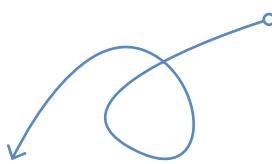


L'horloge radio SDR composée d'un microcontrôleur Teensy 4.0 avec un écran est montée sur une plaque d'expérimentation. Ici, l'heure est affichée en code couleur de résistance.

# horloges radiocommandées SDR



Martin Ossmann (Allemagne)

Les microcontrôleurs d'aujourd'hui sont si puissants qu'ils peuvent être utilisés pour construire des horloges radiocommandées basées sur le principe de la radio définie par logiciel (SDR). Le fonctionnement de ce principe a été démontré par l'horloge radio MSF [1] construite autour d'un Raspberry Pi Pico. Cet article aussi porte sur les signaux horaires, mais cette fois, la carte rapide Teensy 4.0 est utilisée comme microcontrôleur.

**Tableau 1. Des récepteurs sont implémentés pour ces émetteurs.**

60,0 kHz	MSF	Émetteur de signaux horaires britannique NPL
77,5 kHz	DCF77	Signal horaire allemand
129,1 kHz	EFR	Contrôle de l'ondulation de la radio
162 kHz	TDF	Signal horaire français
198 kHz	BBC	Radiodiffusion AM avec modulation de phase

Dans ce projet, nous développons un récepteur pour les signaux du service radio EFR, qui est utilisé par les fournisseurs d'énergie pour le contrôle des ondulations. Il transmet également des informations sur l'heure à intervalles réguliers. Construire une horloge radio avec ce service est quelque chose de nouveau. Le même concept et le même matériel basés sur la RRL peuvent être utilisés pour recevoir d'autres signaux horaires, que nous prévoyons largement d'utiliser (**tableau 1**).

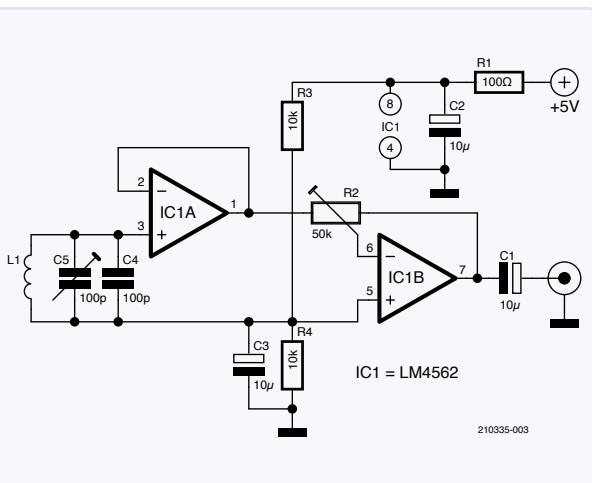


Figure 1. Schéma du circuit de l'antenne active pour 129.1 kHz. Les 250 spires de fil de cuivre émaillé de 0,2 mm<sup>2</sup> sont enroulées sur une formeuse de bobine ETD29. La bobine est poussée sur une barre de ferrite de 150 mm × 8 mm en matériau 3B1. En ajustant Cx, le circuit est utilisable pour des fréquences de 60 kHz à 200 kHz.

Un autre objectif de développement important est d'afficher l'heure sous de diverses formes innovantes.

### Un concept pour toutes les fréquences

Pour recevoir les signaux radio, la première chose dont nous avons besoin est une antenne active, comme dans le schéma de la **figure 1**. Le signal de la barre de ferrite (150 mm × 8 mm, matériau 3B1, forme de la bobine ETD29, enroulement 250 tours CuL 0,2 mm<sup>2</sup>) est filtré par un circuit résonnant, puis tamponné par un ampli-op. Le deuxième étage est un autre ampli-op, dont le gain peut être ajusté aux conditions locales à l'aide du potentiomètre R2. Notre récepteur fonctionne mieux lorsqu'un signal d'environ 50 mVSS est présent à la sortie du circuit amplificateur à deux étages. Le circuit est adapté à toutes les fréquences de signal temporel utilisées ici ; si vous voulez l'utiliser pour d'autres fréquences, vous devrez adapter le condensateur C4.

