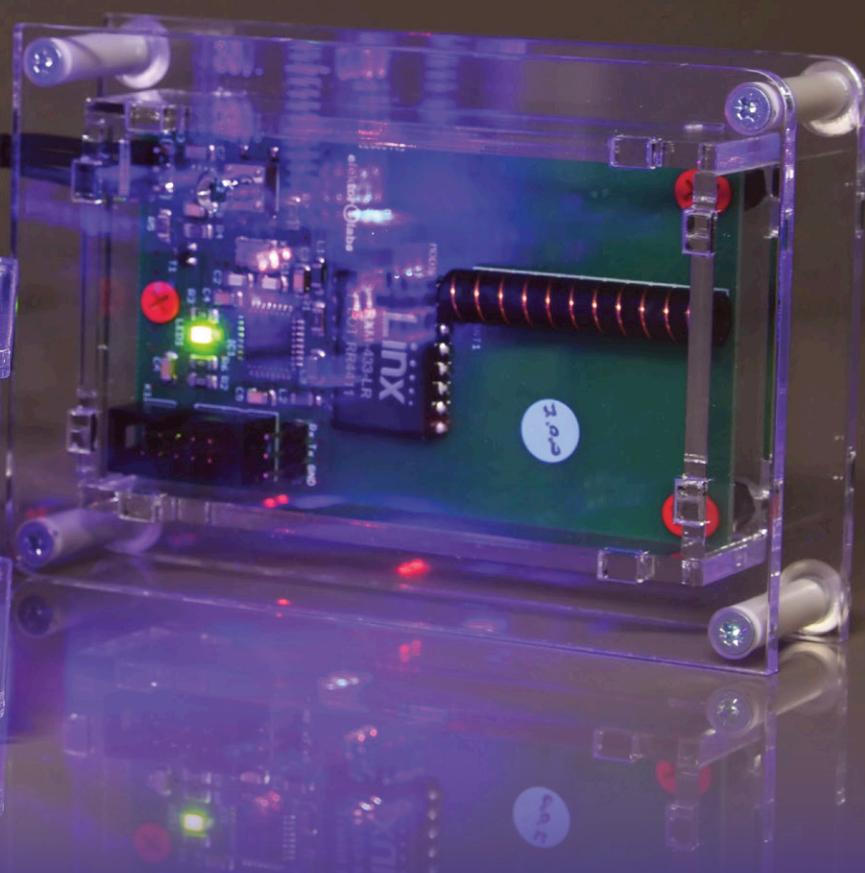


# capteur de température sans fil pour le thermomètre à bargraphe Nixie

Solution polyvalente avec astuce de conception



Ilse Joostens (Belgique)

Après avoir lu l'article *thermomètre à bargraphe Nixie* d'Elektor [1], un lecteur du Midwest américain nous a gentiment fait remarquer que les températures dans sa région dépassent facilement 85 °F (29,5 °C) pendant plus de six mois de l'année. Dans ces circonstances, l'échelle de 50 à 85 °F (10 à 30 °C) de notre thermomètre est inutile la moitié du temps. C'est beaucoup. En voici donc une version remaniée qui couvre 15 à 105 °F (-10 à +40 °C). Au passage, nous avons transformé ce thermomètre en appareil sans fil. C'est parti.

## INFOS SUR LE PROJET

Au départ, nous nous attendions à une lecture plutôt difficile de la température en raison de l'imprécision de l'échelle du tube bargraphe IN-9. En pratique, cette crainte n'a pas été confirmée, la lecture est acceptable. Une telle échelle sur le thermomètre à bargraphe Nixie [1] est utile également pour afficher la température extérieure, du moins si vous vivez dans une région au climat plus tempéré que celui de notre correspondant américain. L'idée nous est venue de prévoir une connexion sans fil du capteur de température.

### Émission & réception sans fil

Il existe de nombreux types de modules sans fil, entre quelques € l'unité à plusieurs dizaines, pour une paire composée d'un récepteur (RX) et d'un émetteur (TX). Par souci de simplicité et afin d'atteindre une portée raisonnable entre émetteur et récepteur, nous avons opté pour des modules à 433 MHz, homologués et sans licence.

Pour maintenir aussi bas que possible le prix du produit fini, nous avons d'abord testé les célèbres modules chinois FS1000A et MX-RM-5V, en commençant par trois paires achetées sur eBay. Puis nous avons fabriqué des prototypes de circuits imprimés pour les tester. Les modules fonctionnent, mais leur portée est décevante. Les principaux problèmes sont :

- l'émetteur exige 9 à 12 V de tension pour fournir suffisamment de puissance à l'antenne ;
- le récepteur est extrêmement sensible au bruit sur le rail d'alimentation.

Nous avons ensuite examiné d'autres modules (chinois) et constaté que la plupart, utilisant une simple modulation ASK ou OOK (*on-off keying / amplitude-shift keying*), provenaient de fabricants obscurs sans aucune garantie quant à leur disponibilité future. Une autre option consistait à utiliser des modules émetteurs-récepteurs avec interface SPI, mais il aurait fallu dans ce cas réécrire le micro-programme alors qu'il était presque terminé à ce moment-là.

