

# carte processeur Audio DSP FX

plateforme polyvalente basée sur l'ESP32 + DSP  
ADAU1701

## FOCUS SUR

### Prototypage, production et composants

1 Requirements Definition

2 Design Proposal

Design Specifications

Project Plan

PCB Design

4

Schematic Design



5

6

Build Prototypes



7

8

9

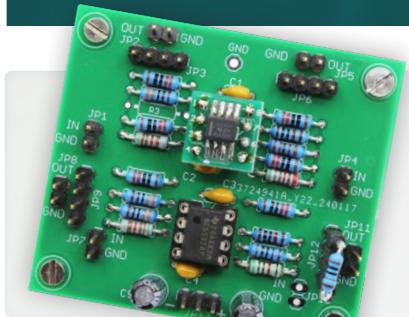
Delivery of Manufacturing Pack

Production Management

10

### KiCad 8

nouvelles et dernières caractéristiques



### testeur d'ampli-op

pour les applications audio et autres



### compteur d'énergie ESP32

surveiller l'énergie avec MQTT



### kit MultiCalculator d'Elektor

un kit de calculatrice basé sur Arduino pour l'électronique

L1924-510-F: 15,50 € - RD

# NOTRE GAMME PAR DES TECHNICIENS POUR LES TECHNICIENS



Tirer le meilleur parti de votre projet: [www.reichelt.com](http://www.reichelt.com)

## Uniquement le meilleur pour vous - provenant de plus de 1500 marques

Nos responsables produits sont employés par Reichelt depuis de nombreuses années et connaissent les exigences de nos clients. Ils rassemblent une large gamme de produits de qualité, à la fois parfaits pour les besoins dans les domaines de la recherche et du développement, la maintenance, l'infrastructure informatique et la production en petites séries et adaptés pour les fabricants.

## Entwicklerboards für Ihr Projekt

### Kit scientifique Arduino R3

Plongez dans le monde fascinant de la science avec le kit scientifique Arduino R3 ! Conçu pour les enseignants et les élèves, ce kit combine du matériel et des logiciels puissants.

- y compris Nano RP2040 Connect, Science Carrier R3, capteurs
- permet un apprentissage pratique et expérimental
- collecte et analyse des données en temps réel via l'application Science Journal
- écosystème complet de capteurs pour la détection paramètres physiques



Référence:  
ARD AKX00045

**186,05**  
(155,04)

### Le Raspberry Pi 5 B All-In-Bundle de reichelt

Le Raspberry Pi Bundle contient tout le nécessaire pour pouvoir démarrer immédiatement. Mettez en œuvre des projets tels que le lecteur multimédia HD, la radio Internet, le serveur de webcam, l'automatisation de la maison!

Le bundle inclut :

- Raspberry Pi 5 B avec 2 Go de mémoire vive
- boîtier de haute qualité et très tendance
- bloc d'alimentation USB-C, original et performant
- Carte microSD de 32 Go, RaspbianOS inclus
- Kit de refroidissement Raspberry Pi en 4 parties
- Câble microHDMI vers HDMI, 1 m



Référence:  
RPI 5B 2GB ALLIN

**87,61**  
(73,01)

### reichelt elektronik MAGAZINE

Découvrir et explorer –  
Cartes de développement  
pour votre projet

A lire ►  
<https://rch.lt/MG797f>



RASPBERRY PI, ARDUINO & CO.

### CARTES DE DÉVELOPPEMENT POUR VOTRE PROJET

Découvrez maintenant ►  
<https://rch.lt/boards-fr>



Types de paiement :

PRIX DU JOUR! Prix à la date du: 22. 10. 2024

■ Excellent rapport qualité prix

■ Plus de 150 000 produits sélectionnés

■ Livraison fiable - depuis l'Allemagne dans le monde entier

[www.reichelt.com](http://www.reichelt.com)

Assistance téléphonique: +49 4422 955 363

**reichelt**  
elektronik – Tirer le meilleur parti de votre projet

Les réglementations légales en matière de résiliation sont applicables. Tous les prix sont indiqués en € TVA légale incluse, frais d'envoi pour l'ensemble du panier en sus. Seules nos CGV sont applicables (sur le site <https://rch.lt/CG-FR> ou sur demande). Semblables aux illustrations. Sous réserve de coquilles, d'erreurs et de modifications de prix.  
reichelt elektronik GmbH, Elektronikring 1, 26452 Sande (Allemagne), tél. +33 9 75 18 03 04

47<sup>ème</sup> année n° 510  
novembre-décembre 2024  
ISSN 0181-7450

N° de TVA Intracommunautaire : FR90319937454

Dépôt légal : novembre 2024  
CPPAP 1125 T 83713  
Directeur de la publication : Donatus Akkermans

Elektor Magazine est publié 8 fois par an par  
PUBLITRONIC SARL - c/o Regus Roissy CDG  
1, rue de la Haye - BP 12910  
FR - 95731 Roissy CDG Cedex  
www.elektor.fr | www.elektormagazine.fr

**Pour toutes vos questions :** service@elektor.fr

**Devenez membre :** www.elektormagazine.fr/abo

**Publicité :** Ouafae Hassani  
Tél. : +31 (0)6 41312932  
ouafae.hassani@elektor.com  
www.elektormagazine.fr/publicité

**Tarifs Annuels :**  
France 1 an 129,95 € (8 numéros)

**Droits d'auteur**  
© 2024 Elektor International Media B.V.

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente publication, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 11 mars 1957 -art. 40 et 41 et Code Pénal art. 425).

Certains circuits, dispositifs, composants, etc. décrits dans cette revue peuvent bénéficier de droits propres aux brevets; la Société éditrice n'accepte aucune responsabilité du fait de l'absence de mention à ce sujet. Conformément à l'art. 30 de la Loi sur les Brevets, les circuits et schémas publiés dans Elektor ne peuvent être réalisés que dans des buts privés ou scientifiques et non commerciaux. L'utilisation des schémas n'implique aucune responsabilité de la part de la Société éditrice. La Société éditrice n'est pas tenue de renvoyer des articles qui lui parviennent sans demande de sa part et qu'elle n'accepte pas pour publication. Si la Société éditrice accepte pour publication un article qui lui est envoyé, elle est en droit de l'amender et/ou de le faire amender à ses frais; la Société éditrice est de même en droit de traduire et/ou de faire traduire un article et de l'utiliser pour ses autres éditions et activités, contre la rémunération en usage chez elle.

Imprimé aux Pays-Bas par Senefelder Misset,  
Mercuriusstraat 35, 7006 RK Doetinchem

Distribué en France par M.L.P. et en Belgique par  
A.M.P.



## Jens Nickel

*rédacteur en chef d'Elektor Magazine*



# Prototypage, production et composants !

Le secteur de l'électronique est très mondialisé. De nombreux fabricants et fournisseurs de semi-conducteurs exercent leurs activités sur différents continents. Qui, parmi nous, n'a jamais commandé de composants, destinés à être expédiés aux quatre coins du monde, emballés dans de petits sachets étanches ? Les frontières nationales semblent presque insignifiantes - au point qu'il est parfois difficile de savoir où ces entreprises ont été créées à l'origine.

Mais il existe une période de l'année où le monde entier vient dans mon pays d'origine, l'Allemagne, et où Munich se transforme en un véritable pèlerinage pour les professionnels et les passionnés d'électronique. L'édition 2024 d'electronica, qui ouvrira ses portes le 12 novembre, promet de dévoiler les derniers développements dans les domaines de l'IA, de l'IdO, de l'énergie intelligente, des semi-conducteurs GaN et SiC, et bien plus encore. Célébrant son 60<sup>e</sup> anniversaire, le salon sera cette année plus grand que jamais, occupant pour la première fois les 18 halls de la foire de Munich. Mes collègues et moi-même sommes impatients de participer à ce salon. Notre stand (hall B4.440) propose un programme riche. Au sein de notre espace electronica Fast Forward, cinq startups présenteront leurs produits au public. De plus, trois influenceurs, GreatScott!, Max Imagination, et DIY GUY Chris, qui cumulent plus de deux millions d'abonnés, partageront leurs derniers projets sur le stand Elektor. Des interviews d'experts sont également prévues sur scène. Chaque soir, à 17 h 00 CET, de mardi à jeudi, notre Elektor Lab Talk proposera des discussions avec divers invités sur les découvertes marquantes du salon. Venez nous rencontrer pour découvrir ces échanges en direct ! Si vous ne pouvez pas être présents à electronica, suivez nos interviews et nos émissions Lab Talk sur notre chaîne YouTube [www.youtube.com/ElektorIM](https://www.youtube.com/ElektorIM).

Comme toujours, nous avons sélectionné de nombreux articles captivants pour notre numéro de novembre/décembre afin de susciter votre enthousiasme pour le salon à venir, mais également pour enrichir les longues soirées d'hiver de l'hémisphère nord avec des projets d'électronique pratique. Notre article de couverture, sur la carte DSP, propose une plate-forme de prototypage complète pour les passionnés de l'audio et du son. J'ai été impressionné par la polyvalence de ce système, développé par mon collègue Clemens Valens, qui partage avec moi une passion pour l'audio et la musique. Dans ce numéro, centré sur la production, nous couvrons également en profondeur le domaine des circuits imprimés et des composants. Vous y découvrirez un article approfondi sur KiCad 8, un petit projet de testeur d'ampli-op et un article de fond sur les circuits imprimés et la sécurité.

Vous découvrirez davantage d'informations sur le prototypage, la production et les composants dans notre édition bonus. (Téléchargez-la gratuitement sur [www.elektormagazine.fr/prototypage-production](https://www.elektormagazine.fr/prototypage-production)). Nous y proposons un guide pour démarrer avec le développement ESP32 sur PlatformIO, et bien plus encore !

### Plus sur le prototypage et la production

Si vous vous intéressez particulièrement au prototypage, à la production et aux composants, nous vous invitons à consulter notre page dédiée au prototypage et à la production. Vous y trouverez des informations actualisées et des articles exclusifs tout au long de l'année [www.elektormagazine.fr/prototypage-production](https://www.elektormagazine.fr/prototypage-production)

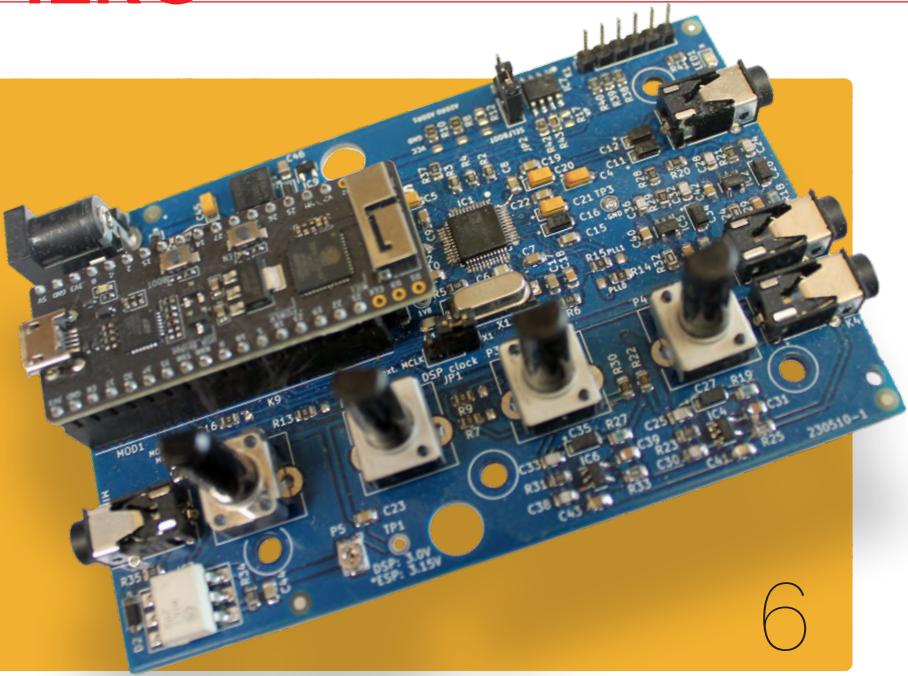


### notre équipe

**Rédacteur en chef :** Jens Nickel | **Rédaction :** Asma Adhimi, Roberto Armani, Eric Bogers, Jan Buiting, Stuart Cording, Rolf Gerstendorf (RG), Ton Giesberts, Saad Imtiaz, Alina Neacsu, Dr. Thomas Scherer, Jean-François Simon, Clemens Valens, Brian Tristam Williams | **Contributeurs réguliers :** David Ashton, Tam Hanna, Ilse Joostens, Prof. Dr. Martin Ossmann, Alfred Rosenkränzer | **Maquette :** Harmen Heida, Sylvia Sopamena, Patrick Wielders | **Des questions techniques :** [redaction@elektor.fr](mailto:redaction@elektor.fr)

## carte processeur Audio DSP FX

Plateforme polyvalente  
basée sur ESP32 +  
DSP ADAU1701



## Rubriques

- 3 **Édito**
- 94 **sur le vif**  
microtechnophobie : c'est grave, docteur ?
- 100 **démarrer en électronique...**  
... on continue avec l'ampli-op !
- 106 **2024 : l'odyssée de l'IA**  
un regard sur l'avenir
- 120 **projet 2.0**  
corrections, mises à jour et courrier des lecteurs

## Articles de fond

- 18 **50 ans d'Elektor en anglais**
- 22 **KiCad 8**  
nouvelles et dernières caractéristiques
- 28 **Elektor @ electronica 2024**  
prix electronica Fast Forward, experts et influenceurs sur scène, Lab Talk Shows, et plus encore
- 38 **systèmes GNSS RTK à faible coût**  
avec un degré de précision de l'ordre du centimètre
- 50  **routage des circuits imprimés et sécurité**  
conseils pour une conception sûre et fiable de vos cartes électroniques
- 88 **outils open-source**  
simulateur d'antennes, gestion des composants, calculatrice, et bien plus

## Projets

- 6 **carte processeur Audio DSP FX**  
Plateforme polyvalente avec ESP32 + DSP ADAU1701
- 32 **kit MultiCalculator d'Elektor**  
un kit de calculatrice basé sur Arduino pour l'électronique
- 58 **testeur d'ampli-op**  
pour les applications audio et autres
- 62 **compteur d'énergie basé sur l'ESP32**  
surveiller l'énergie avec MQTT
- 96 **arbre de Noël 3D**  
circuit imprimé 3D avec un microcontrôleur 32 bits peu coûteux
- 102 **nœud de capteurs autonome**  
réduire la consommation électrique en veille avec un RTC externe et un commutateur d'alimentation
- 112 **afficheurs LED avec le MAX7219**  
une excellente puce
- 124 **gants vibro-tactiles**  
une avancée pour les patients de Parkinson



# arbre de Noël 3D

circuit imprimé 3D avec un microcontrôleur 32 bits peu coûteux

96

testeur d'ampli-op  
pour les applications audio et autres

58

## Industrie

- 68 analyseur de spectre temps-réel à technologie guide d'onde et PC à interfaces multiples
- 72 inductances SMT bobines et ferrites – un choix simplifié
- 78 utilisation d'un blindage EMI pour assurer la conformité à la compatibilité électromagnétique
- 83 l'outil ultime pour tous les passionnés d'électronique débloquez des possibilités infinies avec Red Pitaya et plus de 1 000 Click Boards™
- 84 HDI au milieu un nouveau service PCB-pooling rentable pour des petits BGA
- 86 défis de l'analyse DFM pour les circuits flexibles et flexibles-rigides
- 92 infographie : prototypage et production

## CONTENU BONUS

Découvrez l'édition bonus gratuite du magazine Elektor consacrée au prototypage, à la production et aux composants !

- Créer un projet ESP32 avec PlatformIO
- Drôle de composant : circuits intégrés originaux
- Microscope numérique HDMI avec endoscope

[www.elektormagazine.fr/  
prototypage-production](http://www.elektormagazine.fr/prototypage-production)



## Bientôt dans ces pages

### Édition spéciale IA 2024

Pour le prochain numéro, la rédaction d'Elektor collabore avec des experts du domaine de l'IA pour vous proposer une édition spéciale IA. Fidèle à l'esprit d'Elektor, les projets DIY occuperont une place centrale, mais cette édition vous réserve également des tutoriels techniques détaillés, des entretiens exclusifs et bien plus encore.

- Système de sécurité IA basé sur le Raspberry Pi 5
- Détection de moustiques avec Arduino Nicla Vision
- Horloge en VHDL réalisée avec ChatGPT
- Fonctions vocales sur Raspberry Pi Zero
- Vision artificielle avec OpenMV

L'édition spéciale IA 2024 sera publiée aux alentours du 11 décembre 2024.

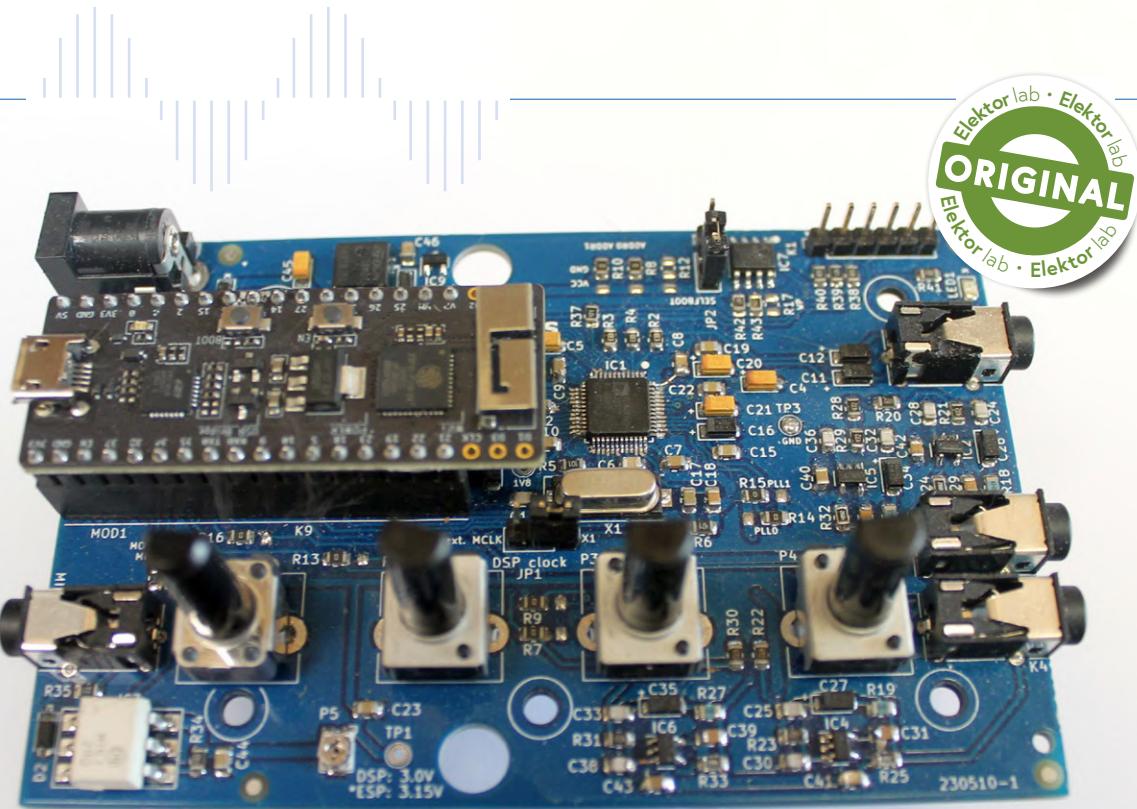
### Le numéro de janvier - février 2025

Vous retrouverez dans le prochain magazine Elektor l'habituel mélange stimulant de réalisations originales, de circuits, d'articles de fond, de sujets nouveaux, de trucs et d'astuces pour les électroniciens. Le thème de ce numéro sera « puissance et énergie ».

- Charge électronique
- Bloc d'alimentation pour ordinateur portable
- Isolateur USB
- Simulateur PV
- Batterie DIY pour systèmes solaires

Le numéro de janvier - février 2024 du magazine Elektor sera publié aux alentours du 15 janvier 2024.

*La date d'arrivée du magazine papier chez les abonnés dépend des aléas d'acheminement.*



# carte processeur Audio DSP FX

partie 1 : caractéristiques et conception

Clemens Valens (Elektor)

La carte Elektor Audio DSP FX Processor est en réalité un microcontrôleur ESP32 complété par des entrées et sorties audio de haute qualité. Ce qui distingue néanmoins cette carte des autres cartes, apparemment similaires, est son interface audio qui intègre un DSP apte à traiter l'audio tout seul. Cette fonctionnalité pratique rend la carte non seulement puissante, mais aussi flexible et polyvalente. Dans ce premier article d'une série de deux, nous examinerons la conception de la carte et ses caractéristiques.

L'Audio DSP FX Processor combine un microcontrôleur Espressif ESP32 et un DSP audio ADAU1701 d'Analog Devices. La famille Audio DSP est une série de processeurs de signaux numériques (DSP) de haute performance, optimisés pour le traitement audio. Les programmes pour ces DSP sont créés avec l'outil de programmation graphique gratuit SigmaStudio en glissant et déposant des blocs d'algorithme prédefinis sur un canevas.

L'ADAU1701 utilisé ici n'est pas le dispositif le plus récent, mais il est le plus accessible. Outre un cœur DSP programmable par l'utilisateur, l'ADAU1701 intègre des convertisseurs analogique-numérique et numérique-analogique de haute qualité et dispose d'un port I<sup>2</sup>S. Il convient donc parfaitement comme interface audio pour l'ESP32. Avant d'explorer les différents cas d'utilisation de la carte Audio DSP FX

Processor, examinons d'abord son schéma. On dit qu'une image vaut mieux qu'un long discours. Jetez également un coup d'œil aux encadrés **Spécifications** et **Applications**. Cela vous aidera à comprendre la description du circuit qui suit. Une fois ceci fait, nous pouvons entrer dans le vif du sujet.

## Aperçu du circuit

La **figure 1** présente un schéma fonctionnel de la carte Audio DSP FX Processor. On y voit deux blocs principaux, l'ESP32 et l'ADAU1701, connectés l'un à l'autre par plusieurs bus. Au centre, on trouve le bus I<sup>2</sup>S pour le transport des signaux audio entre les deux processeurs. Si le DSP se charge de tout le traitement audio, ce qu'il peut faire, ce bus n'est pas utilisé et l'ESP32 peut servir à d'autres tâches.

## Spécifications

- » ADAU1701 Processeur audio numérique 28/56 bits, 50 MIPS prenant en charge des taux d'échantillonnage allant jusqu'à 192 kHz
- » ESP32 Microcontrôleur double cœur 32 bits avec Wi-Fi 802.11b/g/n et Bluetooth 4.2 BR/EDR et BLE
- » 2x entrées audio 24 bits (2 VRMS, 20 kΩ)
- » 4x sorties audio 24 bits (0,9 VRMS, 600 Ω)
- » 4x potentiomètre de réglage
- » Entrée et sortie MIDI
- » Port d'extension I<sup>2</sup>C
- » Fonctionnement multimode
- » Alimentation : 5 VCC USB ou 7,5 VDC à 12 VDC (jack, la broche centrale est GND)
- » Consommation de courant (moyenne) : 200 mA

## Applications

- » Récepteur Bluetooth/Wi-Fi audio (par ex. haut-parleur) et émetteur
- » Pédale d'effet guitare (pédale de percussion)
- » Synthétiseur musical
- » Générateur de sons/fonctions
- » Filtre cross-over programmable pour haut-parleurs
- » Processeur d'effets audios avancé (réverbération, chorus, transposition de tonalité, etc.)
- » Appareil audio connecté à Internet
- » Plate-forme d'expérimentation DSP
- » MIDI sans fil
- » Convertisseur MIDI vers CV
- » et bien d'autres choses encore !

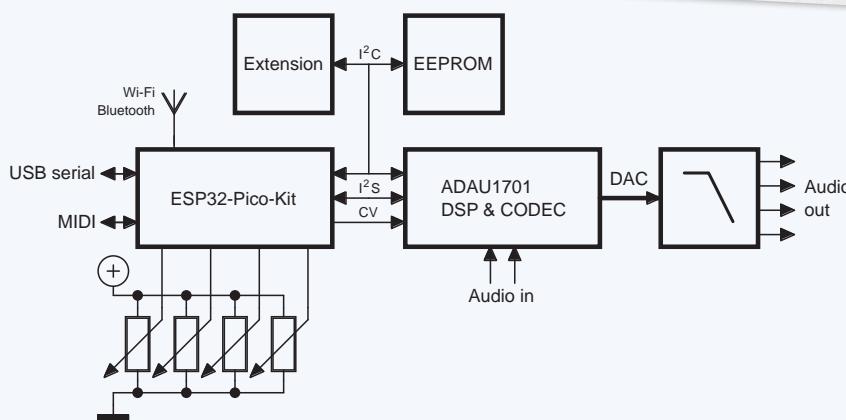


Figure 1. Le schéma fonctionnel du processeur Audio DSP FX contient deux blocs principaux : un processeur ESP32 et un DSP.

Le bus I<sup>2</sup>C permet de commander le DSP à partir d'un autre processeur comme l'ESP32 ou un Arduino UNO connecté au port d'extension. Le DSP peut également utiliser le bus SPI, mais nous avons choisi le bus I<sup>2</sup>C parce qu'il est plus facile à étendre qu'un bus SPI (aucun signal de sélection de cible n'est nécessaire).

Ce bus est également disponible pour lire ou écrire dans l'EEPROM. Par exemple, lorsque l'ADAU1701 est en mode *Selfboot*, il s'attend à ce que son programme soit stocké dans cette EEPROM. L'ESP32 peut charger l'EEPROM avec un programme DSP reçu d'un autre ordinateur, sans fil ou par USB.

Le quatrième bus va de l'ESP32 au DSP et est destiné aux signaux analogiques qui servent au réglage des paramètres des blocs algorithmiques au sein du DSP. Ce bus possède quatre canaux. Nous avons fait en sorte de pouvoir ajuster ces tensions analogiques par des potentiomètres (qui peuvent aussi servir à d'autres fins) ou par un micrologiciel fonctionnant sur l'ESP32.