Le schéma complet du système est présenté dans la **figure 2**. Le composant principal est une carte Teensy 4.0. Avec les résistances R1 et R2, nous réglons l'offset du CA/N, et avec C1 nous couplons le signal de l'antenne active au CA/N de la carte Teensy. Nous avons construit notre prototype sur une carte de prototypage, comme le montre la **figure 1**. Les deux filtres passe-bas, R4/C2 et R3/C3, filtrent les signaux PWM des sorties 6 et 7. Nous utilisons les signaux PWM pour le débogage, par exemple, pour afficher les signaux I et Q sur un oscilloscope. L'écran est connecté via le connecteur SPI et quelques broches supplémentaires. L'alimentation est fournie par le port USB, qui est également utilisé pour

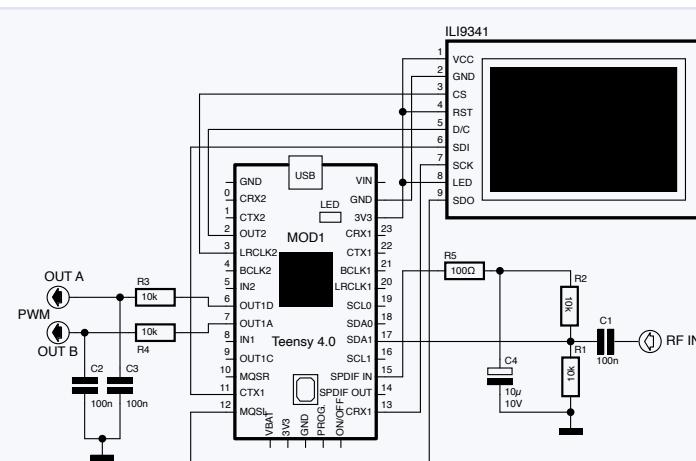


Figure 2. Schéma de circuit de notre radio définie par logiciel pour les horloges radiocommandées.

programmer la carte et sortir les messages de débogage. Cela vous permet de voir la réception des données dans le moniteur série de l'EDI Arduino. La carte Teensy peut être programmée dans l'environnement de développement normal d'Arduino.

### Réception des codes horaires

Le concept « universel » fait référence non seulement au matériel du récepteur, mais aussi à son logiciel. La structure reste similaire pour tous les émetteurs de signaux horaires répertoriés ici. Mais, comme les routines de démodulation et de décodage sont très différentes, il m'a semblé plus logique d'écrire un micrologiciel séparé pour chaque émetteur de signaux horaires que de les regrouper dans un seul micrologiciel et d'activer celle que l'on souhaite via un commutateur, par exemple. Le logiciel complet et documenté peut être téléchargé sur la page du projet à [2]. Cependant, le fonctionnement de base du récepteur sera d'abord décrit plus en détail, en utilisant la réception de l'émetteur à ondes longues EFR sur 129.1 kHz comme exemple.

### Réception de l'EFR

EFR GmbH exploite trois émetteurs à ondes

longues (129,1 kHz, 139 kHz et 135,6 kHz) pour le contrôle des ondulations dans les centrales énergétiques [3]. Les émetteurs situés en Allemagne et en Hongrie ont chacun une portée d'au moins 500 km et couvrent ainsi la majeure partie de l'Europe centrale. Le type de modulation utilisé est la modulation par déplacement de fréquence (FSK) avec une déviation de  $\pm 170$  Hz et un débit de données de 200 bps. En plus des messages propriétaires cryptés, des informations temporelles sont également envoyées. Le protocole est spécifié dans la norme IEC 60870-5.