Suit une autre mésaventure avec quelques modules FM 433 MHz, qui ont bien fonctionné. Malheureusement, **bien après l'acceptation de la commande et la livraison**, nous nous sommes aperçus (mieux vaut tard que jamais) que le fabricant en déconseillait l'utilisation pour de nouveaux projets. Finalement c'est la paire TXM-433-LR / RXM-433-LR de *Linx Technologies* qui a été retenue. Pas les moins chers, mais ils sont facilement disponibles en grandes quantités. Et vous économiserez de l'argent sur les piles, car l'émetteur en parti-

### Mots-clés

433 MHz, Linx, LPR, 1-Wire, Manchester, Nixie, capteurs

### Niveau

débutant – connaisseur – expert

### Durée

1,5 h environ

### Outils

outils de laboratoire, fer à souder

### Coût

75 € environ

## SPÉCIFICATIONS (résumé)

- Alimentation du récepteur : 3,3 à 5 V
- Alimentation de l'émetteur : 3 V (pile CR2450)
- Fréquence radio sans licence : 433,92 MHz (USA/CAN : 315 MHz)
- Intervalle de TX-on : environ 2 mn, réglable
- Antenne demi-onde hélicoïdale imprimée
- Capteur de température : DS2438Z
- Plage de température: -20 °C à +70 °C (précision : ±2 °C)
- Modules RX-TX Linx Technologies OOK/ASK
- RX émule le capteur DS18B20 1-Wire mais sous 2,4 V
- Cartes RX et TX préassemblés

culier est frugal. Les modules RF de Linx sont également disponibles en versions 315 MHz et 418 MHz, ce qui permet de les utiliser aux États-Unis, au Canada et dans d'autres pays où ces bandes ont une attribution ISM (industrielle/scientifique/médicale).

le circuit intégré de commande de batterie 1-Wire de type DS2438Z+ avec son capteur de température intégré et sa tension d'alimentation jusqu'à 2,4 V.

À première vue, avec une erreur maximale de ±2 °C, la mesure du DS2438Z+ semble moins



Astuce : DS2438Z+ =  
DS18B20 sous 2,4 V !



### Émetteur - matériel

Au cœur du schéma de l'émetteur (**fig. 1**) se trouve un µC ATMEGA328P-AU cadencé à 8 MHz par un oscillateur à quartz. Oui, c'est le µC des cartes Arduino Uno et Nano.

Nous pensions à un capteur de température 1-Wire de type DS18B20, mais ce n'était pas le bon candidat pour un appareil alimenté par une pile de 3 V, car selon sa fiche technique [2], la tension d'alimentation minimale est ... 3 V. Il existe bien d'autres capteurs de température qui fonctionnent bien avec une tension inférieure à 3 V, mais nous avons préféré un modèle 1-Wire doté d'un numéro de série unique de 64 bits, utilisé comme code d'identification de l'émetteur, ce qui permet de coupler le récepteur à un émetteur spécifique. Puis nous avons choisi

précise que celle du DS18B20. En pratique cependant, ses mesures sont acceptables. Le module d'émission RF est du type TXM-433-LR de Linx Technologies [3], déjà mentionné. Il est constitué d'un VCO verrouillé par un synthétiseur de fréquence dont la référence est un quartz de précision. La sortie du VCO est amplifiée et tamponnée par un amplificateur de puissance interne capable de fournir +10 dBm, soit 10 mW dans une charge de 50 Ω. À pleine puissance avec un rapport cyclique d'émission de 50 %, la consommation est d'environ 5 mA, ce qui est faible par rapport à des modules RF similaires. Sauf l'antenne, il n'y a aucun composant RF externe. Nous avons utilisé une antenne demi-onde hélicoïdale sur circuit imprimé, montée perpendiculairement au plan de

