :

- Changer l'intervalle de mesure (10 à 60 mn) avec les touches + et -, valider en appuyant sur la touche VAL.
- Activer le bargraphe pendant la nuit (oui/non).
- Sélectionner la valeur indiquée par les LED (dernière mesure, IQA/NQI, moyenne de la dernière heure).
- Sélectionner l'indice à afficher (IQA/NQI).

Appuyer sur le bouton **VAL** fait défiler les différents écrans. Le caractère sur l'afficheur LCD avant la valeur indiquera la nature de la donnée affichée :

L : *Last*, dernière valeur mesurée
H : *Hour*, valeur moyenne de la dernière heure
Q : *Quality*, indice de qualité de l'air, IQA ou NQI (selon le réglage choisi)
T : température en degrés centigrades
H : humidité (en %)
I : *Instant*, l'affichage est actualisé toutes les secondes

Le bargraphe affichera la valeur spécifiée dans le menu, sauf pour la valeur instantanée. Dans ce cas, le bargraphe montre l'indice de la dernière valeur reçue du capteur, qui est actualisé toutes les secondes.

L'écran de valeur instantanée contient sur la deuxième ligne la valeur du nombre de particules renvoyée par le capteur, puis la valeur calculée de l'indice de qualité de l'air précédé de la lettre Q.

Un écran affiche également les valeurs minimale et maximale de l'indice au cours des dernières 24 heures.

128 × 64 pixels [8], mais je n'ai pas testé cette option et elle n'est pas prise en charge dans la version actuelle du microprogramme. Vous pouvez omettre J6 et les condensateurs adjacents sur le schéma.

Malheureusement, la pollution de l'air reste un problème d'avenir, pas seulement dans les grandes villes d'Extrême-Orient. Il est bon d'avoir un moniteur de PM2.5 à portée de main pour surveiller la qualité de l'air, mais le plus inquiétant c'est d'en avoir besoin. 🚩

191215-04

Contributeurs

Idée, conception, rédaction et illustrations :

Laurent Labbe

Schéma : **Patrick Wielders**

Rédaction : **Luc Lemmens, CJ Abate**

Maquette : **Giel Dols**

Traduction : **Nicolas Bishop**

Des questions, des commentaires ?

Vous avez des questions ou des commentaires sur cet article. Envoyez un courrier électronique à l'auteur (laurent.elektor@gmail.com) ou contactez Elektor (redaction@elektor.fr).



PRODUITS CONNEXES

➤ **Kit Velleman Earth Listener**
www.elektor.fr/velleman-earth-listener-kit



LIENS

- [1] **Indice de qualité de l'air** : https://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_de_qualit%C3%A9_de_l%27air
- [2] **Calcul de l'indice de qualité de l'air (Nowcast)** : [https://en.wikipedia.org/wiki/NowCast_\(air_quality_index\)](https://en.wikipedia.org/wiki/NowCast_(air_quality_index))
- [3] **Formule de calcul du NQI** : www.epa.gov/airnow/faq/Nowcast-formula.pptx
- [4] **Boîtier** : www.tinkercad.com/things/gznm3a4WifP-new-boitier-dust-11
- [5] **Support de panneau solaire** : www.tinkercad.com/things/b3mohl2Dzla-copy-of-copy-of-boitier-dust-6
- [6] **Chargeur d'amorçage pour PIC** : www.etc.ugal.ro/cchiculita/software/picbootloader.htm
- [7] **Afficheur alphanumérique** : www.buydisplay.com/character-display/character-display-panel?interface=461&resolution=135
- [8] **Afficheur graphique** : www.buydisplay.com/1-4-inch-graphic-128x64-lcd-module-serial-spi-st7565-black-on-white
- [9] **La page Elektor Labs de ce projet** : www.elektormagazine.fr/labs/portable-display-pm25-1-1
- [10] **Fiche technique du PMS7003** : www.pdf-archive.com/2017/04/12/plantower-pms-7003-sensor-data-sheet/plantower-pms-7003-sensor-data-sheet.pdf