Le concept de notre récepteur EFR est illustré à la **figure 3**. Le signal de l'antenne active atteint le CA/N interne de la carte Teensy 4.0, qui est cadencé à 333,333 kHz. Ainsi, le théorème d'échantillonnage est rempli. Comme d'habitude avec les récepteurs SDR, la multiplication IQ est ensuite effectuée. Le signal de l'oscillateur est généré par un générateur DDS implémenté dans le logiciel. Après la multiplication du signal d'entrée avec le signal de l'oscillateur I ou Q, un filtrage passe-bas est effectué. Les filtres passe-bas sont dimensionnés de manière à ce que le signal reçu ne soit pas encore écrêté,

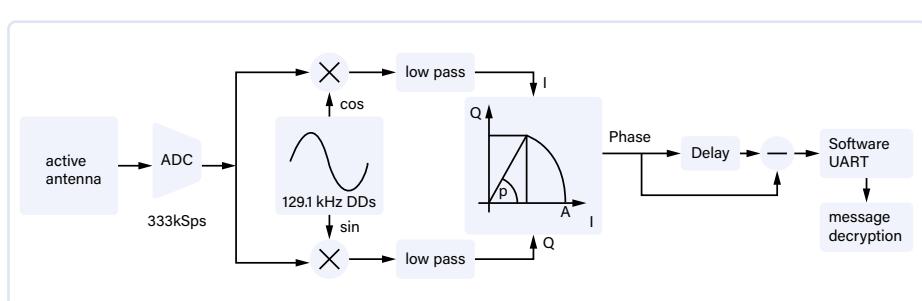


Figure 3. Le concept du récepteur EFR.

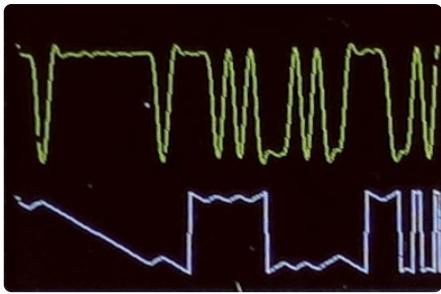


Figure 4. Informations de débogage sur l'écran. Graphique supérieur : signal RTTY démodulé (fréquence instantanée) ; graphique inférieur : phase instantanée.

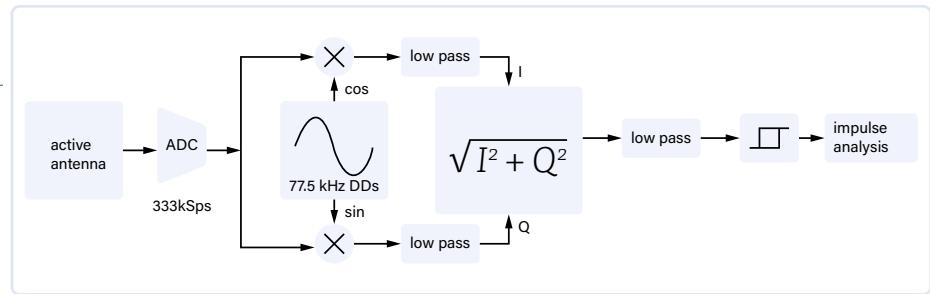


Figure 5. Concept du récepteur DCF.

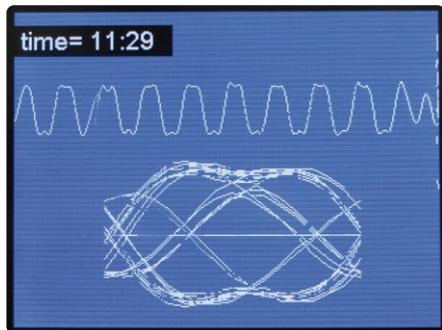


Figure 6. Informations de débogage de la réception de la BBC. En haut : signal de données récupéré ; en bas : diagramme oculaire.

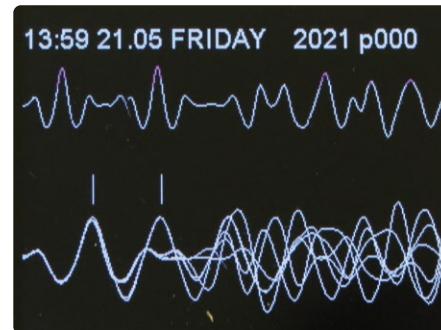


Figure 7. Signaux de débogage de la réception TDF.