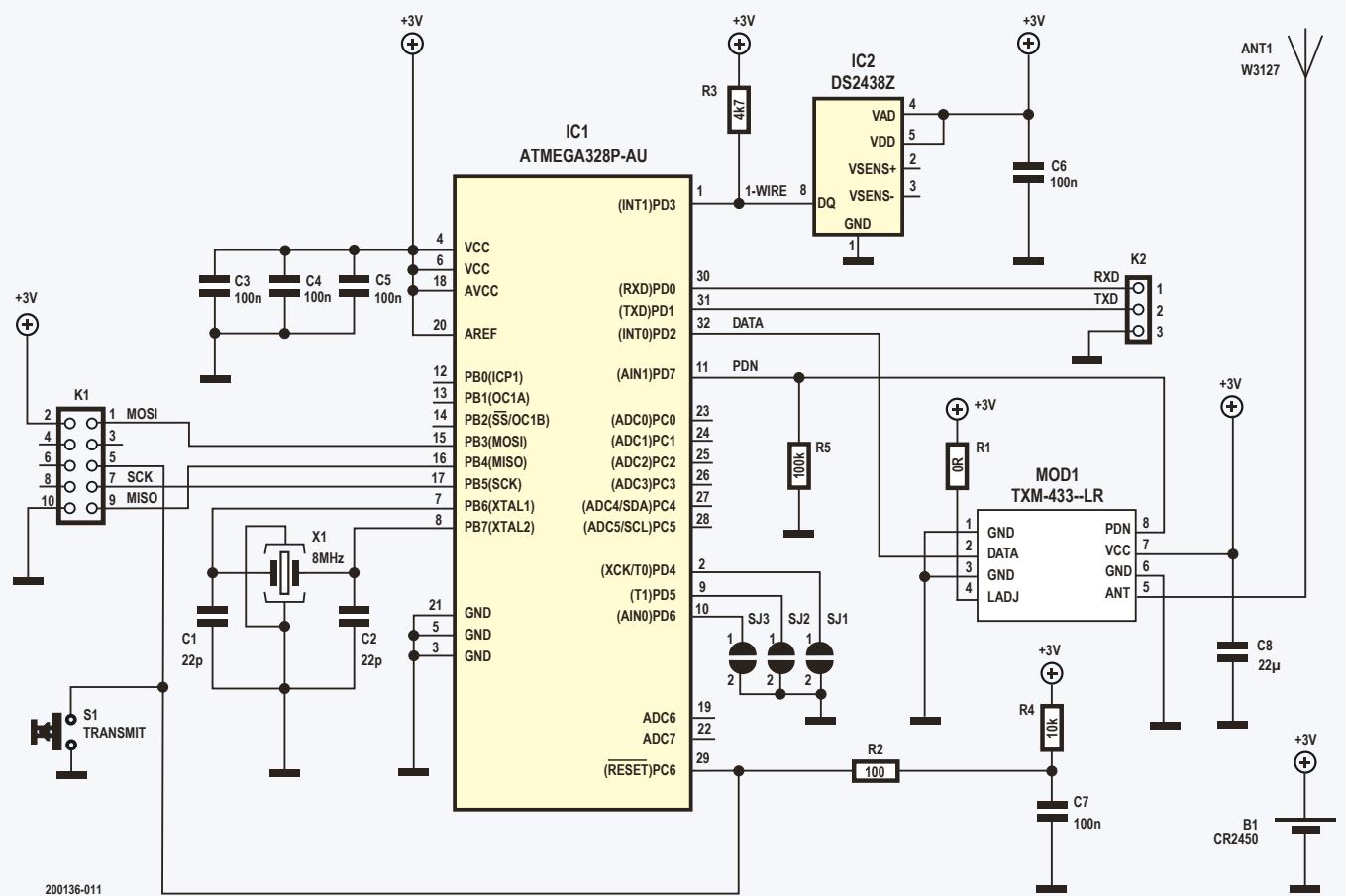


Figure 1. Schéma de l'émetteur de température. Pour que le circuit fonctionne jusqu'à 2,4 V, un capteur DS2438Z+ émule un DS18B20.

masse. La puissance rayonnée est réglable à l'aide de R1. Par défaut, une résistance de  $0\ \Omega$  est montée pour une puissance de sortie maximale, mais il peut être nécessaire de réduire la puissance RF pour se conformer à la réglementation locale. Veuillez vous référer à la fiche technique du TXM-433-LR pour plus d'informations.

Les autres composants du circuit imprimé de l'émetteur sont :

- bouton de réinitialisation
- connecteur de programmation K1
- connecteur de débogage (série) K2
- cavaliers à souder SJ1, SJ2, SJ3
- pile CR2450 (alimentation)

Les connecteurs K1 et K2 n'ont aucune utilité en fonctionnement normal et ne sont pas montés. Les cavaliers à souder SJ1, SJ2, SJ3 permettent de régler l'intervalle de transmission entre 2 mn 8 s et 3 mn 4 s. Cela réduit le risque que plusieurs émetteurs envoient des données au même moment, ce qui pourrait entraîner une collision de données.

Nous avons opté pour une pile au lithium CR2450, pour sa capacité ( $\text{mAh}$ ) plus grande que celle du modèle CR2032, à un coût légèrement supérieur (sur eBay). Avec notre prototype, la tension de la batterie était encore de 2,991 V après six mois d'utilisation continue. Lors d'un transfert de données, on a constaté que cette tension baissait brièvement à environ 2,93 V. L'intervalle de transmission utilisé était de 2 mn 24 s.

### Émetteur - logiciel

La plupart du temps, le microcontrôleur est en veille (*Power-Down*) avec la minuterie du chien de garde en marche. La minuterie du chien de garde est réglée sur son délai d'attente maximum d'environ 8 s. En fin de temporisation, la minuterie produit une interruption pour réveiller le  $\mu\text{C}$ . Un compteur en RAM est alors décrémenté. Puis, si la valeur n'a pas encore atteint zéro, la minuterie du chien de garde est relancée et le  $\mu\text{C}$  repasse en mode de veille. Ce processus nécessite environ 20 instructions.

Si le compteur atteint zéro après une inter-

ruption par la minuterie du chien de garde, les registres de température et le numéro de série de 64 bits du DS2438Z+ sont lus. En cas d'échec, le logiciel tente à nouveau de lire le DS2438Z+ quatre fois de plus. Le logiciel prend également en charge les capteurs de température DS18B20, DS18S20 et DS1822. Cela peut être utile si l'émetteur est alimenté par une alimentation de 3,3 V au lieu d'une pile au lithium.

Lorsque le DS2438Z+ est présent, le code de famille 1-Wire est modifié pour correspondre au code de famille d'un DS18B20. Le CRC est également recalculé pour correspondre au nouveau code de famille.