Le bus d'E/S audio (tout à droite) se compose de deux canaux d'entrée et de quatre canaux de sortie. Les sorties sont filtrées par des filtres passifs ou actifs (voir ci-dessous), les entrées sont filtrées dans le DSP. Outre les signaux mentionnés jusqu'à présent, l'ESP32 dispose également d'un convertisseur USB-série, d'une entrée MIDI (optiquement isolée) et d'une sortie MIDI.

Enfin, l'ESP32 dispose d'une radio pour les communications Wi-Fi et Bluetooth, représentée par un symbole d'antenne.

## Circuit

La **figure 2** présente le schéma détaillé de la carte Audio DSP FX Processor. IC1 est le DSP audio ADAU1701. Le circuit qui l'entoure est pratiquement un copier-coller de la fiche technique du DSP, à l'exception du cavalier JP1 qui permet de sélectionner la source d'horloge pour le DSP.

Les filtres de sortie audio (IC2, IC4, IC5 et IC6, voir **figure 3**) sont implantés comme quatre canaux complètement séparés sans aucun partage d'ampli-op entre les canaux. Non seulement cela simplifie le dessin du circuit imprimé, mais cela permet également de ne monter que les composants nécessaires pour une configuration de sortie audio donnée (c'est-à-dire 2 canaux avec des filtres passifs ou 4 canaux complets avec des filtres actifs. Notez que la différence de prix est minime).

Les quatre signaux analogiques qui servent au réglage des paramètres à l'intérieur du DSP sont connectés à MP9, MP2, MP3 et MP8 (ADC0 à ADC3, dans cet ordre). Selon la position d'un cavalier à souder (R16, R13, R7 et R9), le signal peut être un potentiomètre ou provenir du multiplexeur analogique (IC10 et IC11). Ce dernier est nécessaire car l'ESP32 n'a que deux sorties analogiques. Si un potentiomètre est acheminé vers le DSP, veillez à supprimer la résistance en série du multiplexeur correspondant (R44, R46, R47, R45). Dans ce cas, réglez également P5 de sorte que le côté chaud des potentiomètres soit à 3 V. Lorsque tous les potentiomètres sont connectés à l'ESP32, réglez P5 pour obtenir 3,15 V, afin d'améliorer légèrement leur plage dynamique au sein de l'ESP32.

Le bus I<sup>2</sup>S peut être un peu un casse-tête jusqu'à ce que vous le compreniez. L'ADAU1701 prend en charge les modes meneur et suiveur I<sup>2</sup>S, tout comme l'ESP32. Alors, qui sera meneur et qui sera suiveur ? Au moment du développement de ce projet, on n'avait pas le choix car les bibliothèques logicielles de l'ESP32 ne prenaient pas (encore) en charge le mode I<sup>2</sup>S suiveur. L'ESP32 devait donc être le meneur. Problème résolu ? Presque.

Un détail subtil (non documenté ?) de l'ADAU1701 est qu'il exige que les signaux d'horloge I<sup>2</sup>S soient synchronisés avec son horloge principale.



Si ce n'est pas le cas, il coupe les sorties audio, ce qui n'est pas du tout souhaitable. La seule façon d'assurer la synchronisation lorsque le DSP est suiveur I<sup>2</sup>S, est de le cadencer à partir de l'ESP32. C'est là que JP1 entre en jeu. Il permet de choisir la source d'horloge du DSP : le cristal X1 ou le signal MCLK de l'ESP32. Par conséquent, lorsque le bus I<sup>2</sup>S doit être utilisé, veillez à court-circuiter les broches 2 et 3 de JP1. Si le bus I<sup>2</sup>S n'est pas nécessaire, court-circuiter les broches 1 et 2 de JP1. L'ESP32 se présente sous la forme d'un ESP32-PICO-KIT, un module facile à utiliser qui intègre un convertisseur USB-série et une alimentation de 3,3 V. L'utilisation d'un module au lieu de monter l'ESP32 directement sur la carte principale permet d'éviter de nombreux problèmes d'adaptation d'antenne et d'autres problèmes de radiofréquence, et permet de ne monter le module qu'en cas de besoin. C58 n'est nécessaire que dans les rares cas où le module ESP32 ne démarre pas lorsqu'il n'est pas connecté à l'USB. S'il vous le faut, c'est que vous utilisez probablement un très vieux module.

Le DSP est alimenté par IC9 qui, à son tour, est alimenté soit par le port USB, soit par IC8. Le lecteur attentif se demandera pourquoi il n'y a pas de diode de protection comme D3 dans l'alimentation 5 V provenant du module ESP32. C'est parce que cette diode est déjà présente sur le module ESP32.

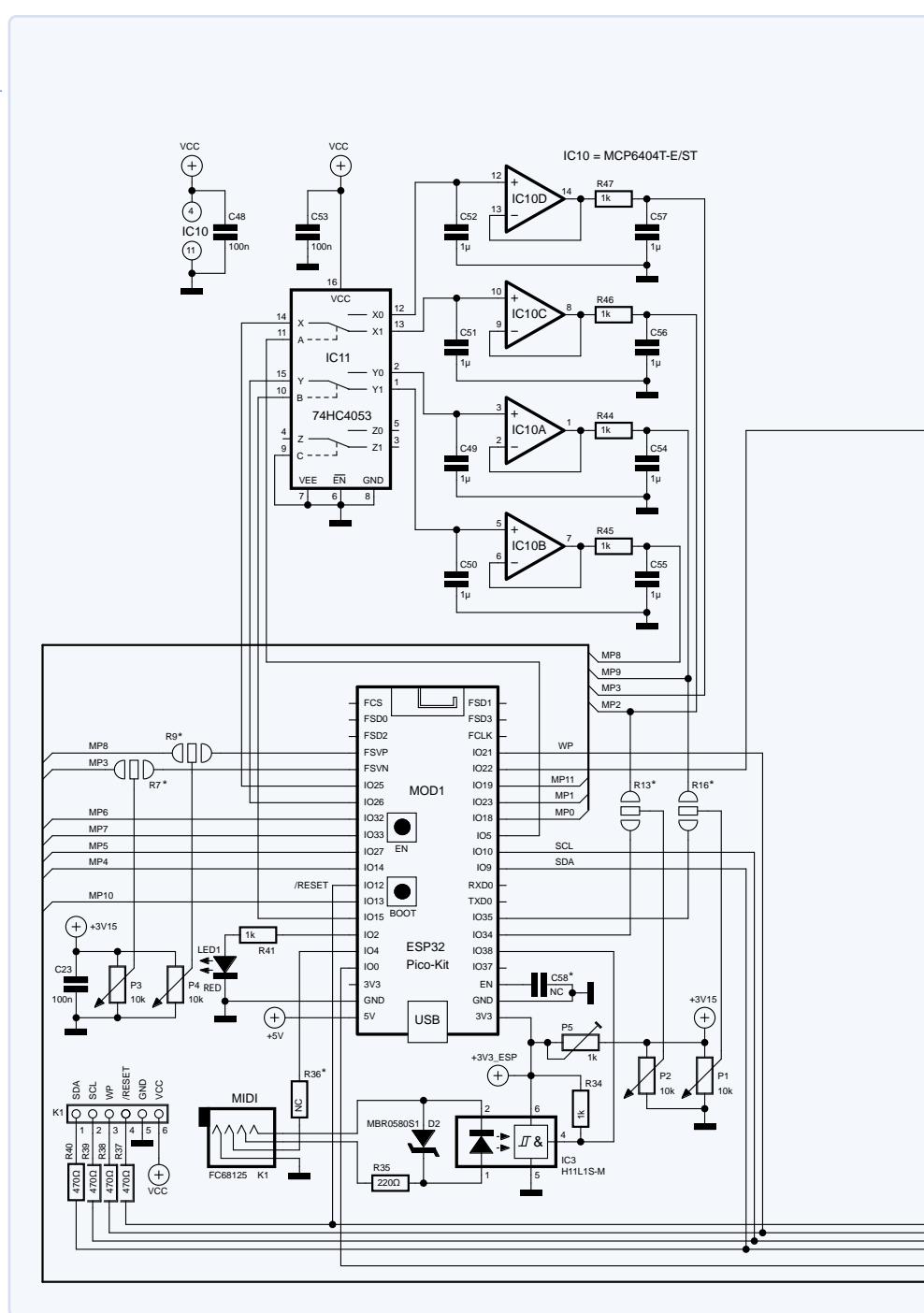
Concernant l'alimentation, T1 est nécessaire pour le régulateur de tension interne de 1,8 V du DSP. Comme la fiche technique du DSP suggère de l'utiliser, nous l'avons fait.

Les programmes pour le DSP peuvent être stockés dans IC7, l'EEPROM (appelée *E2Prom* dans SigmaStudio). Elle fournit beaucoup plus d'espace mémoire que ce qui est nécessaire pour un programme DSP, de sorte que l'ESP32 peut également l'utiliser pour stocker d'autres données. Elle est également accessible depuis le connecteur K1 via le bus I<sup>2</sup>C, et peut donc être lue et écrite par un dispositif externe tel qu'un Arduino UNO ou un Raspberry Pi Pico.

Un mot sur l'interface MIDI. Il s'agit d'une entrée isolée optiquement et d'une sortie non isolée, mais connectée à une prise jack 3,5 mm à 4 voies (TRRS, *tip-ring-ring-sleeve*) en raison des contraintes d'espace de la carte. La plupart des personnes intéressées par le MIDI n'auront besoin que de l'entrée et utiliseront un câble TRS. Un tel câble court-circuitera la sortie MIDI (broche R2 de K5) à la masse, c'est pourquoi R36 n'est pas montée par défaut. Montez R36 (82 Ω) pour activer la sortie et assurez-vous d'utiliser un câble approprié.

Programmable par l'utilisateur, la LED1 peut servir, entre autres, au débogage de logiciels ou comme indicateur de mode.

La consommation de courant dépend bien sûr fortement de l'application, mais elle est en moyenne de l'ordre de 200 mA pour une tension d'alimentation de 9 V<sub>CC</sub>.



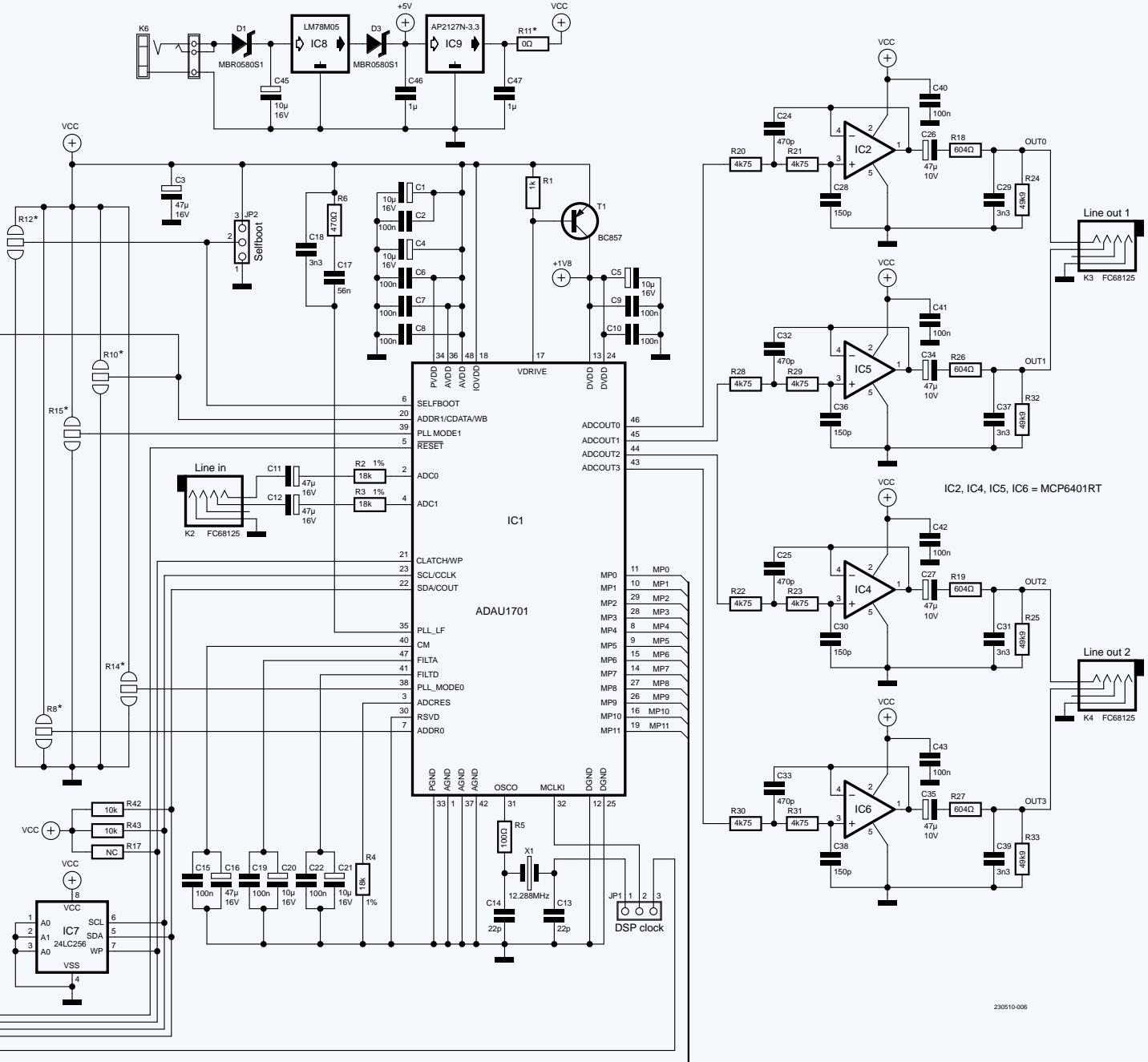


Figure 2. Schéma du processeur audio DSP FX. Le tout tient sur une carte d'environ 102 mm par 66 mm.

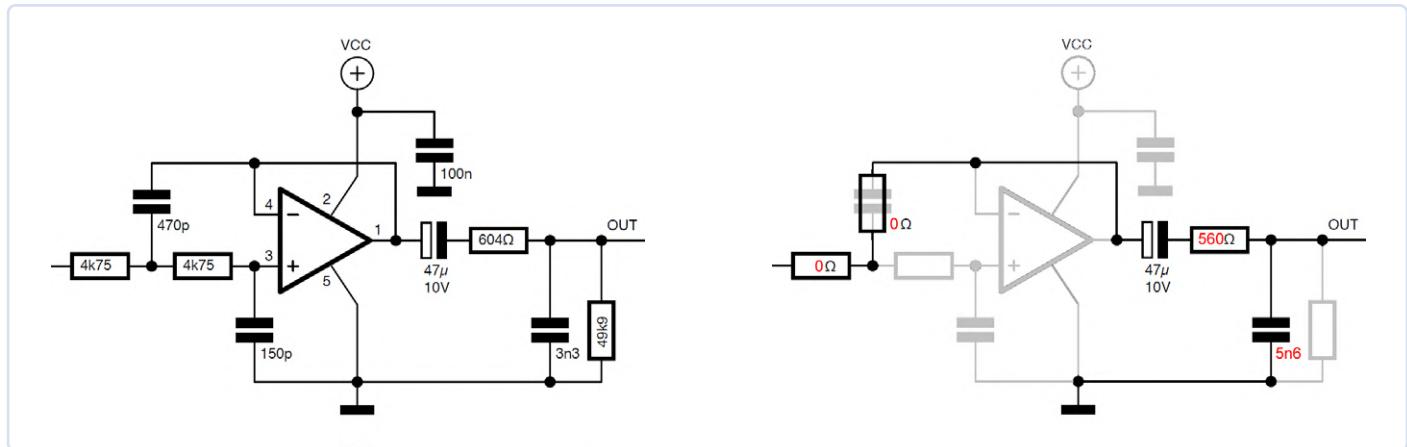


Figure 3. Les filtres de sortie actifs et passifs sont pris en charge par le processeur audio DSP FX.

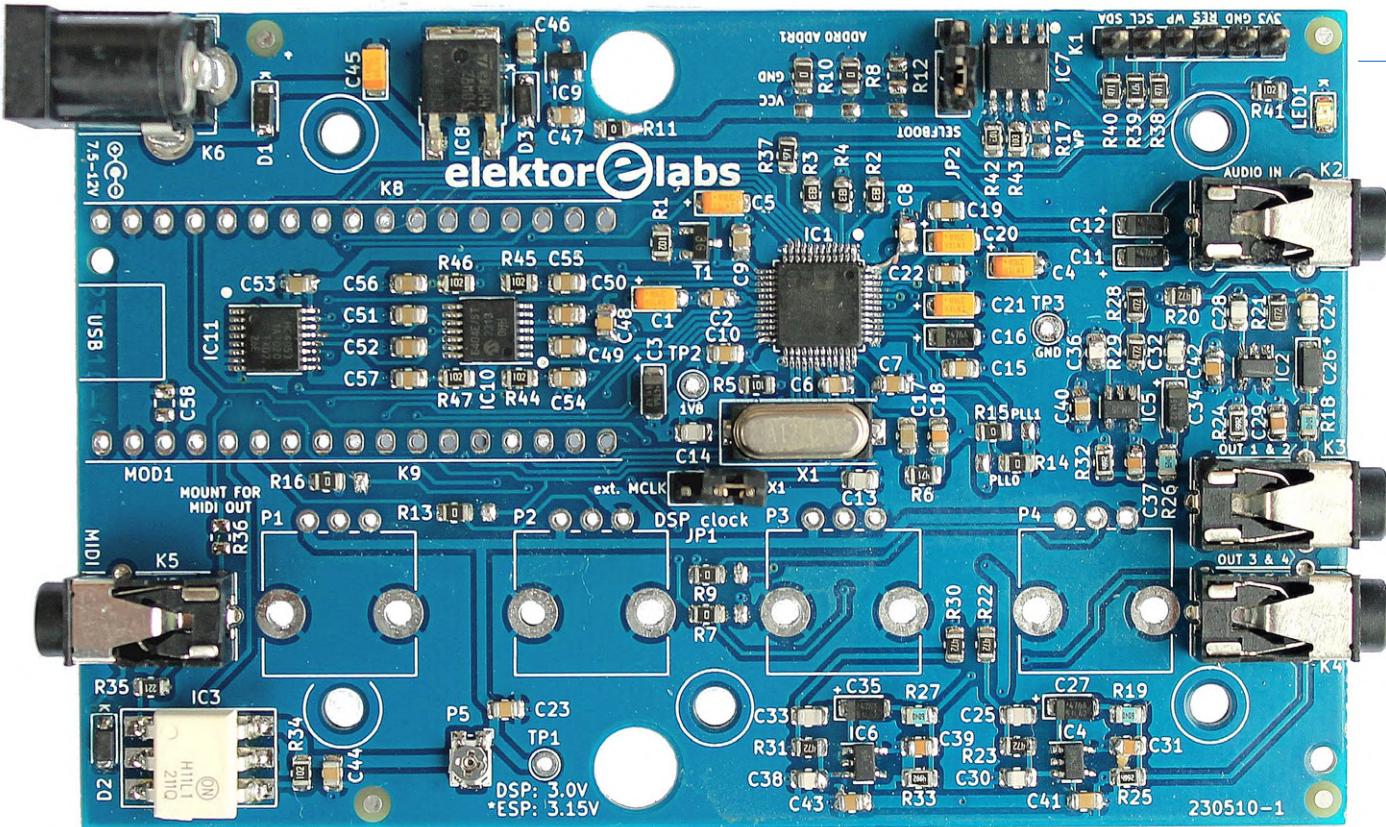


Figure 4. La carte configurée pour un fonctionnement autonome du DSP sans potentiomètres.

ADAU1701 Universal Audio DSP publiée en janvier 2014 (projet Elektor 130232). Les programmes pour le DSP sont créés dans SigmaStudio 4.7, exportés sous forme de fichier HEX, et chargés dans l'EEPROM via le connecteur K1 avec par exemple un Arduino UNO [1]. Placez le cavalier JP1 en position X1 (sur les broches 1 et 2, l'horloge du DSP est fournie par le cristal X1) et JP2 en position *Selfboot* (broches 2 et 3, indiquant au DSP de charger son programme à partir de l'EEPROM). Les cavaliers R7, R9, R13, R16 doivent être positionnés à droite, c'est-à-dire à l'opposé de leur nom sériographié sur la carte, pour permettre la commande du potentiomètre. Cette configuration permet d'ajouter des effets audio (réverbération, filtrage, etc.) au signal d'entrée. Les applications les plus courantes sont les filtres croisés pour haut-parleurs, rendus possibles par les quatre sorties audio indépendantes, et les effets pour guitare.

#### DSP avec programmeur EEPROM intégré

Comme le DSP seul, mais avec l'ESP32-Pico-Kit ajouté à la carte pour simplifier la programmation de l'EEPROM. Les programmes DSP peuvent maintenant être téléchargés par USB vers l'ESP32, qui les grave dans l'EEPROM. Outre la simplification de la programmation de l'EEPROM, cette configuration permet également de stocker plus d'un programme DSP. Par exemple, un serveur web fonctionnant sur l'ESP32 peut fournir une interface utilisateur permettant de choisir entre différents algorithmes DSP.

#### DSP avec OTA

Comme pour le DSP avec l'ESP32-Pico-Kit, mais dans ce cas, l'ESP32 fournit une connexion Wi-Fi à SigmaStudio pour télécharger les algorithmes du DSP *Over the Air* (OTA), sans exporter de fichiers HEX. C'est la façon la plus simple de programmer le DSP dans SigmaStudio, mais les programmes ne sont pas stockés dans l'EEPROM. Cette configuration est pratique pour développer et tester

de nouveaux algorithmes SigmaStudio à la volée. Placez JP2 sur les broches 1 et 2 pour indiquer au DSP de ne pas charger son programme à partir de l'EEPROM.

#### DSP comme DAC I<sup>2</sup>S

Dans cette configuration, l'ESP32-Pico-Kit est la source audio tandis que le DSP agit comme un convertisseur numérique-analogique (CNA) de haute qualité. Les données audios sont envoyées par I<sup>2</sup>S. Placer le cavalier JP1 en position *ext. MCLK* (sur les broches 2 et 3, l'horloge du DSP est fournie par l'ESP32). Pour plus de simplicité, placez JP2 en position *Selfboot* (sur les broches 2 et 3, le DSP charge son programme depuis l'EEPROM) et programmez le DSP avec un simple programme de transfert par I<sup>2</sup>S (inclus dans les téléchargements). Cette configuration convient aux lecteurs audio sans fil (Wi-Fi ou Bluetooth).

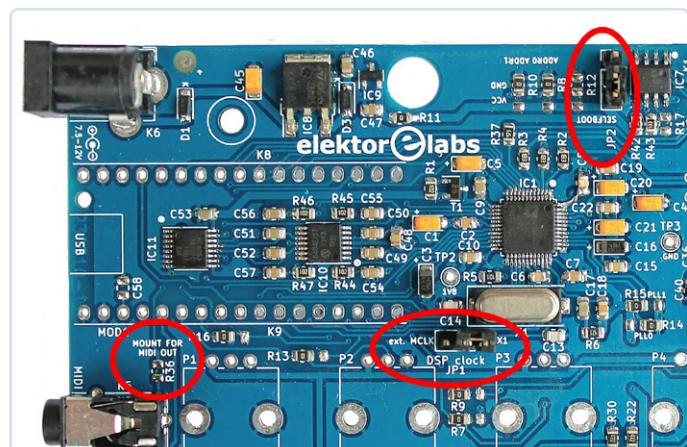


Figure 5. L'emplacement des cavaliers JP1 (au milieu) et JP2 (en haut). Dans le coin inférieur gauche, vous trouverez R36 qui active la sortie MIDI.