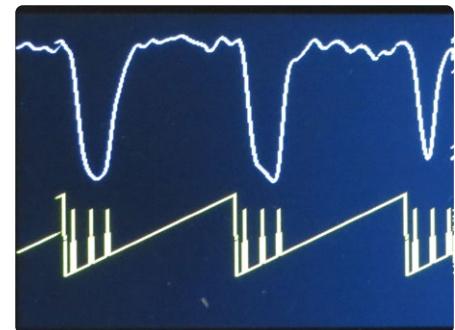


Figure 8. Info de débogage MSF. En haut : niveau de réception avec les seconds marqueurs ; en bas : variable de température avec points d'échantillonnage.

mais qu'aucune autre composante du signal ne puisse non plus le traverser.

Pour démoduler le signal RTTY, nous devons déterminer la fréquence actuellement reçue. Au décalage de +170 Hz, c'est un « 1 », à -170 Hz, c'est un zéro. Pour cela, nous déterminons la phase du courant à partir des signaux I/Q. Nous le faisons avec la fonction `atan2()`. A partir du changement de phase dans le temps, nous pouvons déterminer la fréquence. Pour ce faire, nous calculons la différence entre le signal original et le signal retardé, ce qui donne le signal démodulé, que nous transmettons à un UART logiciel pour récupérer les octets transmis. Ainsi, nous récupérons les messages transmis, desquels nous pouvons extraire l'information temporelle. La **figure 4** montre les signaux de débogage sur l'écran, en haut le signal RTTY démodulé (fréquence instantanée), et en bas la phase instantanée.

### Réception du DCF

Le concept du récepteur DCF (**figure 5**) est très similaire à celui de l'EFR. Cependant, cette fois, l'amplitude d'émission instantanée est déterminée à partir des signaux I/Q. Pour ce faire, on calcule  $\sqrt{I^2 + Q^2}$ .

Ce signal est filtré par un filtre passe-bas et acheminé vers un trigger de Schmitt. Les secondes impulsions sont ainsi disponibles

pour l'évaluation, et nous pouvons déterminer la date et l'heure à partir des bits.

### Réception de la BBC

La BBC diffuse un signal radio sur 198 kHz. La porteuse est modulée en phase et utilisée pour la transmission de données, comme le système RDS de la radio FM [4]. La modulation de phase est démodulée de la même manière que dans le système EFR. L'horloge binaire de 25 bps doit être récupérée à partir du signal démodulé (**figure 6** ci-dessus). Pour ce faire, le récepteur forme en quelque sorte le diagramme en œil et fait varier l'horloge de manière à ce que l'œil s'ouvre au maximum. Les données sont alors échantillonnées au centre de l'œil. À partir du flux binaire ainsi obtenu, il faut maintenant récupérer les limites des blocs. Les données sont envoyées par blocs de 50 bits chacun, dont 13 bits sont des bits de contrôle. Le récepteur recherche dans le flux de bits les blocs sans erreur et reconnaît leurs limites par leur position. Il existe différents types de blocs qui contiennent des données différentes. Le type 0 est destiné à la transmission de l'information temporelle et est évalué par notre récepteur.

### Réception TDF

Jusqu'en 2016, TDF (anciennement *Télédiffusion de France*) diffusait un programme radio sur 162 kHz, mais, aujourd'hui, seule

la porteuse est transmise en modulation de phase. L'information temporelle est incluse dans les données. Un bit zéro est envoyé sous forme d'une impulsion unique, un bit « 1 » sous forme d'une double impulsion, chacune commençant au début de la seconde. La **figure 7** montre les informations de phase reçues (courbe supérieure) et en bas, comme une sorte de diagramme de l'œil, des courbes superposées montrant les impulsions à gauche entre les lignes verticales. À la 59<sup>e</sup> seconde de chaque minute, le signal n'est pas modulé en phase. Notre récepteur utilise cette pause pour la synchronisation. L'information binaire individuelle est structurée de manière assez similaire à celle du DCF77.

### MSF sur 60 kHz

Sur 60 kHz, le NPL (National Physical Laboratory) en Grande-Bretagne exploite un émetteur à ondes longues qui diffuse des informations temporelles à 15 kW. Une simple modulation on-off de la porteuse est utilisée [5]. La minute commence par une pause de 500 ms. Les secondes suivantes commencent chacune par un intervalle de porteuse de 100 ms, puis deux autres intervalles de 100 ms si nécessaire, en fonction des bits à transmettre. Notre récepteur MSF est construit de manière assez similaire au récepteur DCF, seul le décodage des impulsions est effectué différemment. Comparé aux

autres signaux, le signal MSF est relativement faible, mais peut encore être assez bien reçu à la frontière ouest de l'Allemagne (figure 8).