Le numéro de série de 64 bits avec le nouveau code de famille, la valeur de température et le CRC sont ensuite transmis deux fois par le module RF précédé d'un préambule. Les modules RF utilisent la modulation OOK/ASK, ce qui signifie que l'onde porteuse est activée et désactivée en même temps que les données appliquées au module. Notez que vous ne pouvez pas simplement alimenter le module émetteur avec des données série et

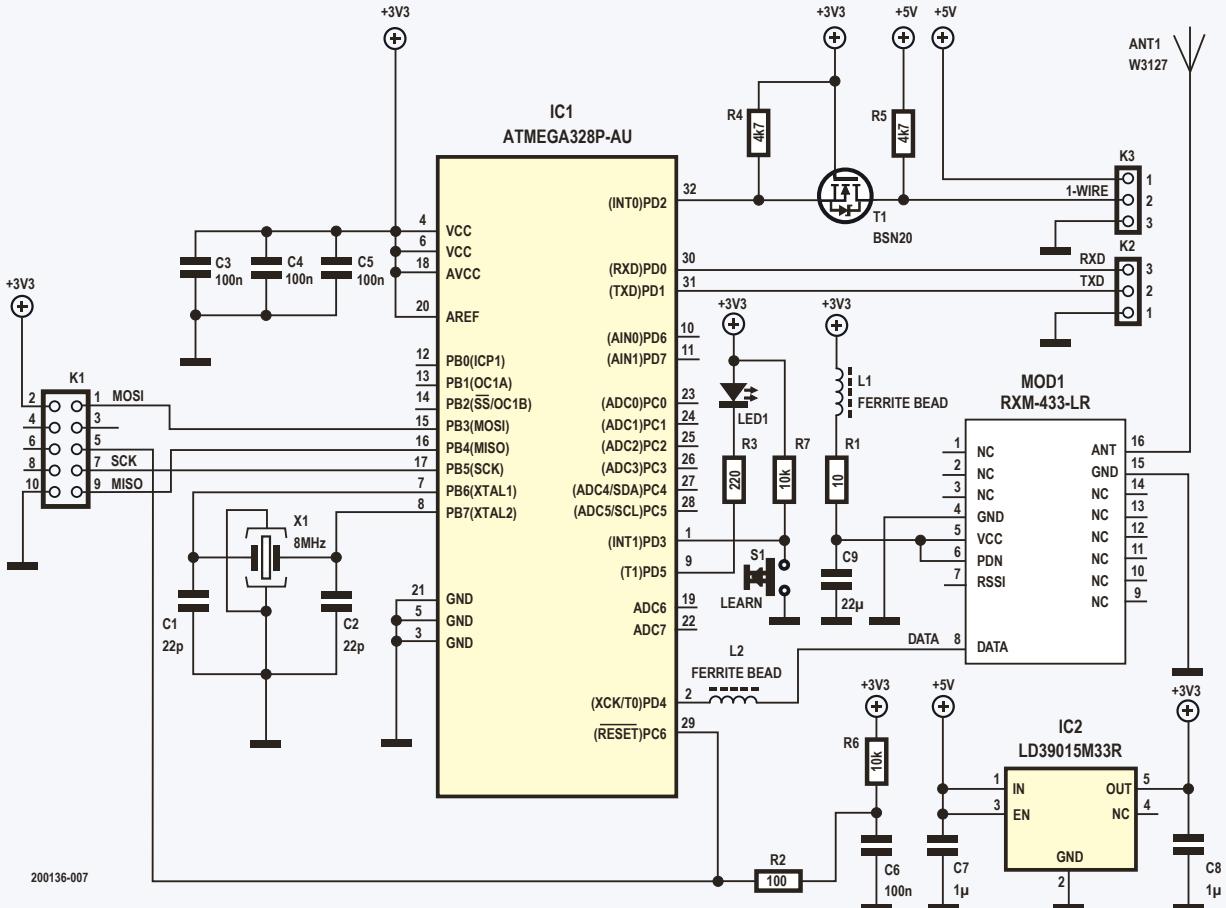


Figure 2. Schéma du récepteur de température. Les principales tâches du microprogramme sont le traitement des signaux radio démodulés et l'interprétation des commandes 1-Wire.

vous attendre à ce qu'elles arrivent parfaitement au récepteur. En l'absence de porteuse de 433 MHz, le récepteur peut capter des bruits de fond ou des interférences d'autres appareils fonctionnant également à 433 MHz. Pour atténuer ces phénomènes, les données doivent d'abord être codées et précédées par un «préambule» qui permet au récepteur de détecter un code connu et de se synchroniser avec lui avant de décoder les données. Parmi les normes de codage les plus populaires, on trouve *Manchester* [4] et la bibliothèque *RadioHead* disponible pour Arduino [5]. Les données ne sont pas cryptées pendant la transmission, car l'objectif principal est de mesurer la température extérieure, une information qui n'a rien de sensible.

Après la transmission, l'état des cavaliers SJ1-SJ3 est lu et le compteur du nombre de cycles de sommeil en RAM est réglé sur une valeur de 16 plus le nombre binaire représenté par les cavaliers (0-7, pour un nombre total de cycles de sommeil entre 16 et 23). La minuterie du chien de garde est alors lancée, le µC repasse en veille et le cycle se répète.

Après une réinitialisation, le cycle complet est également lancé. Ainsi, le fait d'appuyer sur le bouton de réinitialisation déclenche une transmission de données sans fil, ce qui est utile lorsqu'on couple un récepteur avec un émetteur.