## Liste des composants

### Résistances (0805, 5%, 0.125 W)

R7, R8, R9, R10, R11, R13, R14, R15, R16 = 0  $\Omega$   
 R1, R34, R41, R44, R45, R46, R47 = 1 k $\Omega$  1%  
 R2, R3, R4 = 18 k $\Omega$  1%  
 R5 = 100  $\Omega$   
 R6, R37, R38, R39, R40 = 470  $\Omega$   
 R18, R19, R26, R27 = 604  $\Omega$  1%  
 R20, R21, R22, R23, R28, R29, R30, R31 = 4.75 k $\Omega$  1%  
 R24, R25, R32, R33 = 49.9 k $\Omega$  1%  
 R35 = 220  $\Omega$   
 R42, R43 = 10 k $\Omega$   
 P1, P2, P3, P4 = potentiomètres linéaires verticaux 10 k $\Omega$   
 P5 = potentiomètre 1 k $\Omega$   
 R12, R17, R36 = NC

### Condensateurs (0805)

C1, C4, C5, C20, C21, C45 = 10  $\mu$ F 16 V  
 C2, C6, C7, C8, C9, C10, C15, C19, C22, C23, C40, C41, C42, C43, C44, C48, C53 = 100 nF  
 C3, C11, C12, C16, C26, C27, C34, C35 = 47  $\mu$ F 10 V  
 C13, C14 = 22 pF  
 C17 = 56 nF  
 C18, C29, C31, C37, C39 = 3.3 nF  
 C24, C25, C32, C33 = 470 pF  
 C28, C30, C36, C38 = 150 pF  
 C46, C47, C49, C50, C51, C52, C54, C55, C56, C57 = 1  $\mu$ F  
 C58 = NC (100 nF si vous en avez vraiment besoin)

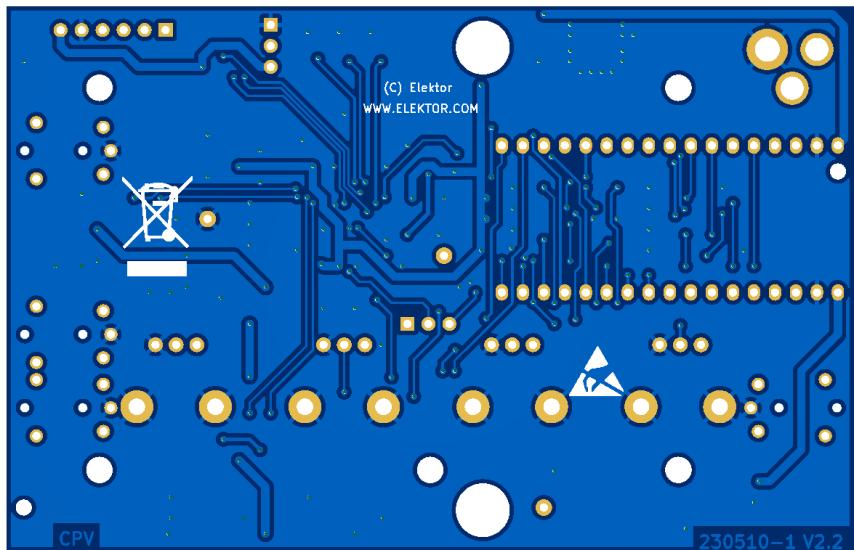
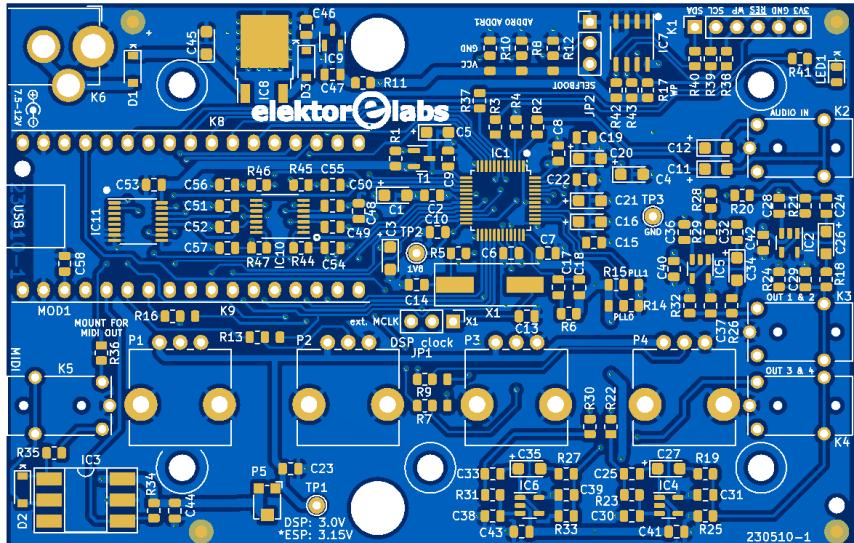
### Semi-conducteurs

D1, D2, D3 = MBR0580S1  
 IC1 = ADAU1701JSTZ  
 IC2, IC4, IC5, IC6 = MCP6401RT-E/OT  
 IC3 = H11L1S-M  
 IC7 = 24LC256  
 IC8 = LM78M05  
 IC9 = AP2127N-3.3  
 IC10 = MCP6404T-E/ST  
 IC11 = 74HC4053PW  
 LED1 = LED, rouge, 0805  
 T1 = BC857  
 MOD1 = Espressif ESP32-PICO-KIT

### Divers

JP1, JP2 = barrettes à 3 voies, pas de 0,1» + cavalier  
 K1 = barrette à 6 voies, pas de 0,1»  
 K2, K3, K4, K5 = Jack audio, 4 pôles (TRRS)  
 K6 = Jack  
 K8, K9 = embase à 17 voies, pas de 0,1»  
 X1 = 12,288 MHz, 20 pF

Circuit imprimé = Elektor 230510-1



Des effets sonores comme la réverbération ou la transposition de tonalité peuvent être ajoutés facilement en créant des algorithmes appropriés dans SigmaStudio et en les chargeant dans l'EEPROM du DSP. Les quatre potentiomètres sont disponibles pour le réglage des paramètres (veillez à ce que les résistances de pontage soient positionnées correctement). L'entrée audio analogique peut, bien entendu, être utilisée pour des applications de chant, karaoké ou autres mixages audio.

### Synthétiseur musical / Générateur de sons

Cette configuration est pratiquement la même que la précédente, sauf que l'ESP32 se charge de l'essentiel (voire de la totalité) du traitement du signal ; le DSP fonctionne comme un CNA audio I<sup>2</sup>S fantaisiste. L'ESP32 est le moteur (sonore) qui crée des sons à partir de rien en utilisant des algorithmes définis par l'utilisateur. Plusieurs bibliothèques de synthèse sonore sont disponibles en ligne, ce qui en fait un domaine intéressant à explorer. L'entrée MIDI vous permet de jouer le synthétiseur avec un clavier MIDI et de le commander avec, par exemple, des messages MIDI CC (Control Change ou Continuous Controller). Bien entendu, la commande sans fil est également possible, tout comme

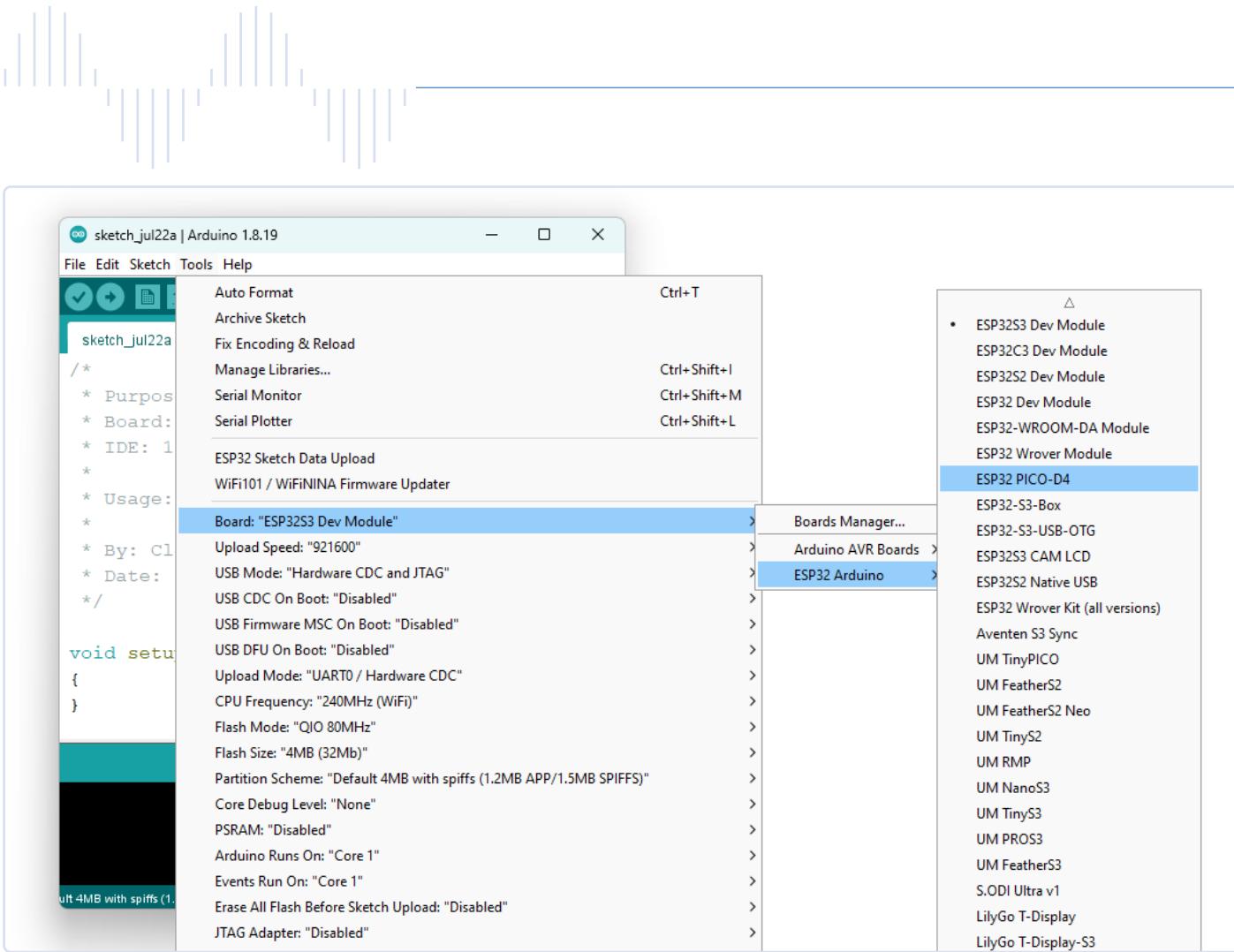


Figure 6. Le processeur audio DSP FX utilise l'ESP32 Pico-D4 comme «carte» dans l'EDI Arduino.

par liaison série. Les quatre potentiomètres offrent encore plus de possibilités de commande. Pour s'amuser encore plus, le DSP peut ajouter ses propres effets sonores.

#### Processeur d'effets audio (FX) avancé

Comme précédemment, mais au lieu d'utiliser l'ESP32 comme source sonore, il est maintenant utilisé comme processeur de signal numérique. L'ADAU1701 fournit les entrées et sorties audio. Il envoie le signal audio numérique par I<sup>2</sup>S à l'ESP32 où il est traité. Le résultat est renvoyé à l'ADAU1701, toujours par I<sup>2</sup>S. L'ADAU1701 se charge de la conversion numérique-analogique et émet jusqu'à quatre signaux audio analogiques. L'ADAU1701 peut bien sûr ajouter son propre (pré)traitement. Les paramètres des effets peuvent être commandés sans fil, en série, par MIDI et par les potentiomètres, et même par I<sup>2</sup>C si on le souhaite.

#### Autres

Cette configuration est destinée aux personnes qui ont acheté la carte mais sans avoir besoin de traitement audio. Placez JP1 en position *ext.* *MCLK* (broches 2 et 3) et JP2 sur les broches 1 et 2 (pas *Selfboot*) pour que le DSP ne consomme pas beaucoup d'énergie. Le module ESP32 peut être utilisé comme un serveur web, un pont MIDI USB-série, un pont USB-série I<sup>2</sup>C, un convertisseur MIDI-I<sup>2</sup>C, un convertisseur MIDI-analogique et vice-versa, un convertisseur analogique-numérique à 4 canaux, un capteur IoT ou un clignotant à LED. On peut dire que seule votre propre créativité vous limite.

#### Réglage des paramètres

Les effets audio comportent généralement un ou plusieurs paramètres réglables par l'utilisateur pour ajuster le son ou l'effet en temps réel. Le processeur audio DSP FX propose plusieurs méthodes pour ce faire, dont la plupart peuvent être utilisées simultanément.

#### I<sup>2</sup>C

Quelle que soit la configuration utilisée, le DSP peut toujours être commandé par I<sup>2</sup>C, soit par K1, soit par l'ESP32. Ce dernier étant connecté au même bus, il peut également être commandé par I<sup>2</sup>C si vous le souhaitez.

#### Potentiomètres

On peut équiper le processeur audio DSP FX de quatre potentiomètres. Ceux-ci peuvent être connectés soit au DSP, soit à l'ESP32. Lorsqu'ils sont connectés au DSP, ils peuvent être lus par les CAN auxiliaires de SigmaStudio (ADC1 à ADC4 dans le *bloc GPIO* de l'onglet *Register Control* de l'onglet *Hardware Configuration* d'un projet). Dans ce cas, enlevez R44 à R47.

Une méthode préférable, plus souple, consiste toutefois à connecter les potentiomètres à l'ESP32. L'appareil possède deux sorties analogiques qui sont transformées en quatre par multiplexage (IC10 et IC11) et qui sont connectées aux CAN auxiliaires du DSP (broches MP9, MP2, MP3 et MP8). Cela permet à l'ESP32 de commander les CAN auxiliaires du DSP par les potentiomètres ou d'une autre manière (par exemple,

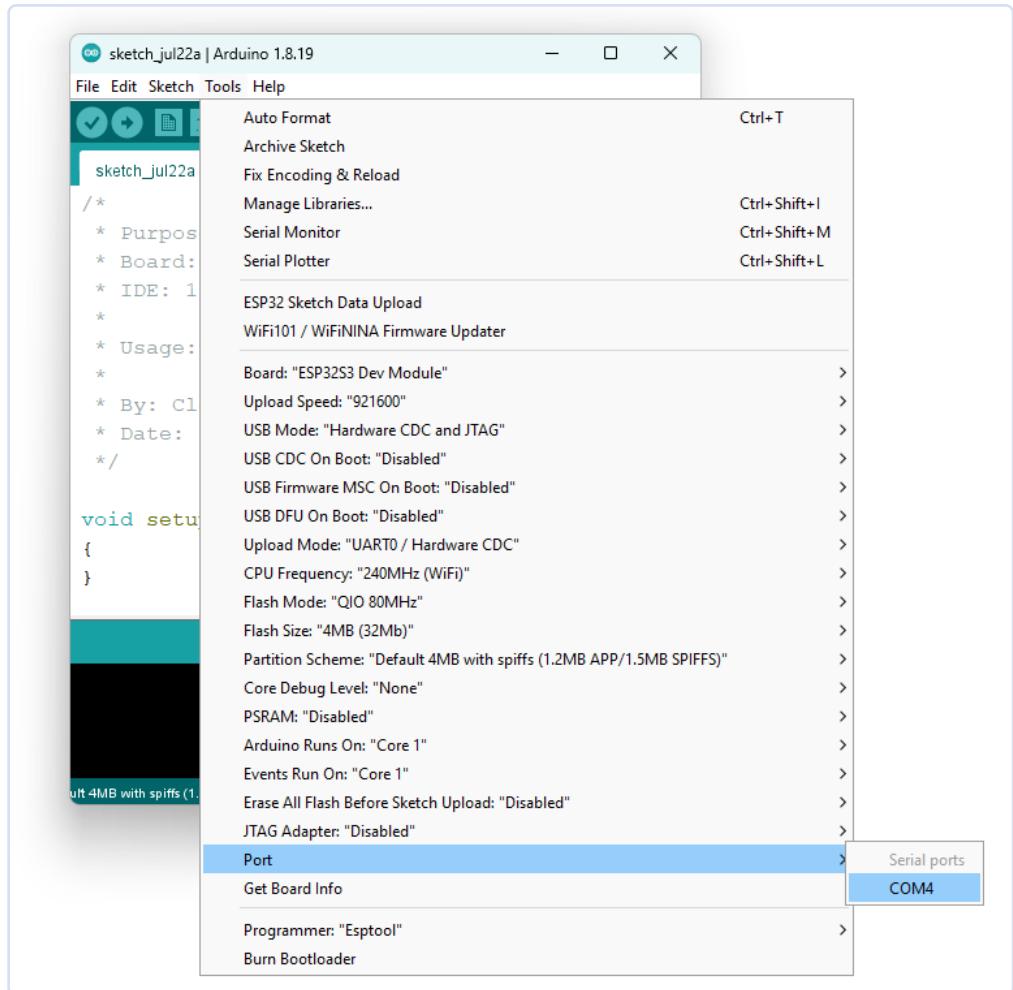


Figure 7. Choisissez le port série correspondant au module ESP32.

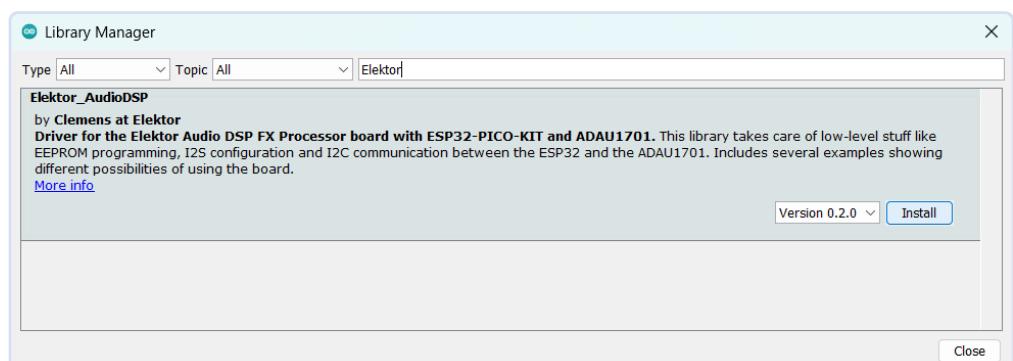


Figure 8. Installer la bibliothèque Elektor\_AudioDSP à l'aide du gestionnaire de bibliothèque intégré à l'EDI Arduino.

messages CC MIDI ou sans fil).

Notez que les sorties analogiques multiplexées peuvent également être utilisées comme sorties numériques (lentes), qu'on peut traiter par un algorithme DSP comme des interrupteurs ou des boutons-poussoirs.

### MIDI

L'entrée optiquement isolée de la carte (IC3) est destinée à l'entrée MIDI (mais on peut bien sûr aussi l'utiliser pour autre chose). Pour des raisons d'encombrement, le connecteur est un jack de 3,5 mm (connu dans le monde du MIDI sous le nom de TRS, pour *Tip, Ring, Sleeve*) et non un connecteur DIN à 5 voies. L'entrée MIDI vous permet de commander l'ESP32 et/ou le DSP avec un clavier ou une surface de contrôle.

Comme déjà dit, une sortie MIDI est également disponible. Montez R36 (82  $\Omega$ ) pour activer la sortie (**figure 5**). Faites attention à ce que vous connectez à K5 en raison de la faible valeur de R36. Il doit s'agir d'un jack 3,5 mm à 4 voies (TRRS) et non d'un type à 2 voies (mono ou TS) ou à 3 voies (stéréo ou TRS). Comme la sortie MIDI ne sera probablement pas utilisée par beaucoup de monde, R36 n'est pas monté par défaut pour éviter d'endommager l'ESP32.

### USB série

Le connecteur USB de l'ESP32-Pico-Kit est un port USB-série. Dans Arduino, il est disponible en tant que port série par défaut (alias *Serial*). Un ordinateur peut utiliser ce port pour communiquer avec l'ESP32, qui peut relayer des messages au DSP via I<sup>2</sup>C ou via les ports de réglage analogiques (MP2, MP3, MP8 et MP9) ou d'autres broches MP. Le port série peut également être utilisé pour fournir un pont MIDI ou I<sup>2</sup>C (sur K1).

### Sans fil

L'un des principaux attraits de l'ESP32 est, bien sûr, ses capacités sans fil. L'ESP32-Pico-Kit prend en charge le Wi-Fi 802.11b/g/n, le Bluetooth v4.2 BR/EDR et le Bluetooth LE. Pour les applications audio, la fonctionnalité Bluetooth est particulièrement intéressante car elle permet d'utiliser la carte comme un haut-parleur Bluetooth (émetteur ou récepteur), mais il est également possible de l'utiliser comme une source audio Bluetooth.

## Pour commencer

Au déballage, avec une EEPROM vide, la carte ne fait rien. La première étape consiste donc à charger un programme dans l'EEPROM. Il y a plusieurs façons de le faire, mais la plus simple est d'utiliser l'ESP32-Pico-Kit. Suivez les étapes ci-dessous.

### Préparer la carte

- Branchez le module ESP32-Pico-Kit sur la carte principale en orientant le connecteur USB vers le côté et l'antenne vers le centre.
- Placez un cavalier sur les broches 2 et 3 de JP2 (*Selfboot*).
- Un cavalier doit être placé sur JP1 (*DSP Clock*), mais sa position dépend de l'application. Les broches 1 et 2 (*X1*) sélectionnent le

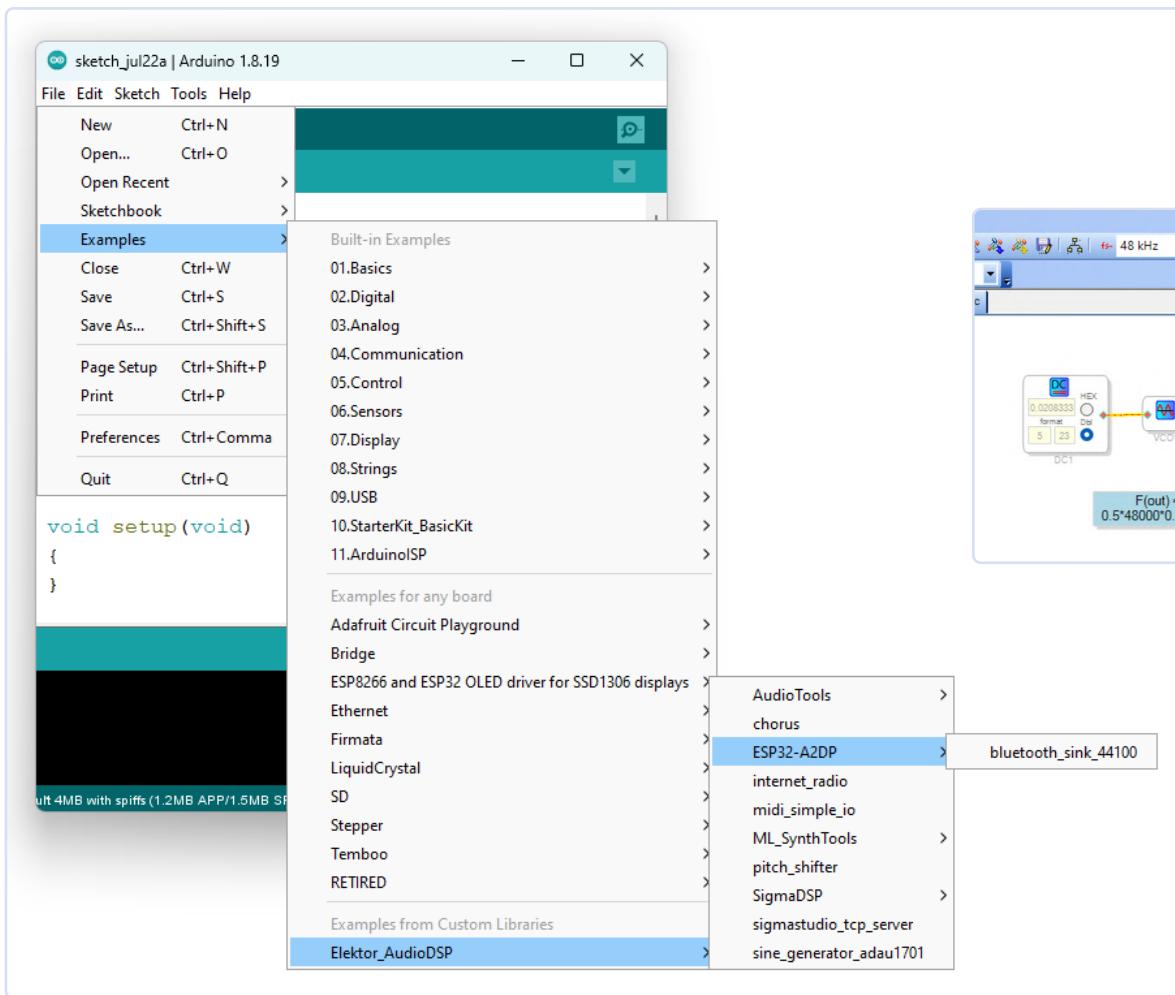


Figure 10. Un programme SigmaStudio [5] est en fait un diagramme de flux.

Figure 9. C'est ainsi que vous accédez aux exemples inclus dans la bibliothèque Elektor\_AudioDSP.

quartz X1. Utilisez cette position pour les applications qui n'ont pas besoin de l'ESP32 pour cadencer le DSP (à priori tout ce qui n'utilise pas la communication I<sup>2</sup>S entre le DSP et l'ESP32). Les positions 2 et 3 de JP1 (*ext. MCLK*) sélectionnent le signal MCLK de l'ESP32 comme horloge pour le DSP. C'est la position requise lors de l'utilisation de la communication I<sup>2</sup>S entre l'ESP32 et le DSP.

➤ Connectez le port micro-USB de l'ESP32-Pico-Kit à un port USB libre sur un ordinateur. La LED d'alimentation de l'ESP32-Pico-Kit doit s'allumer (rouge) et l'ordinateur doit détecter un nouveau port série. Si le port n'est pas trouvé, installez le pilote du convertisseur USB-série CP2101 monté sur l'ESP32-Pico-Kit. Pour plus de détails, voir [3].

#### Préparez votre ordinateur

➤ Lancer l'EDI Arduino (ce projet a été développé en utilisant la version 1.8.19 de l'EDI).  
 ➤ Dans le menu *Outils*, sélectionnez la carte *ESP32 PICO-D4* (**figure 6**). Si l'ESP32 PICO-D4 ne figure pas dans la liste des cartes, installez d'abord le package de cartes ESP32. Pour plus de détails sur la manière de procéder, veuillez-vous référer au tutoriel [2]. Notez qu'il est fortement recommandé d'installer une version antérieure à 3.0.0 (par exemple 2.0.17) car certains pilotes ont été complètement révisés dans la version 3.0.0 (par exemple I<sup>2</sup>S, ADC, et DAC). Il faudra un certain temps avant que les autres bibliothèques utilisant ces périphériques n'intègrent les modifications. Nous avons également observé une expansion du code avec des applications basées sur la version 3.0.x. qui ne tiendront plus dans la mémoire du module ESP32.

➤ Une fois installé le package de cartes, vous devriez pouvoir sélectionner l'*ESP32 PICO-D4*.  
 ➤ Dans le menu *Outils*, sélectionnez le port approprié (**figure 7**).  
 ➤ Dans l'EDI Arduino, ouvrez le gestionnaire de bibliothèques (*menu Outils* → *Gérer les bibliothèques...*). Recherchez *Elektor*. Vous devriez trouver une bibliothèque nommée *Elektor\_AudioDSP* (**figure 8**). Installez-la. Par défaut, la version la plus récente sera installée. Normalement, il n'y a aucune raison d'installer une version plus ancienne, à moins que vous ne vouliez plus de bogues et moins d'options. La bibliothèque peut également être téléchargée depuis GitHub [4] et installée manuellement.

#### Exemples d'application

Vous êtes maintenant prêt à créer et à charger des programmes dans le processeur Audio DSP FX. Pour vous aider à démarrer, la bibliothèque *Elektor\_AudioDSP* est accompagnée d'une collection d'exemples. Ouvrez un exemple en cliquant sur *Fichier* → *Exemples* et en faisant défiler la page jusqu'à la section *Exemples dans bibliothèques personnalisées*. Vous devriez y trouver une entrée pour la bibliothèque *Elektor\_AudioDSP*. Cliquez dessus et choisissez un exemple (**figure 9**). Notez que les entrées avec une flèche vers la droite (par exemple *AudioTools*) requièrent une bibliothèque tierce portant le nom de l'entrée. Cela signifie que les exemples du sous-menu *AudioTools* nécessitent la bibliothèque *AudioTools*. Certaines de ces bibliothèques peuvent être installées via le gestionnaire de bibliothèques de l'EDI comme décrit ci-dessus, mais pas toutes. Le lien vers la bibliothèque est inclus dans le croquis. Un exemple consiste en un croquis Arduino et, dans la plupart des cas, en un exécutable pour le DSP à charger dans l'EEPROM de la carte.