### Options d'affichage

Lorsque l'auteur a décidé de construire une horloge radiocommandée basée sur l'EFR, il a également dû choisir l'écran à utiliser. C'est un LCD de 2,8 pouces avec  $320 \times 240$  pixels qui peut être utilisé pour réaliser une large gamme d'options graphiques. L'écran est basé sur un contrôleur ILI9341 et peut être obtenu, par exemple, sur eBay. Il est également possible d'utiliser le petit frère de 2,2 pouces avec la même résolution provenant de l'e-choppe d'Elektor (voir l'encadré « Produits »). L'écran est connecté à la carte Teensy via l'interface SPI.

### Affichage de la résistance

Notre horloge EFR offre une nouvelle option d'affichage quelque peu inhabituelle, l'« affichage à résistances » (figure 9). Les chiffres de l'heure et de la date sont affichés selon un code couleur comme sur des résistances électriques. Il y en a deux dans l'affichage, une avec six anneaux pour les six chiffres de l'heure (heures:minutes:secondes, par exemple, 12:23:45). La seconde résis-

tance a huit anneaux pour la date (jour.mois.année, par exemple, 23.08.2012). L'heure est mise à jour toutes les secondes, et l'horloge locale est toujours synchronisée lorsque des données horaires sont reçues du service EFR. Pour les utilisateurs qui ne connaissent pas encore le code de résistance, l'heure et la date sont également affichées à l'aide de chiffres standard. Les lecteurs puristes pourraient faire remarquer ici que les résistances ont un maximum de six anneaux, mais cela permet au moins aux débutants d'apprendre le code couleur DIN41429 de manière ludique.

### Présentoir à dominos

Comme autre idée d'affichage amusante, un affichage de dominos a été mis en œuvre (figure 10). Sur les dominos, vous pouvez afficher les chiffres de 0 à 9. Chaque domino offre un espace pour deux chiffres, il en faut donc trois pour représenter l'heure et quatre pour représenter la date. L'utilisation de l'affichage à résistance, de l'affichage à dominos ou d'une autre option est déterminée dans le code source à l'aide des bits d'option (listage 1). L'option à choisir est sélectionnée avec un « 1 », et les autres options sont désactivées avec un « 0 ».

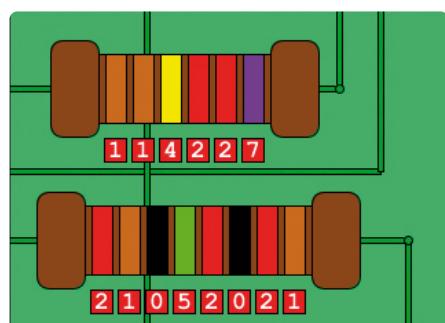


Figure 9. Option d'affichage en code couleur de résistance.

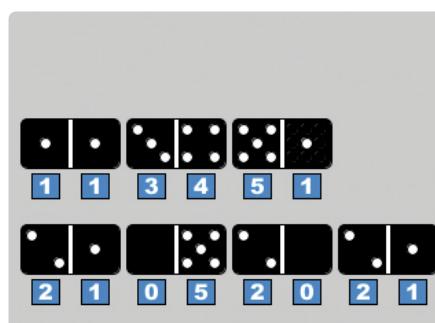


Figure 10. Affichage en domino.

### Horloge à mots et style analogique

En plus des affichages décrits jusqu'à présent, vous pouvez également en sélectionner un à mots, où l'heure est affichée en texte (allemand) à l'écran (figure 11). Avec cette option, seule l'heure est affichée, pas la date. Elle est mise à jour toutes les cinq minutes. Le format d'affichage classique d'une horloge analogique est également mis en œuvre (figure 12). L'heure est affichée sur un cadran rond et la date sous forme de texte en dessous.