### Récepteur - matériel

Le schéma du récepteur (fig. 2) ressemble à celui de l'émetteur et est également basé sur un µC ATMEGA328P. Les seules connexions avec le monde extérieur sont Vcc, GND et DQ (données 1-Wire).

Le récepteur partage l'antenne avec l'émetteur. Un module récepteur RMX-433-LR de Linx Technologies est utilisé [6]. Ce module de AM/OOK est doté d'une architecture superhétérodyne à conversion unique avancée, qui se traduit par une sensibilité exceptionnelle et une portée remarquable.

Le bruit et l'ondulation de l'alimentation peuvent affecter considérablement la sensibilité du récepteur. Pour garantir que la tension d'alimentation fournie au récepteur soit aussi propre que possible, la perle de ferrite L1 et

la résistance R1 de 10 Ω sont connectées en série avec la broche Vcc du module, et un condensateur de découplage C9 de 22 µF a été ajouté. Pour éviter les interférences du µC, une perle de ferrite L2 a également été ajoutée à la ligne de données.

Étant donné que la tension d'alimentation du RMX-433-LR est de 2,7 à 3,6 V, nous avons choisi de faire fonctionner tout le circuit sous 3,3 V. Le thermomètre à bargraphe fonctionne cependant sous 5 V. Pour permettre une connexion facile entre le récepteur et le thermomètre, un régulateur de tension à très faible chute de tension et à faible bruit de type LD39015M33R (IC2) a été ajouté ainsi qu'un convertisseur bidirectionnel de niveau logique autour du MOSFET T1.

Lorsque le récepteur est utilisé avec un bus 1-Wire de 3,3 V comme avec l'horloge Elektor/Axiris IV-22 VFD [7], la tension en aval du régulateur suffit pour que le circuit fonctionne correctement.

Outre un connecteur de programmation (non monté normalement) et de débogage, une LED et un bouton poussoir sont connectés



## LISTE DES COMPOSANTS

### Émetteur

#### Résistances

R1 = 0 Ω, 1206 \*  
 R2 = 100 Ω, 1206  
 R3 = 4kΩ7, 1206  
 R4 = 10 kΩ, 1206  
 R5 = 100 kΩ, 1206

#### Condensateurs

C1,C2 = 22 pF, C0G/NP0, 1206  
 C3-C7 = 100 nF, X7R, 1206  
 C8= 22 µF, X5R, 10 V, 1206, Kemet  
 C1206C226M8PACTU

#### Semi-conducteurs

IC1 = ATMEGA328P-AU, programmé

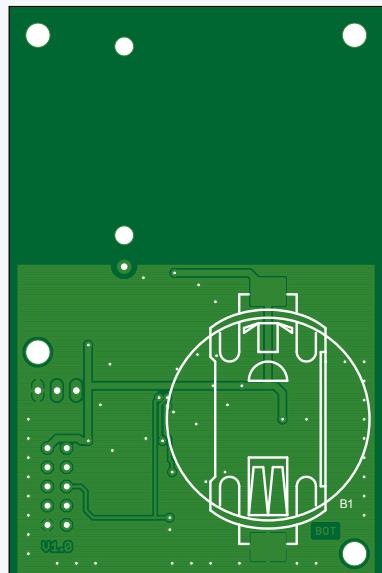
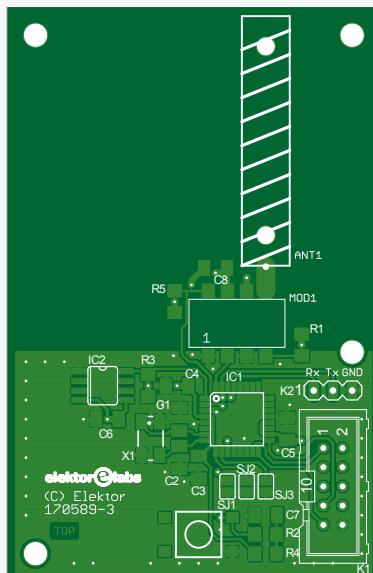
IC2 = DS2438Z+

MOD1 = TXM-433-LR, Linx Technologies  
 (USA/Canada : TXM-315-LR)

#### Divers

ANT1 = antenne hélicoïdale 433 MHz sur circuit imprimé, Pulse Electronics de type W3127  
 (USA/Canada : W3126)

B1 = support de pile CR2450, type Renata  
 SMTU 2450N-1-LF, avec pile au lithium  
 CR2450



K1 = connecteur à 10 broches (2x5), pas de 2,54 mm (facultatif)

K2 = barrette mâle à 3 broches, verticale, pas de 2,54 mm (facultatif)

S1 = bouton-poussoir SMT, TE Connectivity FSM6JSMA

X1 = quartz 8 MHz, Abraccon ABMM2-8.000MHZ-E2-T ou Würth Elektronik # 830055663

\* voir le texte

Remarque : l'émetteur est disponible en kit dans la boutique en ligne d'Elektor.