Les commentaires en tête du croquis vous indiquent comment régler les cavaliers de la carte et comment utiliser l'exemple. L'exemple s'occupe de tout. Il suffit de charger un croquis et de l'envoyer sur la carte. Si l'EEPROM a besoin d'être programmée, le croquis le fera automatiquement.

**Important :** Veuillez lire les commentaires en haut d'un croquis d'exemple car ils contiennent des informations pour la configuration de la carte !

## Essayons un exemple

Pour illustrer l'utilisation d'un exemple, chargeons *sine\_generator\_adau1701*. Après avoir téléchargé ce croquis sur la carte, il programmera l'EEPROM (alias « E2Prom ») avec l'algorithme DSP *i2s\_pass\_through\_48000*. Son nom ne l'indique pas, mais cet algorithme transforme le DSP en un générateur d'ondes sinusoïdales commandé en tension, dont la sortie se trouve sur le connecteur K4 (et non K3). La fréquence de l'oscillateur est réglée par P1, connecté à l'ESP32. Dans la boucle principale, les quatre potentiomètres sont lus et leurs valeurs sont imprimées sur le port série. Ces valeurs sont également envoyées sous forme de tension aux entrées de commande du DSP. Après avoir programmé l'EEPROM (cela prend environ une seconde), la LED de la carte commence à clignoter à une fréquence de 1 Hz. Si vous réinitialisez le croquis, l'EEPROM ne sera pas programmée à nouveau (à moins que son contenu ne soit différent), et la LED commence à clignoter presque immédiatement après la réinitialisation.

Voici les instructions (tirées du croquis) pour que tout fonctionne :

- Régler JP1 (*horloge DSP*) sur la position *X1* (broches 1 et 2)
  - Régler JP2 en position *Selfboot* (broches 2 et 3)
  - Utiliser P5 pour ajuster TP1 à 3,15 V
  - Charger le croquis sur l'ESP32
  - Attendre que la LED1 commence à clignoter à une fréquence de 1 Hz
  - Branchez un casque ou un amplificateur sur K4 (pas sur K3) et profitez-en.
  - P1 règle la fréquence

## Exemples de SigmaStudio

Les exemples qui utilisent un programme DSP comprennent le projet SigmaStudio [5] (**figure 10**). Après avoir installé la bibliothèque *Elektor\_AudioDSP*, vous trouverez les exemples dans :

[path-to-your-Arduino-folder]\sketchbook\libraries  
Elektor\_AudioDSP\examples\

Une collection d'exécutables DSP précompilés se trouve dans le fichier *adau1701\_e2prom\_collection.h* inclus dans la bibliothèque *Elektor\_AudioDSP*. Les fichiers de projet SigmaStudio utilisés pour générer ces exécutables se trouvent dans le dossier *extra* de la bibliothèque. Sont inclus deux exécutables génériques qui transmettent simplement les données audios de l'ESP32 à l'ADAU1701 en utilisant I<sup>2</sup>S :

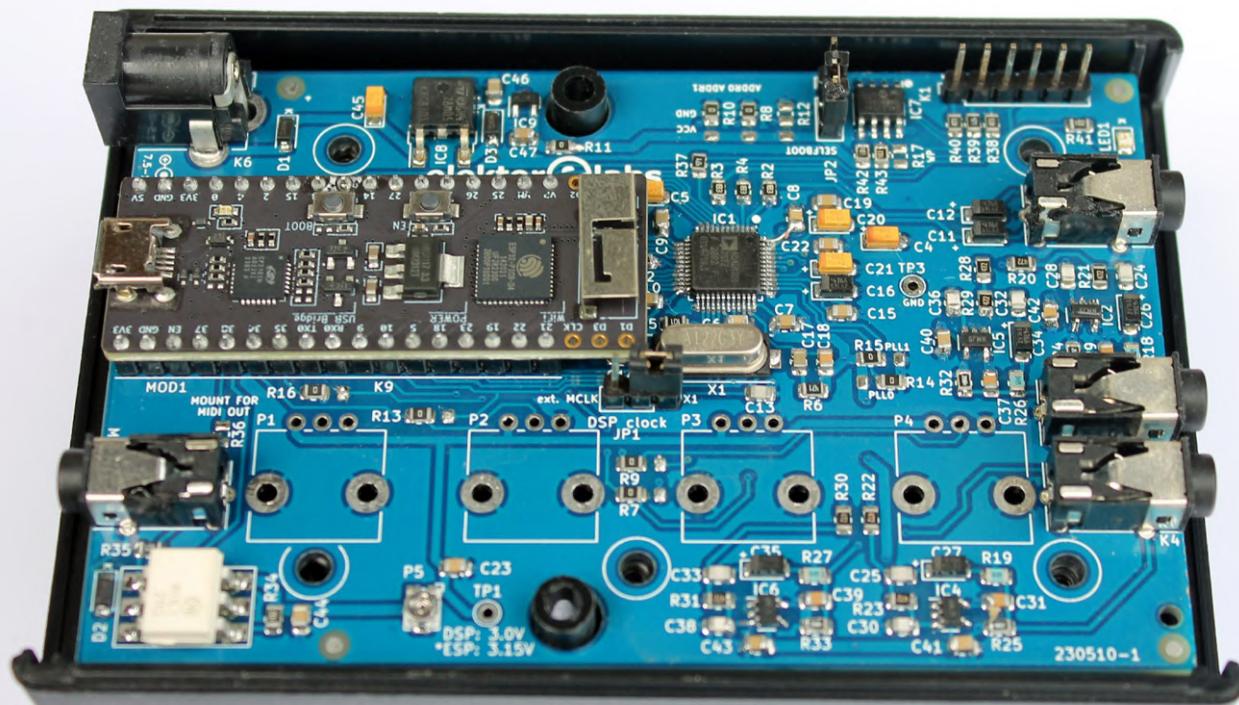


Figure 11. Le processeur audio DSP FX s'insère dans un boîtier de type Hammond 1593N. Pour permettre la fermeture du couvercle, le module ESP32 doit être monté sans barrettes.

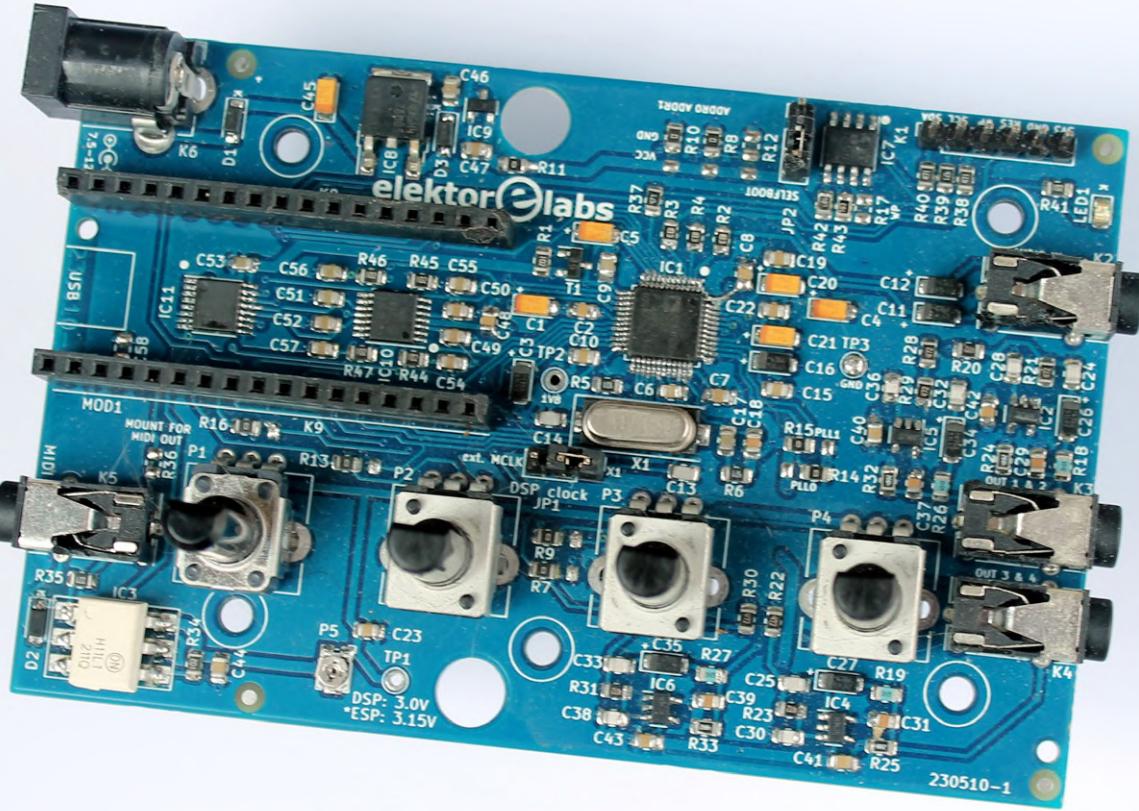


Figure 12. La carte avec les connecteurs et les potentiomètres montés.

*i2s\_pass\_through\_44.1khz* et *i2s\_pass\_through\_48khz*. La seule différence entre eux est la fréquence d'échantillonnage. Ces deux exécutables transforment le DSP en une sortie audio stéréo sur le connecteur K3 (avec un générateur de sinus sur le connecteur K4). JP1 doit être en position *ext. MCLK*.

## À suivre...

C'est tout pour l'instant. Cet article a présenté beaucoup d'informations et, nous l'espérons, suffisamment pour vous permettre de démarrer. Dans le prochain article, nous irons plus loin dans la création de vos propres applications pour la carte Audio DSP FX Processor. ↗

VF : Denis Lafourcade — 230510-04

## À propos de l'auteur

Clemens Valens a commencé à travailler pour Elektor en 2008 et a occupé plusieurs postes depuis. Il fait actuellement partie de l'équipe de développement de produits. Ses principaux centres d'intérêt en électronique sont le traitement du signal (numérique) et ses applications dans la production musicale et la synthèse sonore.



## Produits

- **ESP32-PICO-KIT**  
[www.elektor.com/18423](http://www.elektor.com/18423)
- **Elektor Audio DSP FX Processor**  
[www.elektor.fr/20895](http://www.elektor.fr/20895)
- **Dogan & Ahmet Ibrahim, *Practical Audio DSP Projects with the ESP32*, (Elektor, 2023)**  
[www.elektor.fr/20558](http://www.elektor.fr/20558)

## LIENS

- [1] Ramkumar Ramaswamy, «carte DSP audio universelle à ADAU1701» Elektor 1-2/2014 :  
<https://www.elektrormagazine.fr/magazine/elektor-201401/24299>
- [2] ESP32 FAQ, How-to & Getting Started: <https://www.elektrormagazine.fr/esp32-faq>
- [3] Pilotes VCP CP210x USB to UART Bridge : <https://www.silabs.com/developers/usb-to-uart-bridge-vcp-drivers>
- [4] The Elektor\_AudioDSP library at GitHub: [https://github.com/ClemensAtElektor/Elektor\\_AudioDSP](https://github.com/ClemensAtElektor/Elektor_AudioDSP)
- [5] Obtenir SigmaStudio (pas SigmaStudio +) : <https://www.analog.com/sigmastudio>
- [6] Audio DSP FX Processor sur Elektor Labs : <https://www.elektrormagazine.fr/labs/audio-dsp-fx-processor>



# SPECTRAN® V6

## XPR

REAL-TIME SPECTRUM ANALYZER

## Mastering **Microwave** Measurements

WR08  
**90 - 140 GHz**

WR10  
**75 - 110 GHz**

WR12  
**60 - 90 GHz**

WR15  
**50 - 75 GHz**

RTBW  
**490 MHz**



Sweep Speed  
**3 THz/s**

ADC  
**16-Bit**

DANL\*  
**-170 dBm/Hz**

- **World's first** USB real-time 140 GHz spectrum analyzer
- WR08 | WR10 | WR12 | WR15 waveguide connectors
- Analyze important standards like **5G** or **radar**
- **Record-breaking** USB real-time bandwidth of 490 MHz

- **24/7 recording** and analyzing of IQ-data
- **16-Bit 2 GSPS ADC**
- **Single USB-C** connection incl. power
- **Windows and Linux** software included

\*Depending on frequency

MADE IN GERMANY

www.aaronia.com  
mail@aaronia.de  
+49 6556 900 310

Aaronia AG  
Aaroniaweg 1  
D-54597 Strickscheid

**AARONIA AG**  
WWW.AARONIA.DE

# 50 ANS

## d'Elektor en anglais

Brian Tristam Williams (Elektor)

Depuis qu'Elektor a lancé son édition anglaise en 1974, le magazine est devenu un incontournable pour tous ceux qui souhaitent mettre la main à la pâte en matière d'électronique. De l'ordinateur SC/MP des années 70 aux projets IA et IdO d'aujourd'hui, le magazine a toujours mis des circuits utiles et innovants entre les mains des amateurs et des professionnels.

Aujourd'hui, 50 ans plus tard, Elektor continue de donner aux électroniciens les outils pour explorer, construire et innover avec chaque nouveau numéro.

Depuis qu'Elektor a lancé son édition anglaise en 1974, le magazine est devenu un incontournable pour tous ceux qui souhaitent mettre la main à la pâte en matière d'électronique. De l'ordinateur SC/MP des années 70 aux projets IA et IdO d'aujourd'hui, le magazine a toujours mis des circuits utiles et innovants entre les mains des amateurs et des professionnels. Aujourd'hui, 50 ans plus tard, Elektor continue de donner aux maker les outils

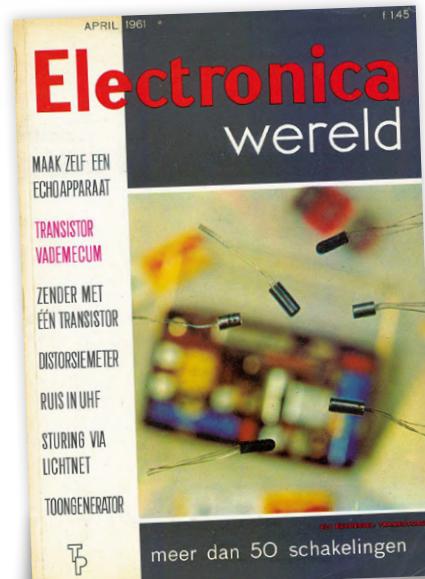


Figure 1. Comment tout a commencé - la première édition du magazine néerlandais Electronica Wereld en avril 1961.

pour explorer, construire et innover avec chaque nouveau numéro.

### Les débuts d'Elektor : Une communauté de maker

Le magazine se concentrat sur des projets électroniques utiles, offrant aux amateurs et aux professionnels un moyen d'explorer l'électronique de pointe à la maison. Il est devenu particulièrement populaire pour son approche « DIY », fournissant des schémas de circuits détaillés et mettant des circuits imprimés à la disposition des lecteurs pour qu'ils puissent recréer les projets.

L'édition anglaise d'Elektor a été lancée avec une lettre d'introduction de Van der Horst, qui commençait ainsi : « Il s'agit de la première édition anglaise

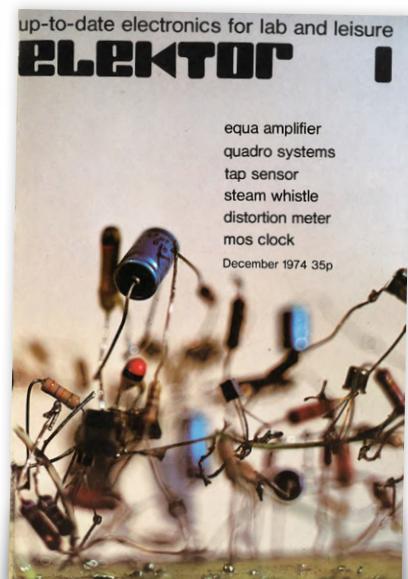


Figure 2. 13 ans plus tard, Elektor commence à publier en anglais.

d'Elektor, un magazine qui présente l'électronique sous un jour nouveau. L'édition néerlandaise d'Elektor est publiée depuis plus de 14 ans et l'édition allemande depuis plus de 4 ans. Chaque mois, 120 000 exemplaires trouvent leur chemin vers des lecteurs qui vont de l'amateur enthousiaste à l'électronicien professionnel. » [1] Elektor peut désormais atteindre un public mondial et devient rapidement une ressource de premier plan pour les ingénieurs, les étudiants et les amateurs.

### Une nouvelle ère pour le bricolage électronique

Elektor English a démarré sur les chapeaux de roues et a continué à se concentrer sur des projets ambitieux et pratiques qui



Figure 3. Novembre 1977 marque la publication de l'ordinateur SC/MP.

démocratisaient l'accès à l'électronique de pointe. L'équipe éditoriale encourage les amateurs à construire leur propre équipement. L'Elektorscope (décembre 1976) permet au lecteur de créer un oscilloscope - un outil essentiel dans les laboratoires d'électronique, mais généralement trop cher pour les amateurs de l'époque [2]. L'un des premiers projets emblématiques a été l'ordinateur SC/MP (figure 3 - novembre 1977). Il a initié les amateurs à la technologie des microprocesseurs, leur permettant de construire leurs propres ordinateurs à une époque où les ordinateurs personnels étaient loin d'être courants. Ce projet, basé sur la puce SC/MP (Simple, Cost-effective Micro Processor - "scamp") de National Semiconductor, a constitué une avancée majeure pour de nombreux amateurs désireux d'explorer l'informatique à une époque où les ordinateurs domestiques étaient à peine disponibles [3]. Et tout n'était pas numérique. Le projet *Formant Music Synthesizer* a été publié sous forme de série à partir de mai 1977 (figure 4) [4]. Avec suffisamment de montages pour remplir un livre, la série s'adressait au monde émergent de la musique électronique. Ce kit de synthétiseur analogique à réaliser soi-même, qui «brisait les règles» est devenu un projet déterminant pour les musiciens et les amateurs, leur permettant d'explorer la conception sonore à partir de leur propre équipement. Le kit est aujourd'hui légendaire, et des influenceurs tels que Look Mum No Computer redécouvrent ce trésor enfoui et nous en parlent dans un épisode de juillet 2024 d'Elektor Engineering Insights [5].

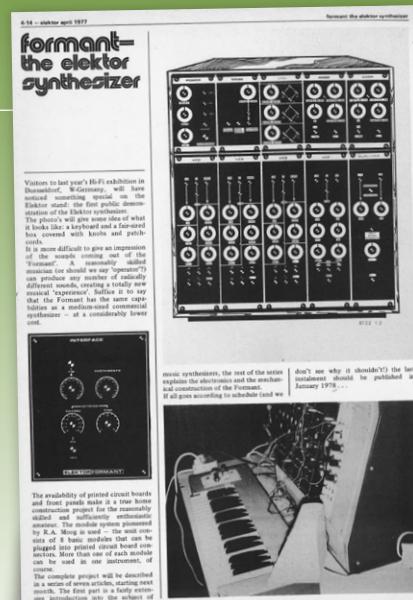


Figure 4. Formant - Le synthétiseur musical Elektor est encore emblématique aujourd'hui.

L'Elektor TV Games Machine (figure 5 - avril 1979) a capté l'enthousiasme de la première révolution des jeux vidéo. Il permettait aux lecteurs de construire leurs propres consoles de jeux, avec des cartouches ! [6] Lorsque les micro-ordinateurs ont pris leur essor dans les années 1980, Elektor a été à l'avant-garde de ce mouvement. Le Junior Computer (figure 6 - mai 1980), un kit de bricolage basé sur le 6502, repousse encore les limites. Avec 1 Ko de RAM et 1 Ko de ROM, cette machine simple permettait aux utilisateurs d'écrire leurs propres programmes et de se plonger dans la technologie des microprocesseurs. Il ne s'agissait pas seulement de kits, mais d'outils éducatifs qui démystifiaient le domaine en pleine expansion de l'informatique. [7]

Dans le monde de l'audio analogique, l'amplificateur Mini Crescendo (1984)

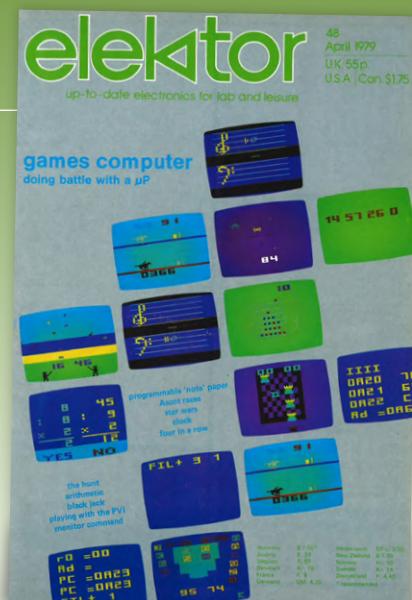


Figure 5. La TV Games Machine d'Elektor s'est heurtée à des concurrents tels qu'Atari et Intellivision.

est devenu un élément essentiel pour les audiophiles. Il offrait aux utilisateurs un système audio puissant et de haute fidélité qui pouvait être construit à partir de zéro, à un coût bien inférieur à celui des systèmes grand public. [8]

Le magazine est également connu pour ses projets audacieux qui repoussent les limites. Le décodeur ATN-Filmnet (mai 1987) a été l'un des plus controversés, car il offrait un moyen de pirater les chaînes de télévision payantes. Cette controverse a été bien accueillie, puisqu'elle a conduit à la première vente de l'édition anglaise d'Elektor, montrant à quel point le magazine était prêt à aller loin pour impliquer ses lecteurs, même dans les zones d'ombre [9]. Quelques numéros plus tard, nous avons déjà mis à jour le circuit :

« Croyez-le ou non, mais quelques jours après l'envoi de notre numéro de mai à l'imprimerie, les ingénieurs d'ATN Filmnet ont modifié le système de brouillage de la station. »

Je venais de rater tout cela lorsque les années 90 sont arrivées et que j'ai découvert Elektor. J'avais 16 ans lorsque l'édition de septembre est sortie, et elle contenait exactement le projet dont j'avais besoin : J'avais un tube cathodique de jeu d'arcade RVB uniquement et la carte contrôleur associée, intégrés dans un meuble en bois, et je voulais y regarder la télévision et des cassettes vidéo. C'est ainsi qu'est né le convertisseur S-VHS/CVBS vers RVB [10], en deux parties (figure 7 - octobre 1990). J'ai acheté mon premier Elektor, commandé le circuit imprimé, construit le circuit, et depuis, je suis accro à l'électronique DIY.

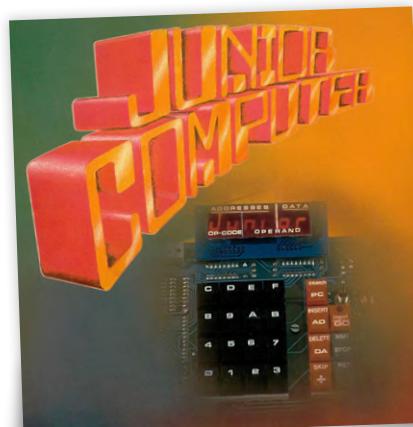


Figure 6. L'ordinateur junior a fait l'objet de notre couverture en mai 1980.

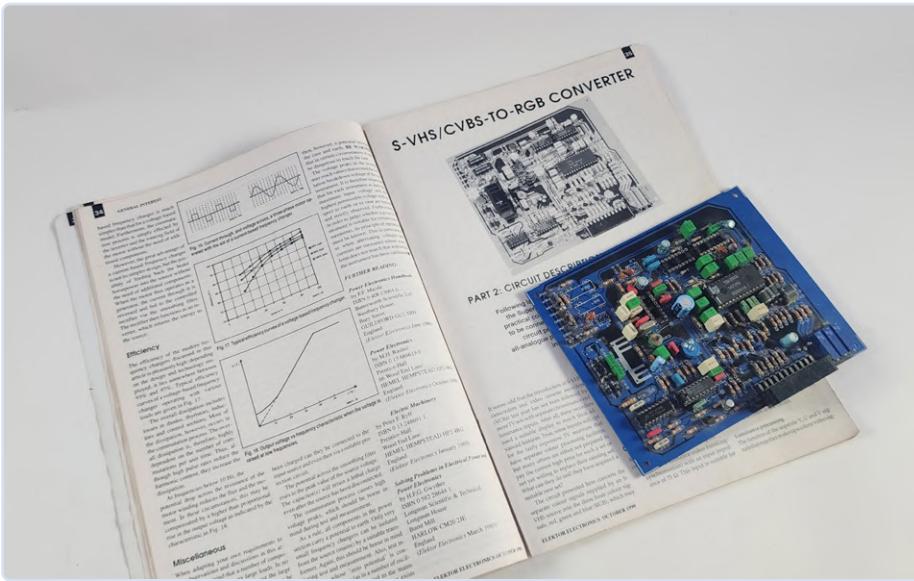


Figure 7. J'ai toujours mon premier projet Elektor, publié en deux parties en 1990.

Les années 90 ont vu l'explosion d'internet. Bien qu'il ait existé pour les passionnés dans les universités depuis 1983, la création du World Wide Web l'a rendu attrayant pour les particuliers et les entreprises. Elektor a vu naître le Web 1.0 et a également couvert des sujets plus centrés sur l'informatique, en proposant des tutoriels et des projets qui intégraient des ordinateurs avec d'autres appareils électroniques. Le projet Filmnet Decoder, par exemple, a été mis à jour plusieurs fois à mesure que les systèmes de brouillage de la télévision évoluaient, démontrant l'adaptabilité d'Elektor à jouer la carte de la « survie du plus fort ». En 2000, les équipements de test ont reçu un nouvel élan avec le lancement de l'oscilloscope à échantillonnage numérique pour Game Boy (GBDSO) (figure 8 - octobre 2000). Il a permis aux lecteurs de transformer des appareils de tous les jours, tels que la Game Boy de Nintendo, en d'autres outils puissants [11].

Elektor a continué à accueillir à bras ouvert la révolution des microcontrôleurs. Bien que les microcontrôleurs existent depuis le Texas Instruments TMS1000 de 1971, il y a eu une période de quelques années où ils sont devenus légèrement hors de portée des amateurs. Les ordinateurs sont passés d'interfaces de type DOS et RS-232 à des interfaces graphiques protégées et USB, faisant de la programmation une entreprise plus coûteuse et propriétaire... Jusqu'à ce qu'Arduino la ramène, en 2005. Il était « destiné aux artistes, aux concepteurs et aux amateurs, ainsi qu'à tous ceux qui s'intéressent aux applications interactives » [12]. Cette période a vu l'essor du matériel open-source, Elektor publiant de nombreux projets basés sur Arduino, permettant

aux amateurs d'expérimenter avec des systèmes embarqués. Une pléthore de projets dont le nom se termine par « ino » a vu le jour, comme le projet « Arduino + Theremin = Theremino » (figure 9 - novembre 2009) [13].