### Listage 1. L'affichage est sélectionné via ces constantes.

```
#define scopeShow 0
#define scopeClkShow 1
#define resiShow 0
#define dominoShow 0
#define wordShow 0
#define sevenSegShow 0
#define AP6571Show 0
```



Figure 11. Une horloge à mots est également implémentée.

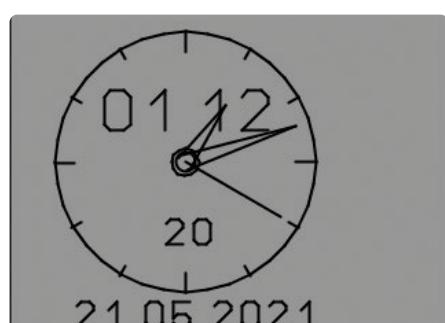


Figure 12. Horloge analogique classique.

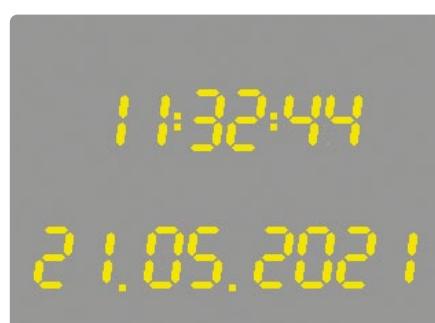


Figure 13. Affichage nostalgique à sept segments.



Figure 14. Le temps représenté comme s'il provenait d'une imprimante matricielle.

## Affichage à sept segments

Bien entendu, nous proposons également un affichage à sept segments, simple et nostalgique. Donc, si vous voulez être rappelé des vieux jours, c'est le bon choix (figure 13).

## Affichage du générateur de caractères

Comme dernière option, nous proposons un affichage de texte simple basé sur le légendaire générateur de caractères 6571AP ROM, autrefois largement utilisé dans les imprimantes matricielles à 9 broches (figure 14).

Dans l'ensemble, ce projet offre de nombreuses combinaisons et options. Vous pouvez choisir entre cinq variantes d'horloge radio, de l'EFR

au DCF, et entre six options d'affichage, de sorte que chacun devrait pouvoir trouver son bonheur. Si vous le souhaitez, vous pouvez également utiliser ce logiciel, par exemple les options d'affichage, comme point de départ pour vos propres développements. ↗

210335-04 — VF : Maxime Valens

## Des questions, des commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur (ossmann@fh-aachen.de) ou contactez Elektor (redaction@elektor.fr) !



## Produits

- **Teensy 4.1 carte de développement (SKU 19311)**

[www.elektor.fr/19311](http://www.elektor.fr/19311)

- **2.2» SPI TFT module afficheur ILI9341 (240x320) (SKU 18419)**

[www.elektor.fr/18419](http://www.elektor.fr/18419)

## LIENS

[1] Martin Ossmann, « Radio logicielle MSF utilisant un Raspberry Pi Pico », Elektor 7-8/2022 :

<https://www.elektormagazine.fr/magazine/elektor-267/60603>

[2] Téléchargements pour cet article : <https://elektormagazine.fr/210335-04>

[3] Le signal EFR : [https://mee.hu/files/images/5/B\\_Sbick\\_EFR-CEE\\_Lakihegy.pdf](https://mee.hu/files/images/5/B_Sbick_EFR-CEE_Lakihegy.pdf)

[4] Spécifications L.F. Radio Data : <https://downloads.bbc.co.uk/rd/pubs/reports/1984-19.pdf>

[5] Codage horaire MSF 60 kHz :

[https://www.npl.co.uk/products-services/time-frequency/msf-radio-time-signal/msf\\_time\\_date\\_code](https://www.npl.co.uk/products-services/time-frequency/msf-radio-time-signal/msf_time_date_code)

# elektor e-zine

Your dose of electronics



Chaque semaine passée sans vous abonner à l'e-zine d'Elektor, vous manquez des articles et des projets électroniques intéressants.

Alors, pourquoi attendre plus longtemps ? Abonnez-vous dès aujourd'hui à [www.elektor.fr/ezine](http://www.elektor.fr/ezine) et recevez un livre numérique gratuit de projets Raspberry Pi.



elektor