## LISTE DES COMPOSANTS

### Récepteur

#### Résistances

R1 = 10 Ω, 1206  
 R2 = 100 Ω, 1206  
 R3 = 220 Ω, 1206  
 R4,R5 = 4kΩ7, 1206  
 R6,R7 = 10 kΩ, 1206

#### Condensateurs

C1,C2 = 22 pF, C0G/NP0, 1206  
 C3-C6 = 100 nF, X7R, 1206  
 C7,C8 = 1 µF, X7R, 1206  
 C9 = 22 µF, X5R, 10 V, 1206, Kemet  
 C1206C226M8PACTU

#### Semi-conducteurs

LED1 = verte, 1206, Broadcom Limited type HSMG-C150

IC1 = ATMEGA328P-AU, programmé

IC2 = LD39015M33R

MOD1 = RXM-433-LR, Linx Technologies  
 (USA/Canada : RXM-315-LR)

T1 = BSN20

#### Divers

ANT1 = antenne hélicoïdale 433 MHz sur circuit imprimé, Pulse Electronics de type W3127  
 (USA/Canada : W3126)

K1 = connecteur à 10 broches (2x5), pas de 2,54 mm (facultatif)

K2 = barrette mâle à 3 broches, verticale, pas de 2,54 mm (facultatif)

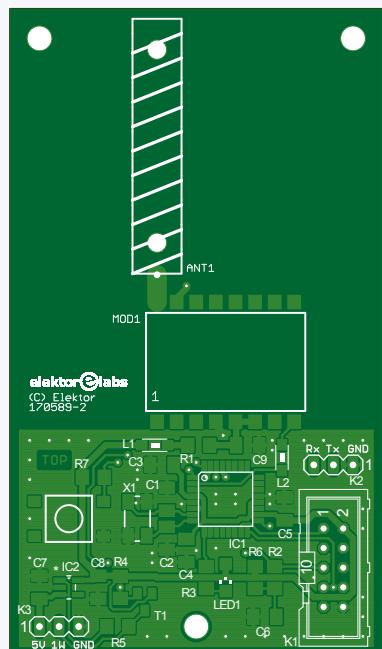
K3 = connecteur à 3 broches, coudé, 2,54 mm avec connecteur femelle # 61900311621 pré-câblé avec 3 câbles # 619100126015 (Würth Elektronik)

L1,L2 = perle de ferrite, type Fair-rite 1206 2512067007Y3

S1 = bouton-poussoir SMT, TE Connectivity FSM6JSMA

X1 = quartz 8 MHz, Abraccon ABMM2-8.000MHZ-E2-T ou Würth Elektronik # 830055663

Remarque : l'émetteur est disponible en kit dans la boutique en ligne d'Elektor.



au µC. Chaque fois qu'un paquet de données sans fil est reçu, la LED change d'état. Cela vous permet de vérifier si l'émetteur est toujours fonctionnel. Le bouton est utilisé pour coupler le récepteur avec un émetteur.

### Récepteur - logiciel

Jusqu'à récemment, le bus 1-Wire de *Dallas Semiconductors (Maxim)* était très populaire dans des réseaux MicroLAN destinés aux systèmes domotiques par exemple. L'utilisation accrue des solutions sans fil a rendu obsolète le bus 1-Wire. Malgré cela, certains dispositifs 1-Wire tels que le DS18B20 (et les capteurs de température similaires) sont encore largement utilisés. Ils sont bon marché, précis, faciles à interfaçer avec un µC et disponibles dans des boîtiers TO-92 faciles à souder ! Ce sont les principales raisons de leur utilisation dans les projets Elektor de thermomètre à bargraph et d'horloge VFD IV-22, ainsi que pour simuler une DS18B20 avec notre module récepteur.

Le logiciel écoute le module de réception RF ainsi que le bus 1-Wire. Lorsqu'une transmission de données arrive au récepteur, les données codées sont décodées et leur validité est vérifiée. Si un paquet de données valide est reçu, le numéro de série 1-Wire reçu est ensuite comparé avec le numéro de série 1-Wire stocké dans l'EEPROM du µC. Lorsque les deux correspondent, le bloc-notes (contenant entre autres les octets de température) du capteur DS18B20 simulé est mis à jour, sinon le paquet de données est rejeté. L'esclave 1-Wire simulé prend en charge les commandes 1-Wire suivantes (c'est-à-dire les commandes de fonction ROM et DS18B20) :

- [Read Rom \[33h\]](#)
- [Match Rom \[55h\]](#)
- [Search Rom \[F0h\]](#)
- [Convert T \[44h\]](#)
- [Write Scratchpad \[4Eh\]](#)
- [Read Scratchpad \[BEh\]](#)
- [Copy Scratchpad \[48h\]](#)
- [Recall E2 \[B8h\]](#)
- [Read Power Supply \[B4h\]](#)

Il n'est pas possible d'alimenter le module récepteur en mode parasite. La commande [Read Power Supply](#) renvoie toujours l'état «alim externe» (= *externally powered*). Notez que les fonctions 1-Wire esclave du récepteur ont priorité sur les fonctions RF. Si une communication par bus 1-Wire est lancée alors qu'un paquet de données est reçu et décodé, la réception de données RF