Arduino ayant rendu les microcontrôleurs à nouveau cool, il restait un vide sur le marché : dans les années 80, on pouvait acheter un ordinateur, le ramener à la maison, le brancher sur la télévision et apprendre immédiatement à le programmer. C'est ainsi qu'est né le Raspberry Pi : comme moi, Eben Upton, nostalgique de l'éthique des années 80, a décidé de lancer le Raspberry Pi le jour du Leap Day, en 2012. Elektor n'a pas perdu de temps et le Pi et Eben ont fait leurs débuts dans l'édition suivante (figure 10 - avril 2012) [14].

Avec l'aide d'Arduino et de Raspberry Pi, les années 2010 ont été marquées par l'explo-

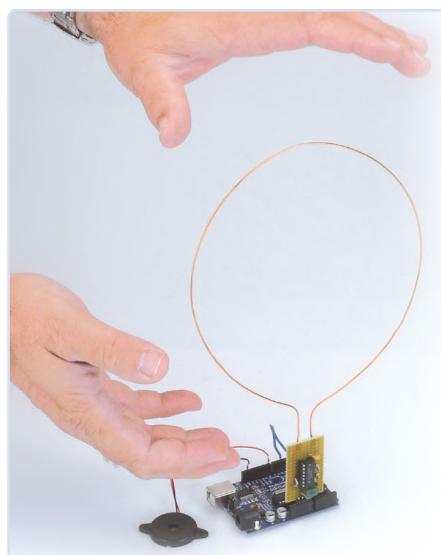


Figure 9. Le Theremino est basé sur Arduino.



Figure 8. Oscilloscope numérique d'échantillonnage Game Boy (GBDSO).

sion de l'Internet des objets (IoT), et Elektor n'a pas tardé à proposer des projets qui s'inscrivaient dans cette tendance. Des systèmes domotiques aux réseaux de capteurs sans fil, Elektor a fourni aux lecteurs les outils nécessaires pour construire des appareils connectés.

Des sujets tels que Linux embarqué, offrant aux lecteurs des plates-formes de développement abordables et flexibles, ont également été abordés. La décennie a vu un renouveau du mouvement DIY, Elektor continuant à donner aux maker les moyens de repousser les limites de leurs créations. L'orientation pédagogique s'est élargie avec l'ajout de tutoriels sur les microcontrôleurs tels que le STM32, ainsi que sur le développement de FPGA, reflétant ainsi l'intérêt croissant pour l'électronique embarquée. Dans les années 2020, Elektor a élargi son champ d'action à l'IA, à l'informatique en périphérie et à l'apprentissage automatique. Les lecteurs pourront explorer des projets impliquant des réseaux neuronaux et des applications pilotées par l'IA, repoussant



Figure 10. Première apparition du Raspberry Pi dans Elektor, avril 2012.

ainsi les limites de ce que les amateurs peuvent réaliser avec l'électronique embarquée.

Le développement durable est également devenu un thème central, avec des projets liés aux énergies renouvelables, à l'énergie solaire et aux systèmes à haut rendement énergétique. Cela reflète l'importance croissante de l'électronique écologique et de la durabilité dans la communauté des maker.

### Les 50 prochaines années

À l'aube de nos 50 prochaines années, l'accent reste fermement mis sur l'innova-

tion et l'avenir de la technologie. Les produits de base tels que les oscilloscopes et la conception de FPGA sont toujours d'actualité, et *Elektor* continue de couvrir des domaines passionnants tels que l'IdO, les systèmes embarqués, l'IA, l'impression 3D, les énergies renouvelables et l'informatique quantique, pour n'en citer que quelques-uns.

Ce sont là de nouvelles frontières à explorer pour les amateurs, et *Elektor* reste une ressource essentielle pour les lecteurs qui veulent rester à la pointe du progrès. 

240557-04

### Questions ou commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur (brian.williams@elektor.com)

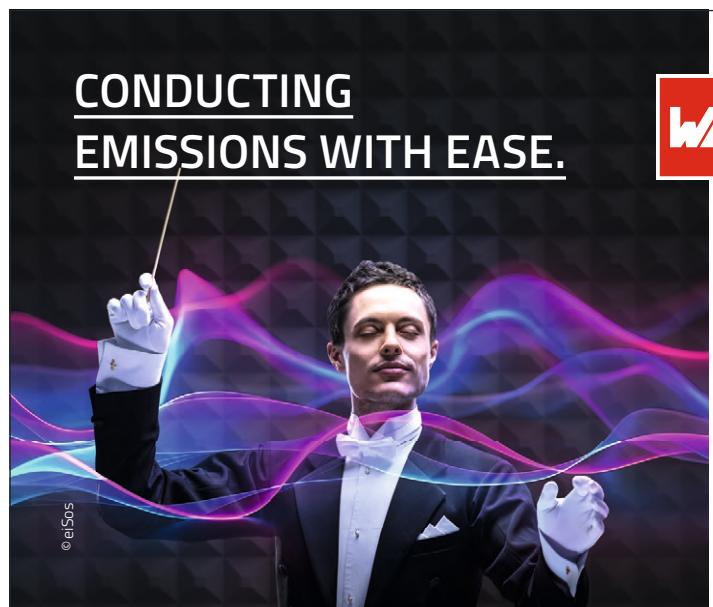


### Produits

➤ **Archive d'Elektor 1974-2023 (clé USB) en anglais**  
[www.elektor.com/20751](http://www.elektor.com/20751)

### LIENS

- [1] Bob Van der Horst introduces Elektor to English readers: <https://elektormagazine.com/magazine/elektor-197412/57329>
- [2] "Elektorscope," Elektor, December 1976: <https://elektormagazine.com/magazine/elektor-197612/57794>
- [3] "Experimenting with the SC/MP," Elektor, November 1977: <https://elektormagazine.com/magazine/elektor-197711/58003>
- [4] "Formant: The Elektor Music Synthesiser," Elektor, May 1977: <https://elektormagazine.com/magazine/elektor-197705/57847>
- [5] Fixing the 70s DIY Magazine Synth that Broke the Rules — Elektor Formant [YouTube]: <https://youtu.be/02UI4Jh84NI>
- [6] "μP TV games," Elektor, April 1979: <https://elektormagazine.com/magazine/elektor-197904/58316>
- [7] "Junior Computer," Elektor, May 1980: <https://elektormagazine.com/magazine/elektor-198005/44396>
- [8] "Mini Crescendo — High-Class Medium Power Amplifier," Elektor, May 1984:  
<https://elektormagazine.com/magazine/elektor-198405/45233>
- [9] "Decoding Satellite TV Signals," Elektor, May 1987: <https://elektormagazine.com/magazine/elektor-198705/47132>
- [10] "S-VHS/CVBS-to-RGB Converter," Elektor, September 1990: <https://elektormagazine.com/magazine/elektor-199009/32220>
- [11] "Game Boy Digital Sampling Oscilloscope," Elektor, October 2000: <https://elektormagazine.com/magazine/elektor-200010/16868>
- [12] "Lucky Dip: Design It Yourself or Copy from the Internet?" Elektor, April 2008:  
<https://elektormagazine.com/magazine/elektor-200010/16868>
- [13] "Arduino + Theremin = Theremino," Elektor, November 2009: <https://elektormagazine.com/magazine/elektor-200911/19200>



**CONDUCTING EMISSIONS WITH EASE.**

**WE**

**WÜRTH ELEKTRONIK**  
MORE THAN YOU EXPECT

**WE meet @ electronica**  
Hall A6 - 502

**Your partner for reliable EMC-compliant application design**  
Today's world is orchestrated by electronic devices. With our full package of know-how, services and our product portfolio, we help you compose EMC-compliant solutions.

Ready to put harmonics in their place?  
[www.we-online.com/emc](http://www.we-online.com/emc)

**Highlights**

- Large EMC product portfolio
- Personal EMC design support
- REDEXPERT design platform

#CONDUCTINGEMISSIONS

# KiCad 8

## nouvelles et dernières caractéristiques

Peter Dalmaris (Australie)

KiCad, le logiciel de CAO électronique open-source, devient de plus en plus populaire, y compris parmi les développeurs professionnels. Et le logiciel s'améliore constamment. Cette année, est sortie la version 8. KiCad 8 offre plusieurs améliorations par rapport à KiCad 7, particulièrement dans l'éditeur de PCB et le simulateur intégré. Explorons quelques-unes de ces mises à jour et améliorations !

L'équipe KiCad a sorti KiCad 8 au début de 2024, presque exactement un an après la sortie de KiCad 7. Après que le projet ait atteint un bon niveau de maturité avec les versions 5 et 6, les nouvelles versions majeures de KiCad sont presque toujours accompagnées de nouvelles fonctions et d'améliorations, conçues pour augmenter la productivité et réduire l'écart avec ses concurrents commerciaux.

KiCad 8 ne fait pas exception. La nouvelle version [1] représente la prochaine étape dans l'évolution de KiCad, avec plusieurs améliorations et ajouts par rapport à KiCad 7. Comme avec KiCad 7, KiCad 8 n'oubliera pas vos anciens projets. Il n'y a pas de nouvelles caractéristiques radicalement différentes, comme c'était le cas

du nouveau format de fichier introduit dans KiCad 5. Les fonctions introduites dans KiCad 8 ne vous demanderont pas des heures ou des jours d'apprentissage pour les maîtriser. Vous pouvez ignorer cet article (bien que vous ne devriez pas !), télécharger KiCad 8, et commencez à l'utiliser. Votre connaissance de KiCad 7 sera bien suffisante.

Par contre, KiCad 8 regorge de petites améliorations. La plupart de ces améliorations se retrouvent dans les deux applications principales de KiCad, le schéma et l'éditeur de PCB, pour parfaire leurs possibilités individuelles et leur intégration. Dans cet article, je pointerai quelques-une des plus importantes améliorations de KiCad 8, en commençant par l'éditeur de PCB.

### Déplacement de plusieurs composants

Dans KiCad 7, l'utilisateur ne pouvait déplacer qu'un seul composant à la fois. Devoir déplacer un composant à la fois après avoir terminé le câblage pour corriger un problème ou améliorer une carte, était une grosse perte de temps et j'ai toujours redouté de devoir le faire. KiCad 8 améliore ce point en permettant de sélectionner plusieurs composants et de les déplacer ensemble sans couper les pistes liées. Le processus de conception en est rationalisé, particulièrement pour les cartes complexes avec de nombreux composants.

Je vais utiliser, comme exemple, une carte ESP32 pour démontrer cette fonction. Supposez que vous vouliez déplacer la position des composants D1 à D4 **figure 1**. Le processus est intuitif. Commencez par sélectionner les composants que vous voulez déplacer. Vous pouvez le faire en cliquant sur les composants tout en gardant appuyée la touche *Command* ou *Control*, ou en utilisant le glissé de la souris, après n'avoir coché que la case *Footprints* dans le filtre de sélection. Ensuite, appuyez sur la touche *D* pour démarrer l'opération de glissé. Les composants sélectionnés se déplaceront avec le déplacement de la souris.

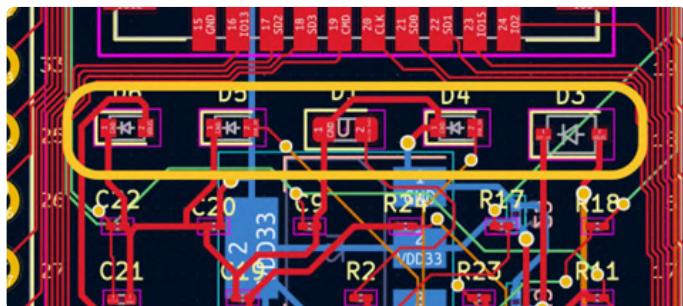


Figure 1. Je vais glisser ces composants simultanément.

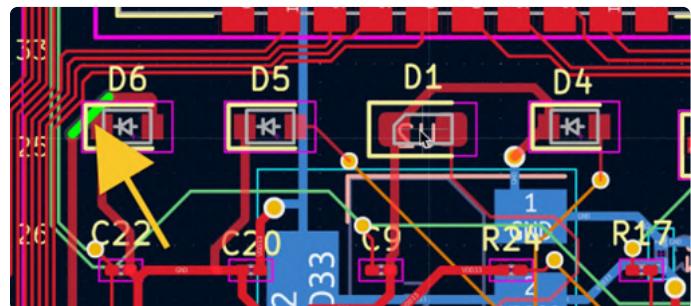


Figure 2. Lorsque vous glissez plusieurs composants, les pistes sont redessinées et le routeur interactif met en surbrillance les violations en temps réel.

Au fur et à mesure que vous déplacez les composants sélectionnés, le routeur interactif vous préviendra de toute infraction de règle si c'est le cas. Si le déplacement d'un composant entraîne un court-circuit, le routeur surligne le problème en vert clair. Par exemple, si D6 entraîne un court-circuit en traversant une piste, le routeur l'indique immédiatement, permettant des ajustements rapides. J'ai glissé les composants vers la gauche dans la **figure 2**, et provoqué un court-circuit. Le routeur interactif souligne cette violation en surlignant la piste concernée en vert.

Lorsque vous êtes satisfait de la nouvelle position des composants, cliquez simplement pour les coller en place. Cette fonction rend la disposition des composants sur le PCB plus intuitive et plus rapide. La possibilité de KiCad 8 de déplacer plusieurs composants simultanément est un multiplicateur de productivité, rendant les petits (et grands) ajustements moins stressants.

### Propriétés des gouttes

Les gouttes ne sont pas nouvelles, mais dans KiCad 8, vous avez plus d'options lorsque vous en ajoutez. Les gouttes renforcent la connexion des pastilles sur les pistes, réduisant ainsi le risque de décollement de la piste et la rupture en raison du stress mécanique ou de cycles thermiques répétitifs. La nouvelle fonction de KiCad 8 ajoute une extension fuselée ou en forme de goutte aux jonctions des pastilles, vias et pistes, améliorant la longévité et la fiabilité du PCB, tout en lui donnant un look professionnel ! Explorons les bénéfices principaux de l'incorporation de gouttes dans vos

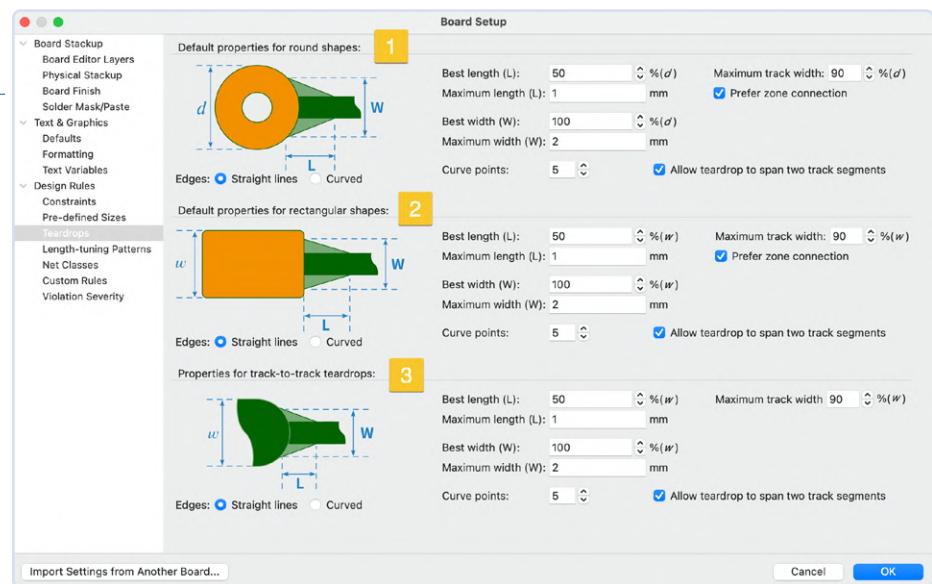


Figure 3. Les options de réglages des gouttes (Teardrops) dans le réglage de carte (Board Setup).

conceptions de PCB et la procédure pour les ajouter dans KiCad 8.

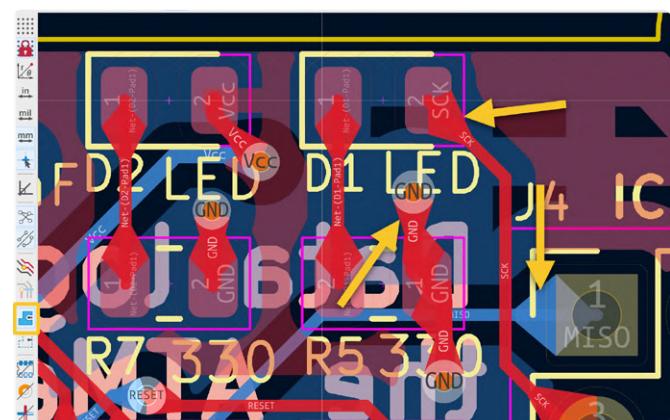
L'un des avantages principaux des gouttes est l'amélioration de la longévité et de la fiabilité. Elles aident à gérer le stress thermique en fournissant plus de surface pour la couche de cuivre liée au substrat du PCB, faisant en sorte que les pastilles auront moins tendance à se décoller de la carte pendant la soudure. Ceci est utile car le cuivre et l'époxy ne se dilatent et ne se contractent pas de la même manière lorsqu'ils sont exposés à la chaleur. Les gouttes contribuent également à une meilleure fabrication. Plus les connexions sont robustes et larges, moins il y aura de défauts, tels que les micro-coupures de piste, entraînées par de petites imperfections pendant le processus de gravure, particulièrement pour les pistes et pastilles très fines. De même, elles améliorent aussi le niveau de réparation de vos PCB. Comme elles ajoutent plus de cuivre aux points de connexion, elles peuvent faciliter la soudure d'une pastille ou d'un via. Enfin,

l'intégrité du signal est un autre domaine où les gouttes brillent, particulièrement dans les conceptions en hautes fréquences. Les coins aigus des pistes des PCB peuvent entraîner des réflexions de signaux, mais les gouttes fournissent des transitions plus douces qui peuvent maintenir une transmission plus claire des signaux. D'un autre côté, les conceptions en hautes fréquences dépendent souvent de pistes dont l'impédance est soigneusement contrôlée, et l'introduction de gouttes peut malencontreusement avoir une influence et créer des effets indésirables. Il faut donc prendre ceci en considération dans certaines conceptions.

Dans KiCad, vous pouvez ajuster les propriétés des gouttes dans l'onglet Teardrops (gouttes) de la liste Design Rules (règles de conception) du Board Setup (réglages de la carte). Les propriétés sont montrées dans la **figure 3**. Vous pouvez ajuster le réglage par défaut, désiré pour les gouttes attachées aux pastilles circulaires et rectangulaires



Figure 4. Pastilles sans gouttes (gauche) et avec l'ajout des gouttes (droite).



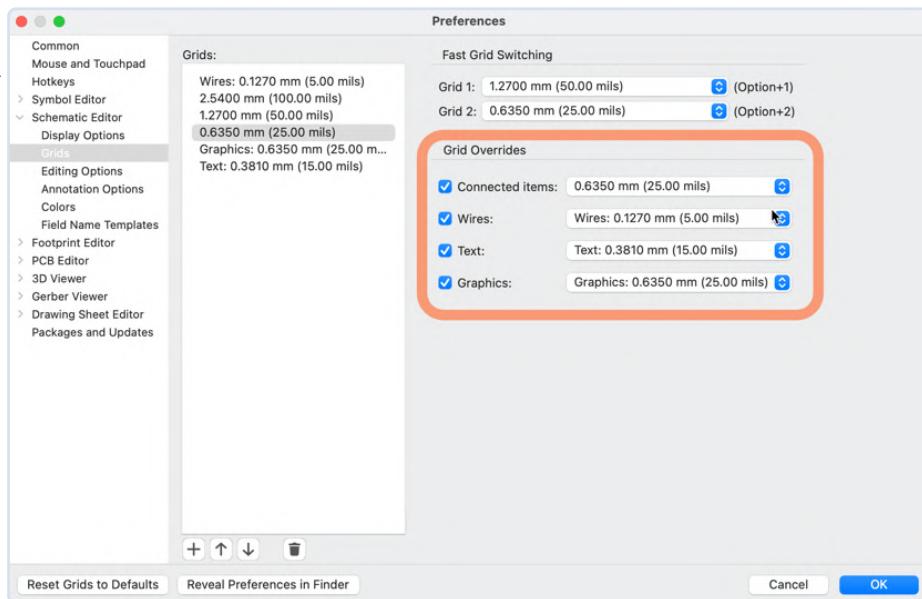


Figure 5. Le panneau de réglage du redimensionnement de la grille (Grid Overrides) dans les préférences de l'éditeur de schéma.

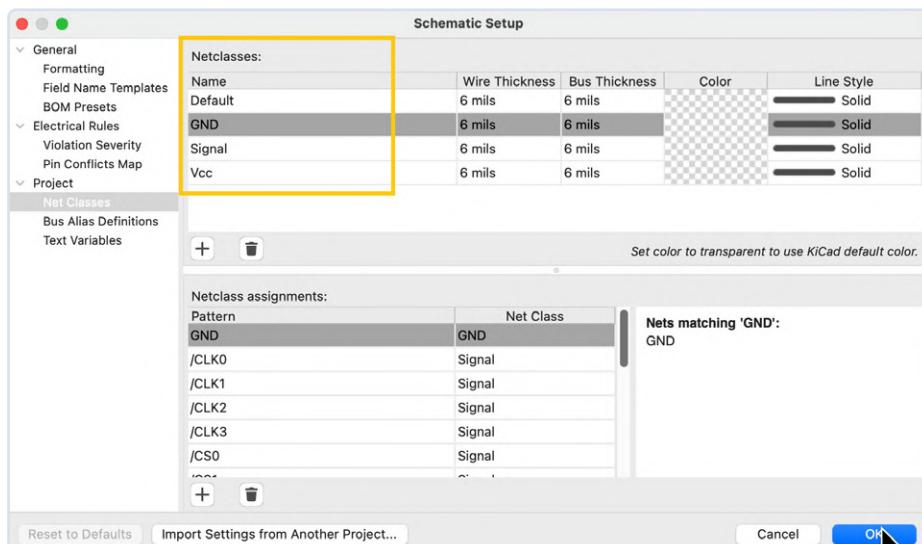


Figure 6. Les classes Net et leurs affectations sont maintenant intégrées dans les éditeurs de schéma et PCB. Ici, vous pouvez voir les classes net existantes dans l'éditeur de schéma.

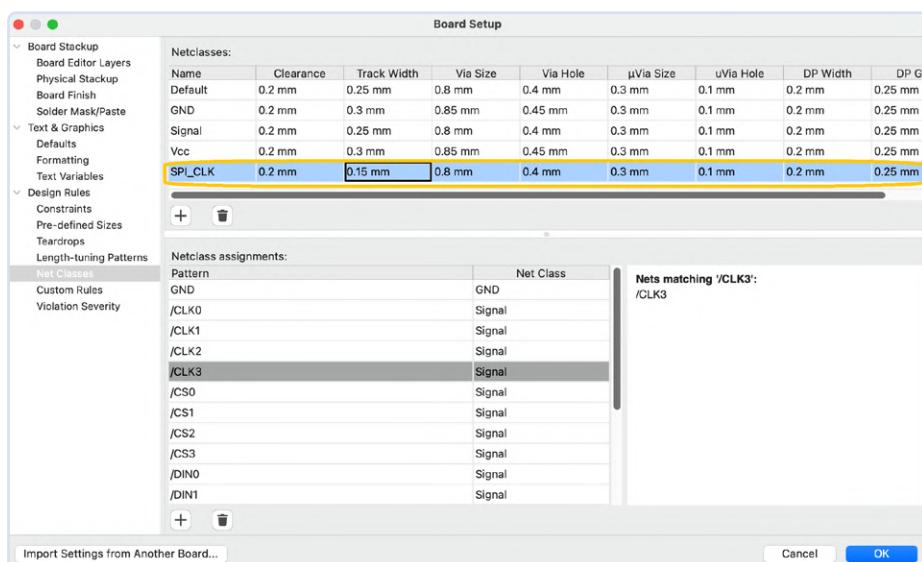


Figure 7. J'ai créé une nouvelle classe net dans l'éditeur de PCB.

et la connexion entre les pistes. Il est possible d'ajouter des gouttes à des conception nouvelles et existantes. Ajustons des gouttes dans l'un des projets (l'enregistreur de données MCU) présenté dans le second volume de *KiCad Like a Pro* (4<sup>th</sup> Edition) : "Projects and Recipes" [2]. Actuellement, ce projet possède des connexions simples de pastilles et de pistes. Je vais travailler sur les propriétés des gouttes de pastilles rondes de la figure 3. Dans la **figure 4**, vous pouvez voir les pastilles initiales sur la gauche. Après avoir appliqué les gouttes sur ces pastilles, le résultat est sur la droite. Bien que les gouttes offrent beaucoup de bénéfices dans la conception des PCB, il existe des situations où elles peuvent ne pas être le meilleur choix. Dans les conceptions où la place est restreinte, particulièrement pour les PCBs de haute densité, chaque millimètre compte. La surface additionnelle des gouttes peut limiter votre capacité de placement des composants ou router les pistes efficacement et ceci les rend peu pratiques dans certains cas.

## Redimensionnement de la taille de la grille

Cette fonction est nouvelle dans la version 8 de KiCad. Avec Grid Overrides (redimensionnement de la grille), KiCad change automatiquement la taille de la grille lorsqu'il effectue des opérations telles que le placement ou le déplacement des objets dans l'éditeur de schémas. Le bouton Grid Overrides dans la barre d'outils de gauche vous permet d'activer ou désactiver cette fonction.