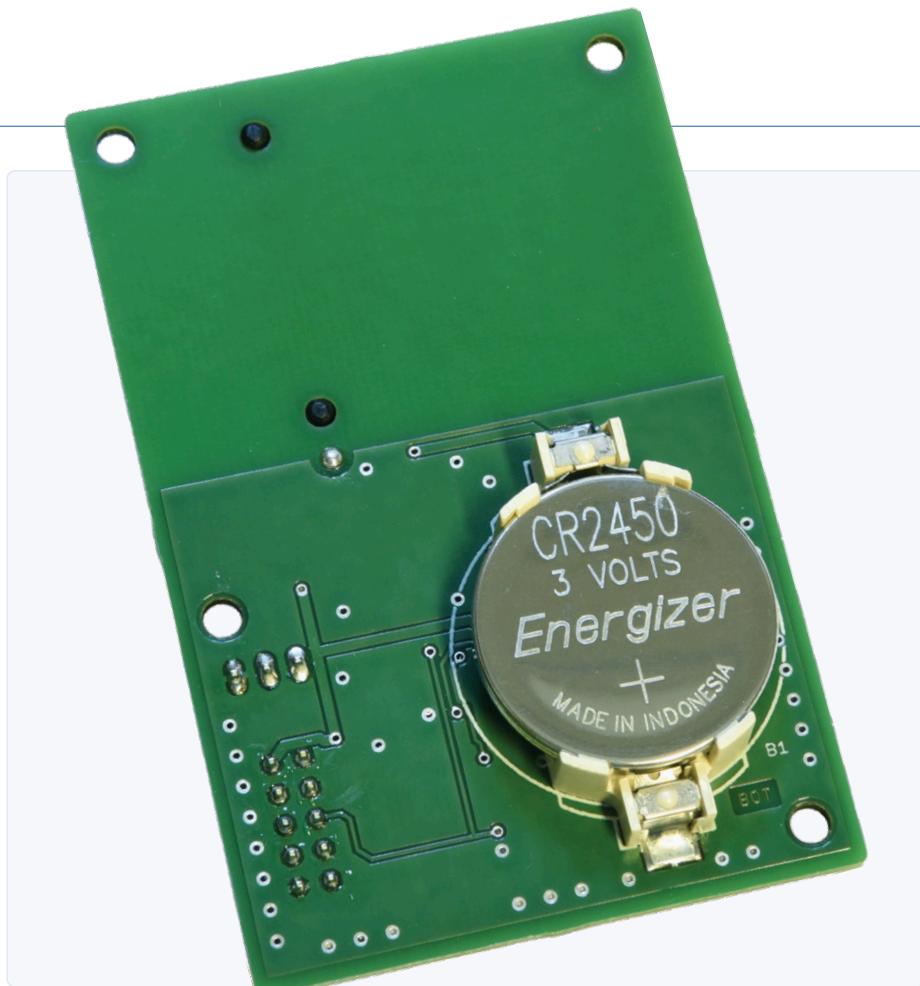


Figure 3. Une pile au lithium de 3 V de type CR2450 est suggérée pour l'émetteur. Le modèle 2450 est un peu plus cher que le CR2032 mais offre une plus grande capacité.

est interrompue. Comme le thermomètre et l'horloge VFD ne lisent la valeur de la température qu'une fois par minute, les chances que cela se produise régulièrement sont relativement faibles. C'est également la raison pour laquelle l'intervalle de transmission le plus court de l'émetteur est de 2 mn 8 s et non pas de 2 mn.

### Construction et utilisation

Le module émetteur et le module récepteur sont tous deux disponibles chez Elektor sous forme de circuits imprimés assemblés et testés. Le plan d'implantation des composants pour les PCB et les listes de composants associées sont imprimés ici par souci d'exhaustivité et pour permettre un certain degré d'ouverture technique à ceux qui souhaitent acheter leurs composants eux-mêmes. De même, les fichiers Gerber du circuit imprimé et le micrologiciel ATmega du récepteur et de l'émetteur sont téléchargeables [8].

Quelques préparatifs sont nécessaires pour faire fonctionner les cartes TX et RX

préassemblées. Montez K3, un connecteur à 3 broches coudé de 0,1 pouce et faites glisser les trois fils précablés dans le connecteur femelle à 3 voies par l'arrière jusqu'à ce qu'ils s'enclenchent en place. Guidez les fils à travers le panneau latéral du coffret et soudez-en l'autre extrémité à l'embase de la carte de réception. Isolez ces connexions avec du tube thermorétractable (oui, il faut y penser avant !).

Vérifiez les connexions GND, DQ et 5 V, aussi du côté du thermomètre. Montez maintenant le récepteur dans son coffret, connectez-le au thermomètre et alimentez-le. Le thermomètre affiche alors la pleine échelle, car la température d'initialisation du DS18B20 simulé est de 85 °C, comme celle du DS18B20 réel. Si le récepteur n'a jamais été couplé à un émetteur, l'EEPROM peut ne pas contenir de numéro de série 1-Wire. Dans ce cas, les fonctions esclaves 1-Wire sont suspendues, le tube IN-9 n'affiche rien.

Placez maintenant une pile au lithium CR2450 dans le support de pile situé à l'arrière de

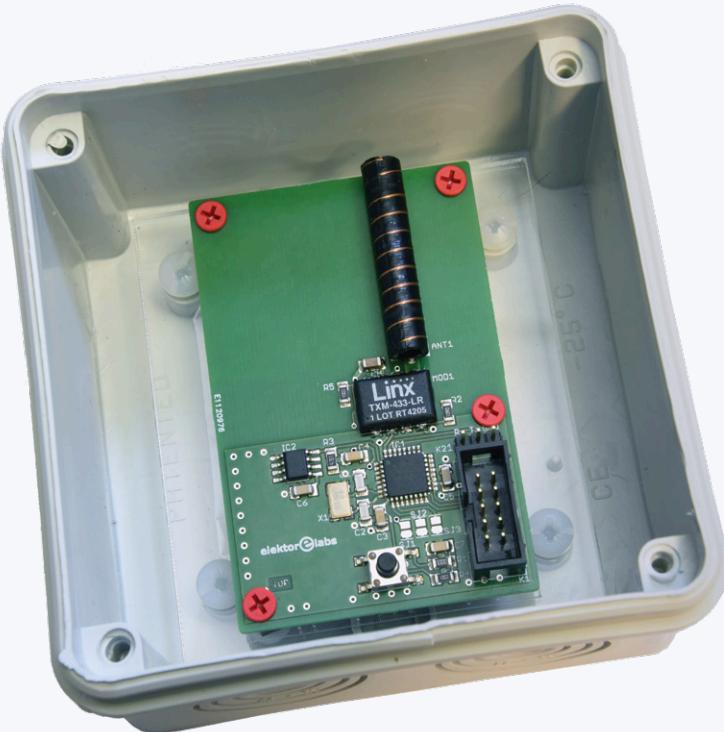


Figure 4. Pour l'extérieur, l'émetteur a été conçu pour tenir dans une boîte de dérivation électrique.

l'émetteur (**fig. 3**). Placez l'émetteur à quelques mètres du récepteur. Appuyez sur le bouton du récepteur. La LED verte clignotera, indiquant le mode d'apprentissage du récepteur. Appuyez sur le bouton de l'émetteur. Si tout va bien, la LED du récepteur cessera de clignoter, indiquant qu'une valeur de température est reçue et que le récepteur est maintenant couplé à l'émetteur. Comme le thermomètre ne lit le capteur 1-Wire qu'une fois par minute, ça durera un peu avant que ne s'affiche la température réelle. Pour l'extérieur, installez l'émetteur dans un coffret étanche avec un petit sac de gel de silice pour le garder au sec. Une solution peu coûteuse consiste à utiliser une boîte de câblage électrique avec un indice de protection IP65 (**fig. 4**).

Quand vous allumez le thermomètre, il peut s'écouler quelques minutes avant que la température ne soit reçue et affichée. Pendant ce temps, le thermomètre affiche sa valeur à pleine échelle.

Il est possible d'utiliser plusieurs émetteurs et récepteurs en même temps. Comme l'émetteur remplace le code de famille du DS2438Z+ par celui d'un DS18B20, il y a une chance infime que le numéro de série du DS18B20 simulé ne soit pas unique lorsque l'on utilise un ou plusieurs récepteurs dans un réseau 1-Wire avec d'autres capteurs de température DS18B20 (réels) présents.

Au fil de nos essais, nous avons remarqué que certaines cartes Arduino Nano provoquent plus d'interférences (RFI) que d'autres. Ces interférences, ainsi que les matériaux de construction et les structures métalliques sur le trajet entre TX et RX, peuvent affecter la portée réelle. ↗

200136-03



## PRODUITS

- **Module récepteur avec échelle et câble en acrylique révisé**  
[www.elektor.fr/170589-72](http://www.elektor.fr/170589-72)
- **Module émetteur avec batterie et boîtier étanche**  
[www.elektor.fr/170589-73](http://www.elektor.fr/170589-73)
- **Thermomètre à bargraphes Nixie (Kit) (version originale)**  
[www.elektor.fr/nixie-bargraph-thermometer-170589-71](http://www.elektor.fr/nixie-bargraph-thermometer-170589-71)
- **Horloge à tubes VFD avec ESP32 DevKit-C, boîtier en acrylique inclus**  
[www.elektor.fr/vfd-tube-clock-with-esp32-devkit-c-170537-71](http://www.elektor.fr/vfd-tube-clock-with-esp32-devkit-c-170537-71)

## LIENS

- [1] **Thermomètre à bargraphe Nixie, Elektor, juillet-août 2018** : [www.elektrormagazine.fr/magazine/elektor-201807/41755](http://www.elektrormagazine.fr/magazine/elektor-201807/41755)
- [2] **DS2438 Smart Battery Monitor — fiche technique** : <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS2438.pdf>
- [3] **Linx LR Series Transmitter Module Data Guide** : [www.linxtechnologies.com/wp/wp-content/uploads/txm-fff-lr.pdf](http://www.linxtechnologies.com/wp/wp-content/uploads/txm-fff-lr.pdf)
- [4] **Manchester Data Encoding for Radio Communications** : [www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/3/3435.html](http://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/3/3435.html)
- [5] **RadioHead Packet Radio library for embedded microprocessors** : [www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead/](http://www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead/)
- [6] **Linx LR Series Receiver Module Data Guide** : [www.linxtechnologies.com/wp/wp-content/uploads/rxm-fff-lr.pdf](http://www.linxtechnologies.com/wp/wp-content/uploads/rxm-fff-lr.pdf)
- [7] **horloge à tubes VFD avec ESP32, Elektor, mai-juin 2018** : [www.elektrormagazine.fr/magazine/elektor-201805/41576](http://www.elektrormagazine.fr/magazine/elektor-201805/41576)
- [8] **Ressources en ligne de cet article** : [www.elektrormagazine.fr/200136-03](http://www.elektrormagazine.fr/200136-03)