Une des choses géniales de cette fonction est que KiCad peut basculer entre différentes grilles pour des opérations comme le placement de texte, tout en conservant les symboles et les fils sur une grille de 50 mil pour garder l'espacement des broches de la bibliothèque des symboles. Ce niveau de polyvalence dans la gestion de la grille est révolutionnaire pour assurer la cohérence et la précision dans mes conceptions de schémas. Ceci veut dire que vous pouvez ajuster la taille de la grille lorsque vous connectez des éléments, des fils, du texte et des graphiques (**figure 5**) et KiCad basculera automatiquement vers la grille appropriée lorsqu'un de ces éléments est sélectionné (et vous n'avez ainsi pas besoin de le faire manuellement).

Je ne sais comment vous dire le temps que cette fonction peut vous faire gagner. Elle me permet de basculer en toute transparence entre les grilles basées sur les besoins spécifiques de ma conception sans avoir à ajuster manuellement le réglage des grilles à chaque fois. Une fois que vous avez défini vos préférences de redimensionnement dans les *Preferences*, vous pouvez simplement continuer votre travail et ne penser que rarement à la taille de la grille que vous utilisez. L'automatisme permet à la grille de s'ajuster à l'outil que vous utilisez, que ce soit le routage, le dessin ou l'écriture de texte, et sélectionne la taille de grille adéquate.

## Intégration de l'Affectation de la Classe Net

Dans KiCad 8, l'intégration entre le schéma et l'agencement du PCB a été amélioré avec le reflet automatique des affectations des classes net. Toutes les affectations de classe net dans le schéma sont maintenant parfaitement intégrées dans l'agencement du PCB, visible dans l'environnement de l'éditeur de PCB. L'éditeur de PCB reflétera automatiquement ces changements lorsque vous créez ou modifiez les classes net dans le schéma. Par exemple, si vous avez défini une classe net pour les signaux de grande vitesse dans le schéma, ces signaux seront regroupés ensemble et les règles de conception appropriées leurs seront appliquées dans l'agencement du PCB.

Cette nouvelle fonction facilite le processus de conception et assure que les classes net soient cohérentes entre le schéma et l'agencement, réduisant la possibilité d'erreurs et de décalages. Elle fait aussi gagner du temps en éliminant le besoin manuel de répliquer les affectations de classe net dans le schéma et l'agencement.

Pour illustrer ceci, considérons un exemple pratique, tiré à nouveau du livre *Kicad Like A Pro* (4<sup>th</sup> Édition). Dans un des projets, les classes net sont établies dans l'éditeur de schéma, comme montré dans la **figure 6**. Pendant que je continuais le travail dans l'éditeur de PCB, j'ai décidé d'ajouter une nouvelle classe net pour l'horloge SPI. Toujours dans l'éditeur de PCB, j'ai créé cette classe net dans l'onglet *Board Setup Net Classes* (réglage des classes net de la carte) comme indiqué dans la **figure 7**.

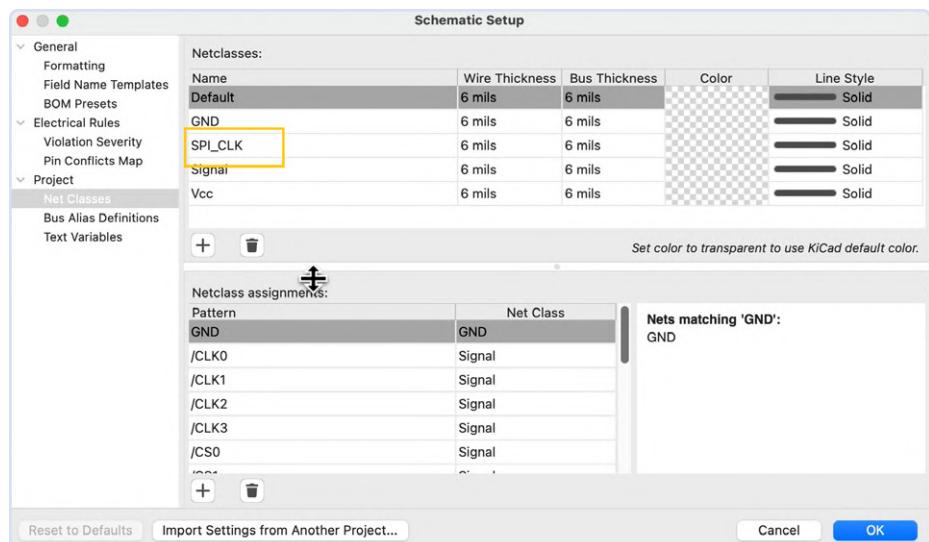


Figure 8. La nouvelle classe net a été synchronisée dans l'éditeur de schéma.

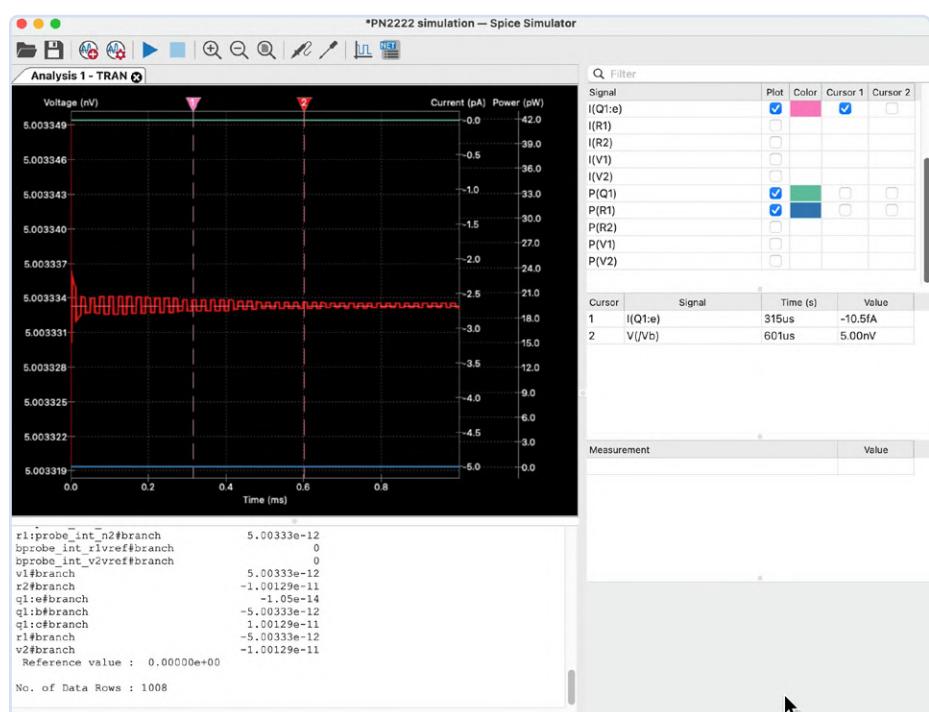


Figure 9. Un tracé de simulation de transitoire dans le nouveau simulateur de circuit de KiCad.

Dans les versions précédentes de KiCad, la nouvelle classe net SPI\_CLK n'aurait pas été disponible dans l'éditeur de schéma, de telle sorte que le schéma et le PCB auraient été désynchronisés. Cependant, dans KiCad 8, l'intégration améliorée synchronise les classes net automatiquement. Pour le vérifier, je peux voir que la nouvelle classe net existe dans l'éditeur de schéma (**figure 8**).

L'intégration automatique de l'affectation de la classe net dans KiCad 8 améliore grandement le processus de conception. Cette nouvelle fonction réduit le travail manuel et l'éventualité d'oubli, comme vous l'avez vu, avec la fonction de redimensionnement de la taille de la grille. Nous pouvons maintenant nous concentrer davantage sur les tâches de conception que sur celles de la gestion administrative.

## Simulateur

L'une des mises à jour remarquable dans KiCad 8 est l'amélioration de l'intégration des outils de simulation SPICE par ngspice [4]. La collaboration entre KiCad et les développeurs ngspice a produit plusieurs nouvelles fonctions, ainsi que des résolutions de bogues, rendant la simulation de circuit encore plus puissante et pratique pour les utilisateurs.

Ngspice, un simulateur de circuits électroniques de différents niveaux et différents signaux, est largement utilisé pour simuler les circuits analogiques et numériques. Il fournit des analyses détaillées sur la performance des circuits, ce qui est crucial pour la vérification et l'optimisation des conceptions. L'intégration de ngspice dans KiCad permet à l'utilisateur d'annoter les schémas de directives SPICE, de simuler des circuits et d'analyser les résultats sans quitter l'environnement KiCad. Cette intégration transparente facilite le processus de conception et améliore l'efficacité.

KiCad 8 introduit une interface utilisateur remaniée du simulateur. L'une des plus intéressantes nouvelles fonctions est la possibilité de gérer simultanément le tracé de signaux multiples. De plus, le simulateur supporte maintenant le tracé de signaux de puissance en plus des tensions et des courants, offrant un panorama complet de l'utilisation de la puissance du circuit. Ces mises à jour rendent le simulateur encore plus puissant dans la conception de circuits et dans l'outil d'analyse, et améliorent grandement l'expérience utilisateur. La **figure 9** montre le résultat d'une simulation de transitoire (TRAN). Le tracé montre de nombreuses valeurs telles que tension, courant et puissance par rapport au temps. KiCad 8 ajoute quatre nouveaux types de simulation : pôle-zéro, bruit, paramètre S, et FFT. Cette extension permet une analyse plus précise et plus complète des circuits électroniques. Les utilisateurs peuvent définir des signaux particuliers et ajouter les tracés pour des expressions comme  $V(/in)$  et  $V(/out)$ , visualisant une plus large gamme de sorties simulées directement dans KiCad.

Par ailleurs, les résultats de simulation des points d'opération (OP) peuvent être visualisés directement dans les zones de schéma. Cette fonction permet aux utili-

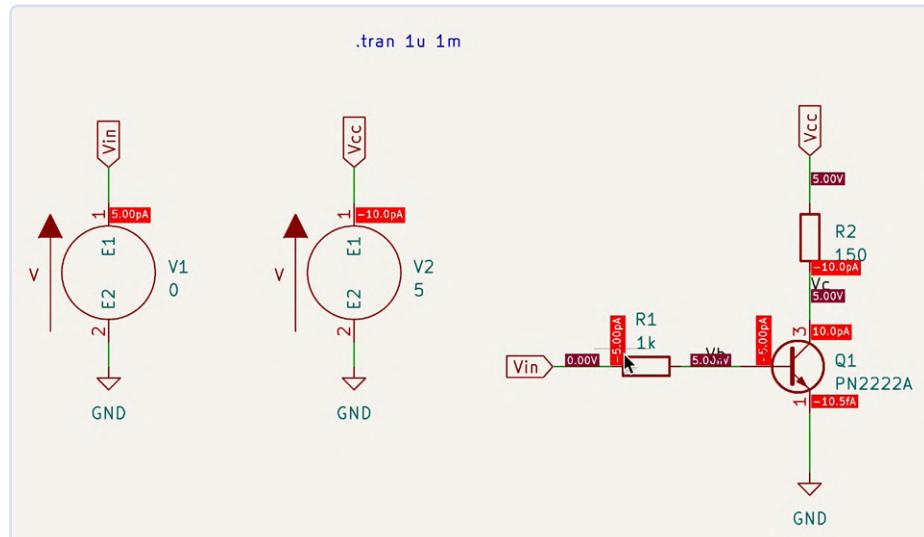


Figure 10. Une nouvelle fonction dans KiCad 8 est l'étiquetage du simulateur dans l'éditeur de schéma.

sateurs d'avoir une vision plus approfondie du comportement et de la performance de leurs circuits, facilitant l'optimisation et le peaufinage des conceptions. La **figure 10** montre le résultat de la simulation de points d'opération directement dans l'éditeur de schéma sous la forme d'étiquettes rouges. J'ai trouvé ces fonctions améliorées de simulation et leur intégration entre le simulateur et l'éditeur, très utiles. Elles reflètent la volonté de KiCad de continuellement améliorer et faire progresser ses possibilités pour répondre aux besoins évolutifs de ses utilisateurs.

## Autres Améliorations

Il y a pleins d'autres petites, et pourtant importantes, améliorations dans KiCad 8, et, avant de finir cet article, j'aimerais en mentionner quelques-unes :

➤ **Possibilités d'importation et d'exportation enrichies :** KiCad 8 introduit des outils améliorés d'importation et d'exportation de données. Les utilisateurs peuvent maintenant importer des projets de diverses sources, y compris Solidworks et LTSpice, et exporter dans des formats comme IPC-2581 et STEP avec les formes de cuivre, pour une meilleure collaboration avec les autres outils.

➤ **Éditeur de symboles et de schémas amélioré :** L'éditeur de schéma offre maintenant de nouveaux menus pour

les propriétés, la recherche et la navigation sur le net, améliorant la navigation et l'efficacité de l'édition. La dernière version de l'exportateur de BOM permet une personnalisation dans l'application, et l'édition des symboles de puissance et de l'aide des points facilite le processus de conception.

➤ **Améliorations de la vue 3D :** La visionneuse 3D possède maintenant une interface utilisateur actualisée avec un panneau d'apparence, des prérglages de visualisation et des zones d'affichage, rendant plus facile l'inspection et la manipulation des modèles 3D.

➤ **Améliorations de l'interface des Commandes en ligne (CLI) :** Les commandes en ligne dans KiCad 8 supportent de nouvelles fonctions comme les rapports DRC/ERC dans JSON, la génération de BOM, et l'exportation des modèles glTF/VRML, offrant plus de contrôle et de polyvalence pour les utilisateurs chevronnés.

➤ **Personnalisation interactive des pastilles et de l'ajustage des longueurs :** Les outils interactifs d'ajustage des longueurs supportent maintenant des modèles modifiables, et les utilisateurs peuvent définir des gabarits d'échelon thermique personnalisés pour les pastilles, ce qui peut être pratique dans certains cas particuliers.

Alors que KiCad 7 était déjà un excellent outil, ces améliorations rendent KiCad 8 encore plus robuste et efficace en tant qu'outil de conception électronique pour les novices comme pour les utilisateurs chevronnés ! ↗

VF : Chris Elsass — 240278-04

## Questions ou commentaires ?

Contactez Elektor (redaction@elektor.fr).



## À Propos de l'Auteur

Dr. Peter Dalmaris est enseignant, ingénieur électrique, bricoleur électronicien et créateur. Il a créé des cours d'électronique DIY en vidéo en ligne et est l'auteur de plusieurs livres techniques comprenant la série *KiCad Like a Pro*, *KiCad 6 Fundamentals and Projects* et leurs versions mises à jour. Son entreprise, Tech Explorations, offre une variété de cours pédagogiques et des stages pour les amateurs passionnés en électronique, les étudiants STEM et les professeurs STEM.



## Produits

- Peter Dalmaris, *KiCad Like A Pro - 4th edition - Volume 1* (Elektor, 2024) : [www.elektor.fr/20928](http://www.elektor.fr/20928)
- Peter Dalmaris, *KiCad Like A Pro - 4th edition - Volume 2* (Elektor, 2024) : [www.elektor.fr/20930](http://www.elektor.fr/20930)

## LIENS

- [1] Page de téléchargement de KiCad 8 : <https://www.kicad.org/download/>
- [2] Peter Dalmaris, *KiCad Like A Pro - 4th edition - Volume 1* (Elektor, 2024) : <https://www.elektor.com/20928>
- [3] Peter Dalmaris, *KiCad Like A Pro - 4th edition - Volume 2* (Elektor, 2024) : <https://www.elektor.com/20930>
- [4] ngspice : <https://ngspice.sourceforge.io/>

The advertisement features a red Pitaya Dev Board (FPGA + CPU + DAQ) with an AMD Xilinx Zynq 7020 SoC. Key features highlighted are 'Expandable', 'Open source', and 'Embeddable'. The Red Pitaya logo is in the top right. The main text 'NEED 4 INPUTS?' is prominently displayed in large white letters, with a subtext 'CUT YOUR DAQ SYSTEM COSTS BY 70%'. A QR code is in the bottom right, and the text 'LEARN MORE' is nearby. The background is red with a large white 'X' pattern.

# Elektor @ electronica 2024

electronica Fast Forward 2024, des experts sur scène, des forums d'influenceurs, des talk-shows Elektor Lab en direct, et plus encore

## L'équipe Elektor

electronica 2024, (du 12 au 15, Munich), s'annonce plus grandiose que jamais. Près de 2 800 exposants de 50 pays présenteront leurs derniers produits et innovations sur 18 halls. Elektor aura également son propre stand. Nous renouvelons notre collaboration avec Messe Munich pour le prix electronica Fast Forward. De plus, des créateurs de contenu de renom, tels que GreatScott! présenteront leurs derniers projets. Nous réaliserons des interviews d'experts et proposerons une émission vidéo quotidienne en direct.

Tous les deux ans, Munich se transforme en un véritable sanctuaire pour les professionnels et les passionnés de l'électronique. Lors de l'édition 2024 d'electronica (du 12 au 15 novembre, à Messe Munich), vous aurez l'occasion de découvrir les derniers développements IA, IdO, énergie intelligente, semi-conducteurs GaN et SiC, et bien plus encore. Pour ceux qui seront de la partie, nous vous invitons à visiter Elektor

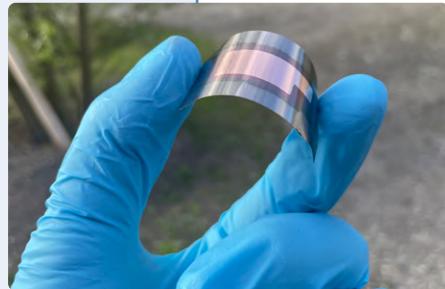
au stand B4.440, où notre équipe sera ravie de discuter des dernières technologies, de vous offrir un aperçu de l'industrie électronique et d'organiser des entretiens en direct avec des influenceurs et des experts de renom. Pour les chefs d'entreprise, c'est également une opportunité en or pour découvrir comment Elektor et eeNews Europe peuvent contribuer à vos stratégies de marketing et d'innovation.

Que vous soyez un professionnel de l'industrie ou un enthousiaste de la technologie, ne manquez pas de visiter le **stand B4.440** pour rencontrer les startups innovantes, les influenceurs et les experts. C'est une occasion unique de dialoguer directement avec ceux qui façonnent l'avenir de l'électronique. Venez-nous rencontrer !

## electronica Fast Forward 2024

Lors d'electronica Fast Forward 2024, les startups seront sous les projecteurs, pour présenter le futur de l'électronique. Organisée conjointement par electronica et Elektor, cette sixième édition, dédiée aux startups, organisé par electronica et Elektor, mettra en avant des innovations révolutionnaires dans les domaines de l'IdO, de la robotique, du développement de batteries, et bien plus encore. Les cinq startups sélectionnées à electronica Fast Forward présenteront des solutions aux problèmes les plus critiques du secteur de l'électronique. electronica Fast Forward est bien plus qu'une simple

vitrine technologique – c'est aussi une compétition. Les startups y exposeront leurs innovations aux leaders de l'industrie et aux décideurs, en lice pour remporter un budget média total de 85 000 euros. Le gagnant de la première place obtiendra également un stand entièrement financé pour electronica 2026. La cérémonie de remise des prix, prévue pour le vendredi, dévoilera les trois lauréats. (voir [programme](#)).

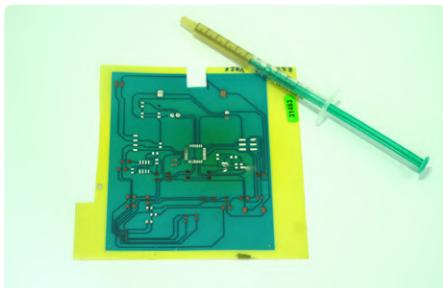


## BTRY AG (Suisse)

BTRY, une spin-off de l'ETH, innove dans le domaine des batteries avec le développement de la première batterie à semi-conducteurs de l'industrie, caractérisée par une haute densité énergétique, fabriquée avec des techniques avancées de fabrication de semi-conducteurs. Le produit est une batterie lithium-ion de pointe, capable de se recharger en seulement une minute. Elle fonctionne à des températures très élevées et très basses et peut supporter plusieurs milliers de cycles de charge-décharge. [www.btry.ch](http://www.btry.ch)

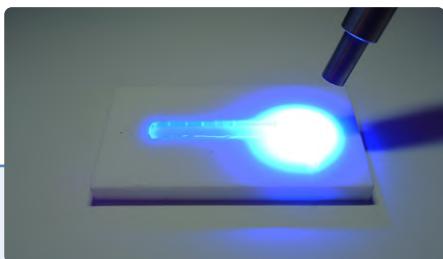


## SPEEDPOX



### SpeedPox (Autriche)

SpeedPox propose des résines époxy innovantes à durcissement ultra-rapide, des adhésifs et des encres conducteurs. Leurs époxydes monocomposants ont une durée de vie en pot pratiquement illimitée à température ambiante. Grâce à un mécanisme breveté d'auto-propagation activé par la chaleur ou les UV, ils permettent d'économiser 99 % de temps et d'énergie. Avec SpeedPox, le processus de durcissement qui requiert normalement plusieurs heures en four industriel ne prend que quelques secondes. [www.speedpox.com](http://www.speedpox.com)



### Nightjar Technologies (Inde)

Nightjar Technologies est une spin-off de RESOLVE, l'ONG environnementale basée à Washington DC. Leur produit phare, Trail-Guard AI, est un système de caméra doté d'IA conçu pour lutter contre le braconnage et réduire les conflits entre l'homme et la faune dans les pays en développement. [www.nightjar.in](http://www.nightjar.in)



## NIGHTJAR

### ICECAP Systems (Malte)

L'objectif d'ICECAP Systems est de concevoir un système de refroidissement compact destiné à une utilisation variée dans plusieurs types de produits. En utilisant des modules thermoélectriques à plusieurs étages (TEM), de nouvelles techniques d'assemblage et des algorithmes d'optimisation innovants, il est possible d'obtenir des températures plus basses dans des boîtiers plus petits, permettant une intégration facile dans les dispositifs portables. Les applications de ce système s'étendent à divers domaines, incluant les caméras à grande vitesse, les récepteurs radio, les télescopes, les dispositifs de transport médical, les équipements de laboratoire de table, et les processeurs haute performance. [www.icecapsystems.com](http://www.icecapsystems.com)

## ICECAP



## banyan.eco

### Banyan.eco (France)

Banyan.eco vise à accompagner le secteur de l'électronique à atteindre le niveau net zéro ; un état d'équilibre à l'échelle mondiale entre les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine et leur retrait de l'atmosphère. Face à la complexité des chaînes d'approvisionnement et des processus industriels multicouches du secteur, mesurer les émissions sur l'ensemble du cycle de vie des produits est un défi majeur. Banyan.eco utilise l'IA et les jumeaux numériques Eco pour estimer en quelques minutes l'empreinte carbone des produits et des entreprises dans le domaine de l'électronique. [www.banyan.eco](http://www.banyan.eco)

### Sponsors d'electronica Fast Forward 2024

L'événement bénéficie du soutien de principaux acteurs du secteur tels que **NXP**, **MikroE**, **Mouser** et **PCBWay**. Ces sponsors de renom contribuent à encourager la collaboration et à stimuler la croissance au sein de la communauté électronique.

Proudly Sponsored By



## Elektor @ electronica : programme

### Mardi 12 novembre

- 09:00 **Présentation de la startup : Banyan.eco** (B4.440)  
10:00 **Présentation de la startup : BTRY AG** (B4.440)  
10:30 **Krüger Consulting GmbH** (B4.440)  
11:00 **Présentation de la startup : ICECAP Systems** (B4.440)  
12:00 **Présentation de la startup : Nightjar Technologies** (B4.440)  
13:00 **Présentation de la startup : SpeedPox** (B4.440)  
14:00 **Interview : GreatScott!, LiPo Kit** (B4.440)  
15:00 **Interview : Jean-Pierre Joosting, eeNews Europe** (B4.440)  
17:00 **Elektor Lab Talk live** (B4.440)

### Mercredi 13 novembre

- 09:00 **Présentation de la startup : SpeedPox** (B4.440)  
10:00 **Présentation de la startup : Banyan.eco** (B4.440)  
10:30 **NXP** (B4.440)  
11:00 **Présentation de la startup : BTRY AG** (B4.440)  
12:00 **Présentation de la startup : ICECAP Systems** (B4.440)  
13:00 **Présentation de la startup : Nightjar Technologies** (B4.440)  
14:00 **Interview : Max Imagination** (B4.440)  
15:00 **Interview : Hungarian Consulate** (B4.440)  
17:00 **Elektor Lab Talk live** (B4.440)

### Jeudi 14 novembre

- 09:00 **Présentation de la startup : Nightjar Technologies** (B4.440)  
10:00 **Présentation de la startup : SpeedPox** (B4.440)  
11:00 **Présentation de la startup : Banyan.eco** (B4.440)  
12:00 **Présentation de la startup : BTRY AG** (B4.440)  
13:00 **Présentation de la startup : ICECAP Systems** (B4.440)  
13:30 **Lavorro Inc.** (B4.440)  
14:00 **Interview : Jorge Costa Dantas Faria, European Innovation Council EISMEA** (B4.440)  
15:00 **Interview : Peter Dalmaris, KiCad 8** (B4.440)  
16:00 **B2B & Influencer Marketing** (B4.131, Visionary Stage)  
17:00 **Elektor Lab Talk live** (B4.440)

### Vendredi 15 novembre

- 10:00 **Interview : Nick Flaherty, eeNews Europe** (B4.440)  
11:00 **Influencer Marketing for Students** (B4.131, Visionary Stage)  
12:00 **Cérémonie de remise des prix electronica Fast Forward 2024** (B4.131, Visionary Stage)  
13:00 **Concours de soudure avec DIY GUY Chris** (B4.440)

Un plan du hall B4 est disponible sur

<https://exhibitors.electronica.de/ausstellerportal/2024/hallenplaene/hallenplan/?lid=b4>



Ce programme est susceptible d'être modifié.

## Rencontrez les influenceurs : stimuler l'engagement et l'innovation

Les influenceurs jouent un rôle essentiel dans la démocratisation des technologies innovantes et an facilitant leur adoption par le grand public. Au stand d'Elektor, trois influenceurs de renom de l'industrie électronique présentent leurs derniers projets : GreatScott!, Max Imagination, et DIY GUY Chris. Ensemble, ces innovateurs créatifs cumulent plus de 2 millions de followers.



**GreatScott!** est réputé pour ses tutoriels électroniques détaillés qui permettent aux passionnés comme aux professionnels de s'initier à l'électronique. Ses projets de DIY populaires, tels que son tutoriel sur les batteries externes personnalisées, un grand nombre de personnes à explorer le monde de l'électronique.

[www.youtube.com/@greatscottlab](https://www.youtube.com/@greatscottlab)



**Max Imagination** apporte une touche de créativité et d'art à ses projets, combinant l'ingénierie et l'innovation. Sur sa chaîne YouTube, il présente des réalisations uniques telles que des robots personnalisés et des gadgets imprimés en 3D, ce qui rend les concepts techniques plus accessibles.

[www.youtube.com/@MaxImagination](https://www.youtube.com/@MaxImagination)



**DIY GUY Chris** simplifie l'électronique avancée grâce à des tutoriels faciles à suivre sur des sujets variés comme les écrans LED et les machines CNC, encourageant les débutants à relever de nouveaux défis. Il animera également un concours de soudure sur notre scène *electronica Fast Forward Streaming Stage*.

[www.instagram.com/diyguychris](https://www.instagram.com/diyguychris)

Les visiteurs du stand Elektor auront l'occasion de rencontrer ces influenceurs, où ils proposeront des démonstrations en direct, animeront des séances de Q&R, et bien plus encore. Leur présence enrichit l'événement, augmentant la portée et l'impact des innovations exposées.

## Les experts parlent en direct / Elektor Lab Talk

Chaque après-midi (du mardi au jeudi) sur le stand Elektor, Brian Tristam Williams, rédacteur chez Elektor, et ses collègues recevront une série d'experts pour des entretiens exclusifs. Parmi les invités, Peter Dalmaris, discutera de la dernière version KiCad, la fameuse solution logicielle ECAD open-source. Si vous ne pouvez pas assister à electronica en personne, nos interviews et nos émissions Lab Talk seront disponibles sur notre chaîne [www.youtube.com/@ElektorTV](https://www.youtube.com/@ElektorTV). Consultez le **programme** ci-dessus pour plus de détails.

Katja Stolle

Directrice  
de l'exposition  
electronica



Caroline Pannier,

Directrice adjointe  
de l'exposition  
electronica



# electronica: 60 ans et toujours en croissance !

## Des décennies d'innovation pour façonner l'avenir de l'électronique

Depuis six décennies, electronica joue un rôle moteur dans l'industrie électronique. À l'occasion de l'édition 2024, les organisateurs partagent l'évolution de cet événement et esquiscent ce que réserve l'avenir de l'électronique. Cette année, le salon fête son 60<sup>e</sup> anniversaire et sera plus grand que jamais. Pour la première fois, les 18 halls de la foire de Munich seront utilisés. Dans cette interview concise, Katja Stolle (directrice du salon electronica) et Caroline Pannier (directrice adjointe du salon electronica) reviennent sur les soixante années d'electronica et discutent des perspectives d'avenir.

**Elektor :** quelle était la mission d'electronica à ses débuts il y a 60 ans, et a-t-elle évolué depuis ?

**Katja Stolle :** si la mission principale d'electronica - présenter les innovations et promouvoir la collaboration industrielle - est restée inchangée au cours des 60 dernières années, son champ d'action s'est considérablement élargi. Lancé en 1964 comme le premier salon professionnel en Allemagne dédié exclusivement aux composants électroniques, alors qu'il avait déjà une vocation internationale. Au fil des décennies, electronica a connu une croissance constante et est rapidement devenu le rendez-vous incontournable de l'industrie électronique mondiale. Aujourd'hui, nous offrons une plateforme pour présenter toute la gamme des technologies, des produits et des solutions de l'industrie électronique, favorisant les connections mondiales et mettant en lumière les tendances émergentes, ce qui stimule l'innovation et la croissance de l'industrie.

**Elektor :** de nombreux jalons technologiques ont été présentés pour la première fois à electronica. Quelles sont les innovations qui ont eu l'impact le plus significatif sur l'industrie et le monde ?

**Caroline Pannier :** au cours des dernières décennies, electronica a été le théâtre de nombreuses percées technologiques majeures, comme l'introduction des microprocesseurs dans les années 1970, l'avènement des communications mobiles durant les années 1980 et 1990, et les avancées rapides de la numérisation dans les années 2000, incluant le déploiement de l'internet sans fil. Ces technologies ont eu un impact durable et transformateur sur le monde, en

rendant l'électronique plus compacte, plus rapide et plus efficace, et en permettant l'émergence de nouvelles industries telles que l'IdO, les véhicules autonomes et les villes intelligentes. Ces percées continuent de façonner l'avenir de la technologie dans pratiquement tous les secteurs.

**Elektor :** dans la perspective des prochaines années de progrès technologiques, quelles sont les technologies émergentes qui, selon vous, domineront les prochaines éditions d'electronica ?

**Katja Stolle :** à l'avenir, electronica continuera de mettre en avant les dernières innovations qui font avancer l'industrie électronique. Il s'agit notamment de plusieurs technologies susceptibles de continuer à jouer un rôle dominant dans les prochaines éditions d'electronica, comme l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique, ou l'électronique durable, qui met l'accent sur l'efficacité énergétique, la recyclabilité et la réduction des déchets.

**Elektor :** cette année, pour célébrer son anniversaire, le salon mettra en avant le thème de la société entièrement électrique. Pourquoi ce choix et que peuvent attendre les visiteurs lors de l'événement qui se tiendra du 12 au 15 novembre 2024.

**Caroline Pannier :** le All Electric Society (SEA) envisage un futur dans laquelle tous les besoins énergétiques sont couverts par de l'électricité neutre en CO<sub>2</sub>. C'est un concept qui vise à lutter contre le changement climatique tout en garantissant l'approvisionnement en énergie. En étroite collaboration avec l'industrie, nous l'avons choisi comme devise pour l'édition de cette année d'electronica. L'AES et le développement durable seront des thèmes récurrents tout au long de l'exposition et du programme de soutien. Outre la présentation de technologies durables sur les stands, il y aura diverses présentations et une multitude d'événements spéciaux consacrés à ce sujet. Par exemple, un programme d'une journée de conférences et de tables rondes par le réseau des leaders verts, ou une visite individuelle soutenue par l'association allemande de l'industrie électro-numérique (ZVEI), où les visiteurs peuvent découvrir la contribution de certains exposants à l'AES en direct sur leurs stands.

### Deux forums d'influenceurs en direct

À electronica 2024, dans le hall B4.131, Elektor organisera deux forums informatifs : une discussion sur le marketing intelligent des influenceurs (jeudi 14 novembre) et une discussion pour les étudiants aspirant à devenir des influenceurs dans le secteur de l'électronique (vendredi 15 novembre). Le premier forum, intitulé « *The Future is Now : intégrer un marketing d'influence intelligent dans votre entreprise* », réunira des influenceurs cumulant plus de

2 millions de followers, en se concentrant sur le pouvoir du marketing d'influence dans l'industrie de l'électronique. Le second forum, intitulé « *The Future is Now : devenir un influenceur dans l'électronique* », s'adressera aux étudiants et aux jeunes ingénieurs et leur offrira un aperçu sur les étapes clés pour développer une carrière d'influenceur dans le secteur de l'électronique. Les deux événements proposeront une table ronde animée par des experts. 

240566-04

# kit MultiCalculator d'Elektor



Un kit de calculatrice basé sur Arduino pour l'électronique

Ruud van der Meer (Pays-Bas)

Le MultiCalculateur d'Elektor est plus qu'une simple calculatrice. Il permet non seulement de calculer des valeurs en formats binaire, hexadécimal et décimal, mais il est également équipé pour mesurer la lumière, la température et la différence de température. Il décode aussi les signaux des télécommandes IR de type NEC, analyse les couleurs des bandes de résistances, et mesure la réactance capacitive et inductive.

Plus qu'un appareil multifonction, ce kit inclut des composants électroniques et mécaniques variés, des vis, des capuchons de touches, ainsi qu'un boîtier.

La photo ci-dessus prouve que le kit assemblé est loin de ressembler à un simple bricolage. Il est équipé de touches colorées spécialement conçues et d'un écran LCD à deux lignes. Le tableau des **caractéristiques** détaille les nombreuses fonctionnalités offertes par ce kit. Pour des informations plus approfondies, veuillez consulter le tableau des **spécifications**.

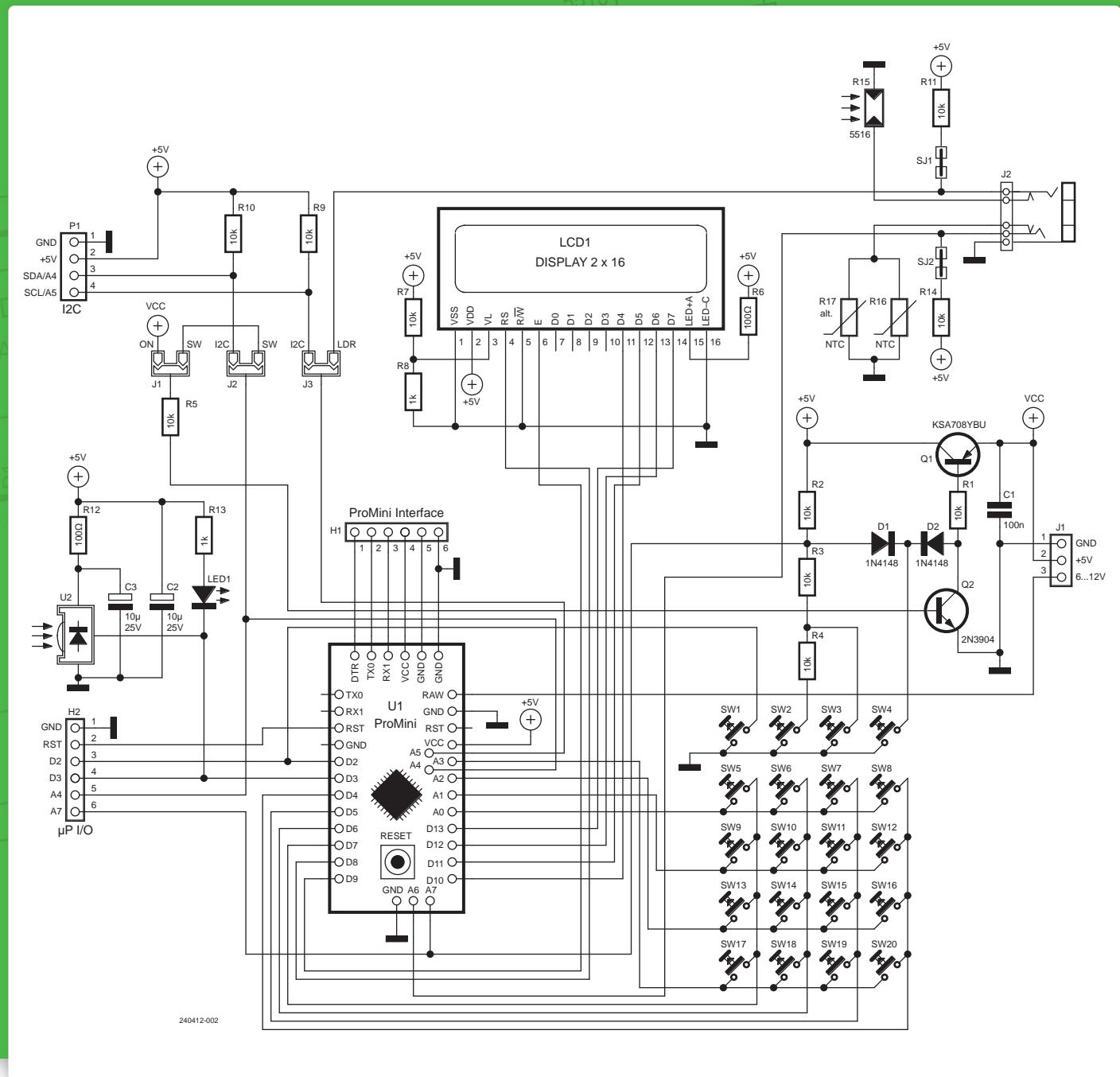
## Généralités

Le MultiCalculator est basé sur un module Arduino Pro Mini et il est possible de le reprogrammer même après l'assemblage, grâce à un connecteur femelle à six broches accessible à l'arrière. Le MultiCalculator prend en charge des menus en néerlandais et en anglais. Il est alimenté en 5 V via l'USB-C et ne consomme que 30 mA environ. Sa polyvalence est accrue par la possibilité d'ajouter d'autres fonctionnalités via un logiciel personnalisé, utilisant l'environnement de développement intégré (EDI) Arduino standard.



## Caractéristiques

- Calcul de la virgule flottante décimale.
- Calcul binaire, hexadécimal et décimal.
- Visualisation de caractères ASCII
- Mesure de la température et du delta-T.
- Chronomètre avec temps au tour
- Décodeur de valeur de résistance
- Calcul de la réactance capacitive (Xc) et inductive (Xi)
- Calcul de la résistance équivalente : parallèle, série et supplémentaire
- Mesure de la lumière en mV et Lux
- Compteur d'objets
- Décodeur IR pour les codes NEC
- AWG avec calcul du courant maximum
- Dés avec simulation de lancer
- Personnalisation de la calculatrice
- Calibrage de la mesure de température (correction du point zéro)
- Écran LCD à deux lignes (affichage bleu avec texte blanc)



## Spécifications

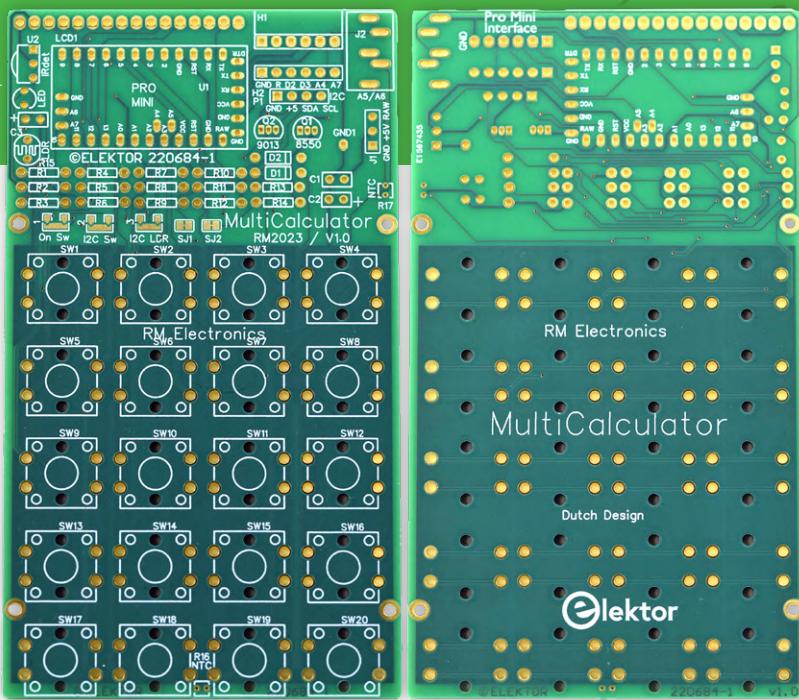
- Tension d'alimentation : 5 V (USB-C)
- Courant d'alimentation : 28...32 mA
- Arduino Pro Mini (ATmega328P @16MHz)
- Programmable avec l'E Dld'Arduino
- LCD alphanumérique 2x16 (LCD 1602, affichage bleu avec texte blanc)
- 20 boutons poussoirs étiquetés
- Prise jack 3,5 mm pour capteurs externes
- Plage de mesure des capteurs étanches -40 à +85 °C
- Dimensions : 92x138x40 mm 92x138x40 mm

La **figure 1** montre ce circuit remarquable, à la fois simple et efficace. Les ports série de l'Arduino restent disponibles pour la surveillance ou pour d'autres fonctions. Sur le circuit imprimé, on trouve également des connexions pour GND, Reset, D2, D3, A4, A7 (connecteur H2, non utilisé/monté ici). Une connexion I<sup>2</sup>C est également disponible (connecteur P1, non utilisé/monté ici). Pour utiliser I<sup>2</sup>C, il faut souder les ponts de soudure nécessaires (voir **figure 2**). L'activation de l'I<sup>2</sup>C se fait via le double



Figure 1. Le circuit du MultiCalculator est simple mais efficace. La complexité réside dans le logiciel.

Figure 2. Les ponts de soudure sur la face supérieure du circuit imprimé.



▲  
Figure 3. Face supérieure (gauche) et face inférieure (droite) du circuit imprimé.

▼  
Figure 4. Les capteurs de température étanches tels que fournis dans le kit (à gauche) et connectés à un jack de 3,5 mm (à droite).

pont de soudure J2 (I2C/Sw) à côté de R6 sur le circuit imprimé pour SDA (A4) et le double pont de soudure J3 (I2C/LDR) à côté de R9 sur le circuit imprimé pour SCL (A5). Sur chaque pont de soudure double, un seul pont de soudure doit être soudé sur le circuit imprimé ! Le module Arduino Pro Mini offre de nombreux ports d'entrée/sortie. Les ports d'E/S A5 et A6 sont accessibles via le connecteur jack 3,5 mm J2, reliés aux résistances pull-up R11 et R14 de 10 kΩ par les pistes des ponts de soudure SJ1 et SJ2 respectivement. Il est possible d'utiliser ces ports d'entrée/sortie pour des mesures de température ou d'autres applications (selon le logiciel). Pour couper les connexions à ces résistances pull-up, il suffit de couper la petite piste entre les pastilles de SJ1 et SJ2. Pour rétablir la connexion, créez un pont de soudure entre les pastilles adjacentes. Les capteurs LDR et NTC sont toujours connectés à la masse, respectivement en A5 (LDR/NTC) et A6 (NTC). Lorsqu'un LDR/NTC externe est connecté via J2, les composants internes LDR (R15) et NTC (R16 ou R17) sont automatiquement déconnectés. Sur le circuit imprimé (figure 3), vous pouvez placer des CTN aux emplacements R16 ou R17. Ils utilisent tous deux

les mêmes connexions. Il est essentiel de monter seulement une CTN à la fois. Utilisez plutôt R16, car son emplacement est le plus éloigné du module Arduino Pro Mini, ce qui empêche la CTN de se réchauffer. L'utilisation du jack J2 pour connecter un LDR/NTC externe déconnecte R15 et R16/R17.

U2 est un décodeur IR. Les signaux sont acquis par l'entrée D3 du Pro Mini. Une LED supplémentaire connectée à sa sortie s'illumine lors de la réception de signaux IR. Un port d'entrée analogique est utilisé pour la lecture des états des interrupteurs SW2, SW3 et SW4. Ils modifient la valeur des résistances R2 (via D1), R3 et R4 connectées en série. Les interrupteurs SW5 à SW20 sont organisés en matrice. SW1 est utilisé pour changer le mode du MultiCalculator et est connecté à un port E/S supplémentaire (D2). Une pression courte permet de passer au mode suivant, tandis qu'une pression plus longue rétablit le mode précédent.

SW4 est utilisé pour allumer ou éteindre le MultiCalculator par logiciel, en fonction du pont de soudure double 1 à côté de R3 sur le circuit imprimé (On/Sw). Si le pont de soudure est sur ON, le MultiCalculator est alimenté dès que 5 V sont fournis. Si le pont de soudure est sur Sw, le fait d'appuyer sur SW4 met le transistor PNP Q1 sous tension, tirant R1 à la masse via D2. Ensuite, l'alimentation est connectée au circuit et le module démarre. Il est nécessaire de maintenir SW4 enfoncé assez longtemps pour que le port E/S A4 passe à l'état haut, activant Q1 via R5 et le transistor NPN Q2.

Il est également possible d'alimenter la calculatrice avec une tension comprise entre 6 et 12 V via la connexion RAW sur le circuit imprimé (J1). Un petit régulateur de 5 V fait partie du circuit d'alimentation du module Pro Mini. Pour mettre l'appareil sous tension, il suffit d'appuyer sur le bouton ON/AC (SW4) jusqu'à ce que le texte s'affiche à l'écran. Pour éteindre la calculatrice, maintenez la touche ON enfoncée pendant plus de quatre secondes. Une fois la touche relâchée, le MultiCalculator s'éteint automatiquement.

À l'origine, l'auteur a utilisé un SS8550 pour le transistor PNP Q1 et un 2SC9013 pour le transistor NPN Q2, comme indiqué sur le circuit imprimé. En raison de leur indisponibilité, Elektor Labs a opté pour les remplaçants KSA708YBU et 2N3904. Bien que le type exact de transistor ne soit pas crucial, il est important de prêter attention à l'ordre des broches lors du remplacement, car des modèles fréquemment utilisés comme le BC547 ou le BC337 qui ont une disposition de broches différente. Vous pouvez programmer l'Arduino Pro Mini avec un convertisseur USB-C-to-TTL (inclus dans le kit) via H1. Assurez-vous que le cavalier sur l'adaptateur de programmation est positionné sur 5 V.

Le boîtier personnalisé est constitué de 11 panneaux acryliques transparents distincts. Les panneaux supérieurs sont en acrylique transparent de couleur marron foncé,



Figure 5. Contenu du kit MultiCalculator d'Elektor (sans le boîtier et les vis).



Figure 6. La carte entièrement peuplée sans l'afficheur LCD.

les autres sont transparents. Un **manuel de construction et d'utilisation** est disponible en téléchargement gratuit – pour y accéder, veuillez visiter le lien mentionné dans l'encadré **Produits**. Vous pouvez télécharger le logiciel et les bibliothèques nécessaires depuis la page web de cet article [1]. Les mises à jour futures seront publiées sur la page du projet sur Elektor Labs [2].

Ton Giesberts d'Elektor a apporté les dernières modifications à ce projet en corrigeant les fichiers de Ruud sur Altium Designer. Il a également procédé au remplacement de certains composants par des versions disponibles sur le marché et a apporté des corrections à de petites subtilités linguistiques dans le code de l'interface utilisateur. En outre, il a contribué au développement du boîtier. Cependant, les fonctions de base n'ont pas été modifiées.

### Mesure de la température différentielle

Le mode de mesure de la température différentielle n'est pas entièrement expliqué dans le manuel d'utilisation. Pour utiliser ce mode, vous devez souder les câbles des deux capteurs étanches inclus dans le kit (**figure 4**) à une fiche de 3,5 mm (également fournie dans le kit). Vous pouvez insérer la fiche dans le connecteur jack de 3,5 mm à l'arrière du MultiCalculator.

Commencez par couper les connecteurs des câbles des capteurs étanches. Chaque capteur doit être soudé à la borne GND de la fiche de 3,5 mm. Le fil restant de chaque capteur doit être connecté à l'un des autres contacts de la fiche. Il est conseillé de raccourcir légèrement les fils de masse afin que les fils restants soient un peu plus longs, facilitant leur soudure à chacun des deux autres contacts de la fiche de 3,5 mm sans avoir besoin de plier les fils. La prise du kit peut différer de celle illustrée sur la photo. Les mesures effectuées avec ces capteurs nécessitent du temps, car les CTN se trouvent à l'intérieur d'un tube métallique rond de 5×25 mm rempli d'époxy.



### Montage et impressions

La **figure 5** montre le contenu du kit Multicalculator. Les pièces du boîtier et les vis, bien qu'inclus, ne sont pas montrés sur cette image. Une fois le circuit imprimé complété (sans l'écran d'affichage), son apparence devrait correspondre à celle présentée dans la **figure 6**. Les **figures 7** et **8** dévoilent respectivement les vues latérale et arrière du MultiCalculator.

Dans la **figure 9**, tous les écrans de base correspondant aux 22 modes du logiciel dans la version 1.1 sont représentés.



Figure 7. Vue latérale du MultiCalculator assemblé.

Figure 8. Vue arrière du MultiCalculator assemblé.



-RM- MultiCalc. ELEKTOR V1.1	-RM- MultiCalc. ELEKTOR V1.1	*2-4R Resistance
*3-5R Resistance	*4-Dec -> HexCha	*5-Hex -> DecCha
*6-Dec -> BinCha	*7-Bin -> DecHex	*8-Hz,nF Xc Calc
*9-Hz,uH X1 Calc	10-R1R2=Rv Paral	11-R1R2=Rv Serie
12-RvR1=R2 Spec.	13-Temperature:+	14-T1&T2 < 0.1
0	19.1 °C.	19.0-19.0 °C. +
15-Light measur+	16-Stop/Lapwatch	17-Item Counter
443 mV 154 Lux		9999999
18-IRremote NEC	19-AWGconversion	19-AWG=22 < 1.6A
		0.64mm 0.33mm2
20-Dice... (= +)	21-Personalize	22-Temp.Correct.
		C=10 20.1 °C.

Figure 9. Les 22 modes de fonctionnement.

Ils correspondent à ceux listés dans le tableau des **modes de fonctionnement**. Les modes peuvent être modifiés ou étendus dans les versions futures du logiciel. Le manuel de construction de [1] est nettement plus détaillé que cet article, bénéficiant de l'avantage de ne pas être limité en nombre de pages.

Mise à jour : une nouvelle version du logiciel vient d'être publiée. Il y a deux modifications : La fonction 18 a été rendue plus efficace, au lieu d'utiliser un tableau, elle repose désormais sur un calcul. Une nouvelle fonction (nouvelle fonction 4) a été ajoutée, qui permet de décoder les résistances SMD EA96 (avec un tableau). Le nouveau micrologiciel, version 1.2, nécessite une nouvelle disposition de clavier (**figure 10**). Cette dernière est fournie sous forme d'image imprimable dans l'archive, disponible également en téléchargement [2]. ▶

240412-04

MODE	✓	↑	ON AC
7	8	9	÷
Violet	Gray	White	Gold F
4	5	6	X
Yellow-Z	Green	Blue	Silver E
1	2	3	-
Brown-YR	Red	Orange	None D
0	.	=	+
Black -XS	A	BH	C

Figure 10. Les nouveaux symboles des touches pour le micrologiciel v1.2.

## À propos de l'auteur

Ruud van der Meer (RM electronics) est ingénieur en électronique, concepteur de logiciels et de matériel et enseignant. Il a travaillé pendant plus de 40 ans dans une grande entreprise multinationale d'électronique. Ayant constaté que l'accès aux nouvelles technologies nécessitait souvent des études supplémentaires, Ruud van der Meer a entrepris d'enseigner au sein de son entreprise et dans un établissement d'enseignement technique. Ses cours couvrent l'électricité, l'électronique, les techniques numériques, les techniques de communication et la mécatronique. En parallèle, il exploite ses compétences en informatique pour mettre en place des systèmes de domotique à titre personnel.

## Questions ou commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur (meergjm@gmail.com), ou contactez Elektor (redaction@elektor.fr).

### Modes de fonctionnement (logiciel v1.1)

1. Calculatrice
2. Code de résistance à 4 anneaux
3. Code de résistance à 5 anneaux
4. Conversion décimal-hexadécimal et caractères (ASCII)
5. Conversion hexadécimal-décimal et caractères (ASCII)
6. Conversion décimal-binaire et -caractère (ASCII)
7. Conversion binaire-décimal et hexadécimal
8. Calcul de Hz, nF et Xc (réactance capacitive)
9. Calcul du Hz, du  $\mu$ H et du XI (réactance)
10. Calcul de la résistance équivalente de deux résistances en parallèle
11. Calcul de la résistance équivalente de deux résistances en série
12. Calcul d'une résistance parallèle inconnue
13. Mesure de la température
14. Mesure de la température différentielle T1, T2 et Delta ( $\delta$ )
15. Mesure de l'intensité lumineuse
16. Chronomètre avec fonction lap timer
17. Compteur d'objets
18. Affichage du code NEC infrarouge d'une télécommande
19. AWG (American Wire Gauge) et courant maximum
20. Lancer les dés
21. Personnalisation du message de démarrage
22. Calibration de la température



## Liste des composants

### Résistances

R1...R5, R7, R9...R11, R14 = 10 kΩ, 1%

R6, R12 = 100 Ω, 1%

R8, R13 = 1 kΩ, 1 % R15 = LDR GL5516, 5,5

R15 = LDR GL5516, 5,4x4,4 mm, pas de 3,4 mm

R16 = NTC 10 kΩ, type 3950, 5 % R17 = NC, 100 kΩ, 1 % R17 = NC, 100 kΩ, 1

R17 = NC

### Condensateurs

C1 = 100 n / 50 V, 10 %, X7R, 1/10" C2, C3 = 10 µ / 25 V, 10 %, X7R, 1/10", X7R, 1/10".

C2, C3 = 10 µ / 25 V, 10%, tantale, 1/10".

### Semi-conducteurs

D1, D2 = 1N4148, DO-35

LED = LED rouge, 3 mm

Q1 = KSA708YBU, TO-92\*

Q2 = 2N3904, TO-92\*

U1 = Arduino Pro Mini (ATmega328P, 5 V, 16 MHz)

U2 = DéTECTEUR IR TSOP14438

LCD1 = Module LCD 1602, alphanumérique, 36x80 mm

### Divers

J1 = Prise USB-C, (alimentation 5 V uniquement), 9x16 mm

J2 = Prise pour casque d'écoute de 3,5 mm, pour circuit imprimé, PJ-325M (connexions à 5 broches, 2 contacts commutés)

H1 = Connecteur femelle à 6 broches, angle droit, 1/10".

H2 = NC\*

P1 = NC

SW1...SW20 = interrupteurs tactiles, 12x12x7,3 mm

20 keytops + capuchons transparents pour les interrupteurs (capuchon de 11,8x11,8 mm)

Connecteur mâle à 16 broches, hauteur 18,54 mm, 1/10", vertical, pour LCD

Connecteur à 16 broches, 1/10", verticale, pour LCD

FT232 Pro Mini USB-C adaptateur TTL (avec sélection 3,3 V / 5 V)

U1 = Connecteur à 12 broches, vertical, 1/10", pour Arduino Pro Mini

2x NTC, 10 kΩ, capteur de température étanche, type 3950 10K avec 1 m de câble

Prise de 3,5 mm

Câble USB-A vers USB-C, 1 m

Circuit imprimé 220684-1 v1.0

### Boîtier

4x vis, M2x12, acier

4x entretoise, cylindrique, longueur 3 mm, Øout : 5 mm, polyamide

4x écrou, M2, acier

8x rondelle, M2, Ø 5 mm, hauteur 0,3 mm, polyamide

4x vis, M3x6, acier

4x rondelle, M3, Ø 7 mm, hauteur 0,5 mm, polyamide

4x entretoise, M3, femelle-femelle, Øout : 6 mm, longueur 8 mm, polyamide

4x vis, M3x10, tête fraisée, clé hexagonale (Allen) 2 mm, acier

Vis 4x, M3x12, tête fraisée, clé hexagonale (Allen) 2 mm, acier

4x écrou, M3, revêtement noir, hauteur 2,4 mm, acier

4x support autocollant ; hauteur 3,8 mm, transparent, polyuréthane

6 panneaux en acrylique extrudé de 3 mm, transparent/clair :

arrière, avant, bas, 2x côté, et panneau de support du clavier en forme de U

2 panneaux de support d'afficheur en acrylique extrudé transparent/clair de 5 mm

3 panneaux en acrylique umbra transparent de 3 mm ( marron foncé )

: cadre de l'afficheur, petit support pour le cadre de l'afficheur et panneau du clavier.

\* voir texte



Produit

► Elektor MultiCalculator Kit  
www.elektor.fr/20848

## LIENS

[1] Page web de cet article : <https://elektormagazine.fr/240412-04>

[2] Le Multicalculator sur Elektor Labs : <https://tinyurl.com/multicalclabs>

# systèmes GNSS RTK à faible coût

Avec un degré de précision de l'ordre du centimètre

Giovanni Carrera (Italie)

Le GPS (*Global Positioning System*) est connu et utilisé dans le monde entier dans la vie de tous les jours. Cependant, d'autres systèmes, appelés GNSS RTK, sont moins connus. Ils effectuent des mesures de la phase de la porteuse sur plusieurs systèmes de satellites et atteignent une précision inférieure au centimètre, à des prix désormais abordables, même pour un hobbyiste.

Les premiers récepteurs RTK (*Real-Time Kinematic*) étaient exclusivement destinés à des usages professionnels, tels que les mesures topographiques. Les récepteurs professionnels coûtent encore plusieurs milliers d'euros. Depuis quelques années, on trouve sur le marché des modules offrant de nombreuses applications à un coût nettement inférieur : Outre les applications traditionnelles telles que les SIG (systèmes d'information géographique), ces récepteurs RTK sont particulièrement adaptés au contrôle d'aéronefs et autres véhicules, tels que les UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) et les UGV (*Unmanned Ground Vehicles*) comme les engins agricoles sans présence humaine et les drones.

An interesting application is by using two RTK receivers linked together to measure not only position, but also heading and roll, or pitch. This satellite compass is much more accurate than a magnetic compass and even than a gyrocompass.

Une application intéressante consiste à utiliser deux récepteurs RTK reliés entre eux pour mesurer, non seulement la position, mais aussi le cap et le roulis, ou le tangage. Ce compas satellitaire est beaucoup plus précis



Source : Shutterstock

qu'un compas magnétique et même qu'un gyrocompas. J'ai utilisé trois récepteurs RTK, dont les antennes ont été montées sur le pont d'un navire, pour mesurer les trois mouvements angulaires avec une grande précision.

## GNSS

Les récepteurs de navigation par satellite sont généralement appelés GPS, mais les récepteurs les plus sophistiqués, qui sont capables de traiter des signaux provenant de diverses constellations de satellites, comme le GLONASS russe, le BeiDou chinois ou le Galileo européen, sont définis comme des GNSS (*Global Navigation Satellite Systems* ou systèmes mondiaux de navigation par satellite).

Contrairement aux appareils GPS ordinaires, les récepteurs GNSS peuvent voir davantage de satellites, et choisir ceux qui ont la meilleure position ou des signaux plus forts ; il s'agit d'une caractéristique très importante quand il s'agit d'effectuer des mesures avec une précision inférieure au centimètre, comme le RTK. La technique RTK est utilisée pour obtenir des mesures de position instantanées et très précises avec les systèmes satellitaires GNSS. Elle utilise la mesure de la phase des ondes porteuses transmises par les satellites, seuls certains récepteurs satellites sont capables d'effectuer le suivi de la phase de la porteuse. La précision de ces récepteurs est de l'ordre du centimètre, voire du millimètre, selon la qualité du récepteur et de son antenne. Ces récepteurs, essentiellement conçus pour un usage topographique, sont capables de recevoir deux ou trois porteuses et coûtent plusieurs milliers d'euros. Cependant, des entreprises comme le suisse U-blox, produisent depuis des années des récepteurs à bas prix, capables d'effectuer des mesures de phase. Le problème se situait au niveau du logiciel de traitement, qui demeure encore très coûteux. L'ingénieur japonais Tomoji Takasu a largement contribué



à résoudre ce problème en écrivant ses programmes RTKLIB [1] et en les rendant open source (logiciels libres). Entre-temps, les évolutions technologiques de l'électronique ont permis la production de microcontrôleurs de plus en plus puissants, permettant au traitement RTK d'être effectué directement dans le récepteur lui-même, atteignant une précision de quelques centimètres, même sans utiliser un PC.

Et c'est précisément de ces systèmes que traite cet article ; étant donné l'étendue et la complexité de ces sujets, je n'aborderai pas en détail le principe de fonctionnement des systèmes GNSS, mais je propose plutôt une bibliographie : [2][3].

## Systèmes de satellites

Le premier prototype de satellite GPS a été mis en orbite en février 1978 et, en 1995, le système a atteint sa pleine capacité opérationnelle (*FOC Full Operational Capability*) pour les applications civiles et militaire.

Outre le GPS américain, d'autres systèmes ont été introduits, tels que le GLONASS russe précédemment mentionné, le BeiDou chinois et le Galileo européen. Des systèmes satellitaires ont également été développés pour accroître la précision d'un récepteur autonome. Ces systèmes utilisent des satellites géostationnaires et un réseau de stations terrestres destinées à effectuer des corrections différentielles à long terme. Les résultats sont inférieurs à ceux obtenus avec le DGPS (*Differential GPS*), car le système opère sur une plus grande zone, mais l'utilisateur a l'énorme avantage de pouvoir améliorer la précision et la fiabilité des mesures sans utiliser d'équipement sophistiqué et coûteux !

Les récepteurs satellites modernes peuvent recevoir des satellites de différentes constellations ainsi que des signaux provenant de satellites SBAS (Satellite-Based Augmentation System), tels que le WAAS (*Wide-Area Augmentation System*) américain et l'EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) européen. Les fréquences porteuses des différents systèmes étant différentes, l'antenne doit également être capable d'assurer la réception de toutes ces fréquences. Pour des mesures de précision, l'antenne doit être de bonne qualité, car elle peut avoir une grande influence sur les résultats. Pour éviter que l'antenne ne soit perturbée par les réflexions des faisceaux multiples, il est préférable de la fixer sur une plaque métallique d'un diamètre d'au moins 10 cm, reliée à la terre.

## Le récepteur différentiel en code et en phase

Pour les applications nécessitant une grande précision de la position, il convient d'utiliser des récepteurs DGPS/DGNSS. Les systèmes GPS/GNSS sont sujets à plusieurs erreurs de mesure, dues en grande partie à la propagation des ondes électromagnétiques dans l'ionosphère et la troposphère. Il en résulte une précision de positionnement horizontal allant de 2 à 10 mètres. Pour

y remédier, on utilise des systèmes différentiels, c'est-à-dire deux stations suffisamment proches (ligne de base ne dépassant pas 15 km) pour voir des satellites ayant la même configuration de position. Les récepteurs DGNSS peuvent réduire considérablement ces erreurs en utilisant la différence entre les mesures des deux stations. Les récepteurs fonctionnant uniquement avec les codes qui leur parviennent atteignent une précision de l'ordre du mètre, ceux qui utilisent également la phase de la porteuse peuvent atteindre une précision de l'ordre du millimètre. Ils utilisent deux récepteurs : l'un dans une station fixe ou de base, l'autre dans une station mobile (ou rover). Le récepteur du rover sera différent d'un récepteur standard, car il devra corriger les données en fonction des informations provenant de la station de base.

La station de base transmet les corrections différentielles en format brut ou RTCM (format international mis en place par la « *Radio Technical Commission for Maritime Services* » au rover. Ces stations doivent être suffisamment proches (<10 km) pour obtenir la meilleure précision ; pour des distances plus longues, la précision diminue car les récepteurs « voient » une configuration de position différente pour les satellites.

La station de base transmet les données brutes/RTCM via une liaison radio établie avec Wi-Fi, Bluetooth ou un modem radio, selon les distances à couvrir, comme le montre la **figure 1**. Si la zone est couverte par des réseaux cellulaires, les données peuvent être transmises par GSM, GPRS ou via l'internet.

Les récepteurs GPS courants mesurent la distance satellite-antenne en analysant le code reçu (portée du code). Les bits du code PRN (Pseudo Random Noise ou bruit pseudo-aléatoire) sont générés à une fréquence de 1,023 MHz, ce qui correspond à la longueur d'onde  $\lambda = 2931$  m, qui est la longueur spatiale de chaque bit. La mesure de corrélation des codes générés par le satellite et le récepteur s'effectue à 1 % de  $\lambda$ , ce qui conduit à une précision d'environ 3 à 5 m, en considérant également les autres erreurs inhérentes au système. Un système DGPS avec des récepteurs de codes offre une meilleure

Figure 1.  
Système différentiel.

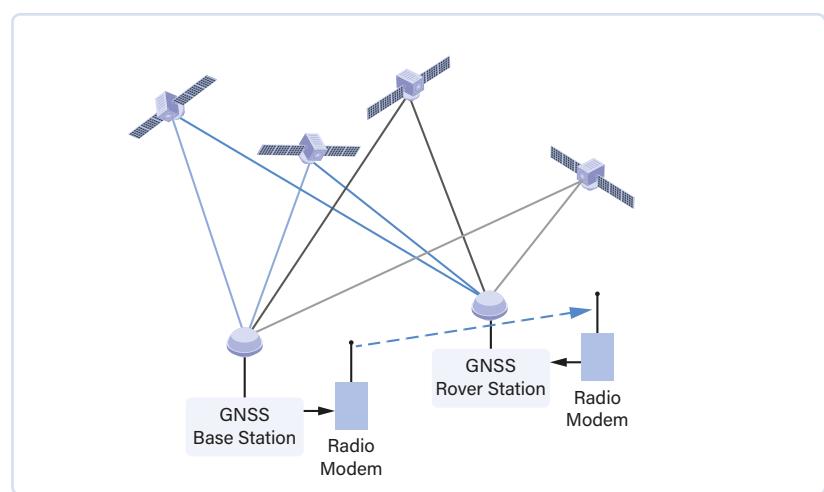
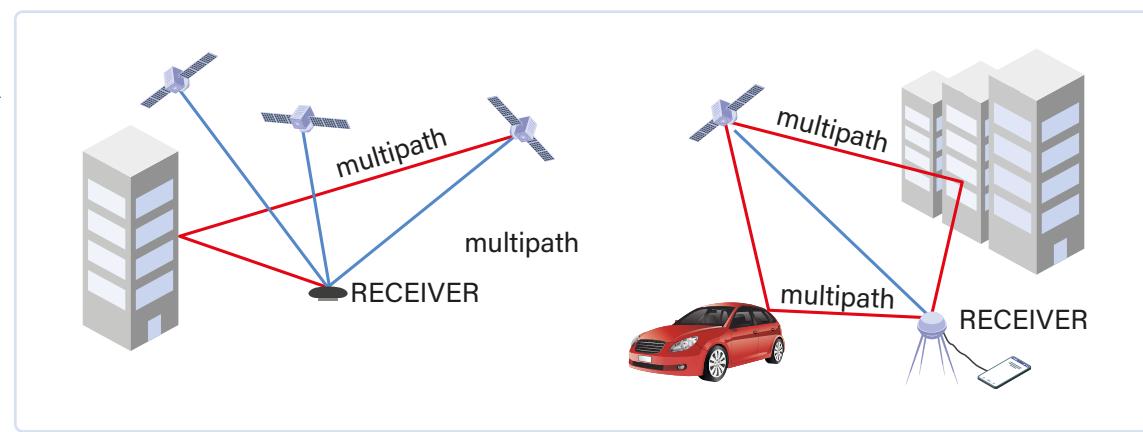


Figure 2.  
Exemples de réception  
de signaux multiples.



précision, mais elle descend difficilement en dessous d'un mètre.

Le code PRN se répète périodiquement, toutes les millisecondes, de sorte que la mesure de la distance présente une ambiguïté égale à cette périodicité, soit environ 300 km. Cette ambiguïté est considérable, mais elle est facilement éliminée puisque l'on connaît la distance avec une approximation d'au moins 100 km. Pour un positionnement très précis, nous avons besoin de récepteurs qui peuvent également travailler sur le suivi de la phase de la porteuse. Les mesures de phase sont beaucoup plus précises, car elles utilisent également les ondes porteuses : Pour le GPS, les longueurs d'onde sont d'environ 19 cm pour L1 et 24 cm pour L2. Si l'on considère qu'il est possible de mesurer des déphasages inférieurs à un degré, la précision devient de l'ordre du millimètre, sans tenir compte des autres sources d'interférence. Dans ce cas, la mesure de la distance est calculée en déterminant le nombre de cycles de la porteuse entre le satellite et l'antenne réceptrice, puis en multipliant ce nombre par la longueur d'onde. Le calcul du nombre de cycles entiers est un processus compliqué appelé « résolution d'ambiguïté ». Il nécessite au moins 6-7 satellites avec une bonne configuration de position, et la résolution de l'ambiguïté prend quelques dizaines de secondes. Le rover détermine sa position à l'aide d'algorithmes qui intègrent la résolution de l'ambiguïté et la correction différentielle. La précision de la position du rover dépend, entre autres, de sa distance par rapport à la station de base, appelée « ligne de base », de la précision des corrections différentielles et de la qualité des observations satellitaires de la station de base. Pour obtenir une bonne précision absolue, indispensable pour les utilisations topographiques, il est nécessaire de connaître la position de la station de base ; sinon, on travaille avec un positionnement relatif.

### Mesures RTK et post-traitement

Si l'on souhaite des mesures de position précises en temps réel, nous avons besoin d'un système RTK. Le récepteur du rover doit être équipé d'un processeur supplémentaire suffisamment puissant pour pouvoir calculer la solution de l'ambiguïté de phase. De plus, le rover doit recevoir les données de correction en temps réel. Ces systèmes sont plus complexes et nécessitent un système radio ayant une capacité suffisante pour couvrir la zone dans laquelle ils devront fonctionner. Les récepteurs RTK sont plus coûteux que les récepteurs de phase

porteuse car ils nécessitent une plus grande puissance de calcul. Avec ces récepteurs, il n'est pas nécessaire d'avoir un PC, sauf pour visualiser les résultats des solutions RTK ou pour sauvegarder les mesures.

Si nous ne voulons pas connaître la position correcte en temps réel, nous pouvons travailler en mode post-traitement. Dans ce cas, le système ne nécessite pas la transmission de données de correction. La station de base et le rover doivent être équipés d'un petit ordinateur doté d'un logiciel spécifique pour le suivi et l'enregistrement des données sur disque. Il est également possible d'utiliser un petit enregistreur de données en série. En une seconde, les deux fichiers acquis par les stations au cours de la même période sont traités et les positions précises du rover peuvent être calculées. Le post-traitement permet généralement d'obtenir des mesures plus précises, car la puissance de calcul disponible est plus importante.

### Éléments limitant l'utilisation du système RTK

Contrairement à un récepteur GPS normal, tel que ceux intégrés dans les smartphones ou les systèmes de navigation des voitures ou des bateaux, les systèmes RTK nécessitent les conditions de fonctionnement suivantes pour atteindre une précision de l'ordre du centimètre :

- la ligne de base, qui est la distance entre la base et le rover <10 km
- l'antenne doit voir le ciel à 360° horizontalement et à au moins 15° en élévation
- absence de sources d'interférences électromagnétiques à proximité
- signaux reçus des satellites >37 dB
- 7 satellites ou plus avec une bonne géométrie

Les obstacles qui peuvent masquer les satellites sont les murs, les grilles ou tôles métalliques, les pylônes, les arbres et même le corps des animaux. Un obstacle est un objet opaque aux ondes radio, dont les dimensions sont supérieures à la longueur d'onde  $\lambda$  de la porteuse. Pour le GPS, cette longueur d'onde est d'environ 19 centimètres. Pour ces raisons, il faut toujours se tenir à l'écart de l'antenne satellite.

Ces obstacles, en plus de ne pas laisser passer les ondes électromagnétiques, peuvent également agir comme des réflecteurs, créant le phénomène de trajets multiples, tels que ceux illustrés sur la **figure 2**.



En utilisant uniquement une constellation GPS, il peut y avoir des interruptions au cours de la journée, en raison de l'indisponibilité momentanée d'au moins sept satellites ayant un bon positionnement géométrique. Pour ces raisons, un récepteur GNSS capable de recevoir deux constellations ou plus en même temps dispose d'un plus grand nombre de satellites pour choisir ceux qui ont une meilleure configuration de positionnement géométrique.

## Précautions pour le montage de l'antenne

Comme dans tous les systèmes radio, l'antenne est très importante et une installation incorrecte nuit considérablement à l'efficacité du système RTK. N'oubliez pas que la position, c'est-à-dire le point de repère, est relative au centre de l'antenne. L'antenne est relativement simple, elle doit avoir des caractéristiques isotropes uniquement pour la partie supérieure de l'horizon. L'antenne la plus courante est l'antenne patch, elle a une forme plate faite d'une plaque conductrice avec un matériau céramique interposé, elle a un profil bas et une forme carrée ou circulaire, et elle est souvent montée sur une base magnétique. Elle est généralement active, c'est-à-dire qu'elle intègre un amplificateur de signal dont l'impédance de sortie ( $50\ \Omega$ ) correspond à celle du câble coaxial de ligne. Les récepteurs peuvent alimenter l'amplificateur de l'antenne par le même câble. L'antenne doit être montée de manière à respecter les règles décrites ci-dessus, c'est-à-dire dans une position surélevée par rapport aux obstacles environnants. Pour les systèmes RTK, ces règles sont encore plus restrictives que pour un système de navigation normal, qui fonctionne également à l'intérieur du véhicule. Un assemblage d'antennes tel que celui de la **figure 3a** est à éviter à tout prix, car son profil l'empêche de voir les satellites situés à moins de  $45^\circ$  d'élévation sur sa droite. Il est donc nécessaire de placer l'antenne sur un support élevé plus approprié, comme illustré sur la **figure 3b**.

## Données brutes RTCM et RINEX

Comme nous l'avons mentionné, pour pouvoir traiter la position correcte en temps réel, le rover doit recevoir de la station de base les mesures de phase, à des fins de correction. Il existe généralement deux types de messages, tous deux en binaire :

- données en format brut
- données au format RTCM

Le premier est propriétaire, c'est-à-dire qu'il est développé par le fabricant du module de réception. Cela signifie que des modules de la même famille doivent être utilisés pour les deux stations. Le format brut est le plus complet et permet donc une plus grande précision. Cependant, il implique une plus grande quantité de données à transmettre, ce qui peut poser des problèmes au système de communication en raison de la plus grande largeur de bande requise.

Le format RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) est de type standard, les dernières versions, 3.x, ayant une meilleure compression des données et une meilleure intégrité des messages que les versions 2.x. Il permet également utiliser différents récepteurs ou même des données provenant d'une station du réseau régional, l'important étant de vérifier que les versions sont identiques. L'inconvénient est toutefois sa moindre précision.

Il existe également un troisième format, le RINEX (*Receiver-INdependent Exchange Format*). Il s'agit également d'une norme, les dernières versions étant 3.x. Comme il s'agit d'ASCII, il n'est pas très compact. Seuls les récepteurs les plus coûteux offrent également ce format de sortie. Il est largement utilisé par les programmes de post-traitement tels que RTKPOST et RTKLIB. Dans ce cas, il faut acquérir les données brutes dans des fichiers puis les convertir en RINEX avec RTKconv. Le système de transmission de la base au rover n'est plus nécessaire, mais les stations doivent être équipées d'enregistreurs de données. Bien sûr, avec ce système que j'ai utilisé jusqu'à présent, nous ne disposons pas des données en temps réel, mais nous pouvons atteindre une plus grande précision, par rapport aux récepteurs RTK.

## Utilisation des réseaux de stations fixes

Dans certaines régions, il existe des réseaux GNSS très précis qui permettent d'obtenir des mesures en temps réel. L'un de ces systèmes est NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol), ce protocole est implémenté dans RTKLIB. Pour l'Europe, voir EUREF [4]. En Italie, il existe un certain nombre de stations, mais toutes n'utilisent pas ce protocole.

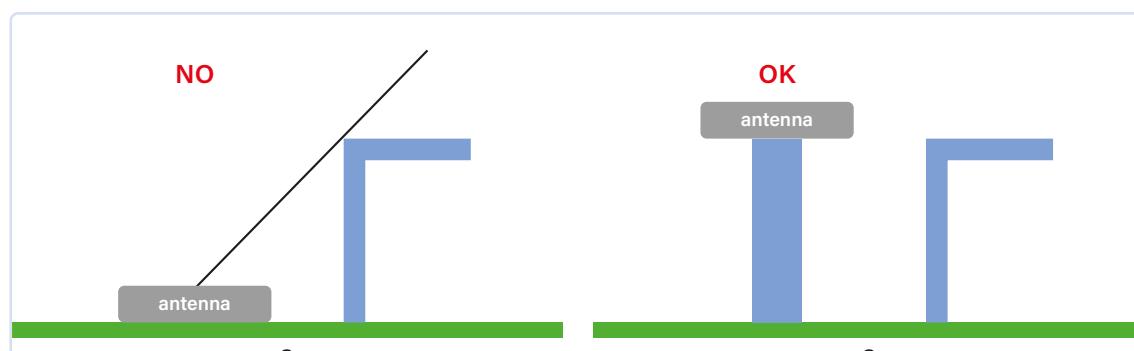


Figure 3.  
Précautions pour  
l'installation des  
antennes.

Tableau 1. Récepteurs de phase GNSS

Référence de la carte	Dénomination et Fabricant	Module GNSS	Satellites reçus
 (Source : U-blox)	U-blox NEO-M8T Time & RAW Receiver	U-blox M8T	GPS, QZSS, GLONASS, BeiDou
 (Source : NVS Technologies)	NV08C-CSM-BRD NVS Technologies	NVS NV08C	GPS, Galileo, GLONASS
 (Source : NavSpark)	NS-RAW Carrier Phase Raw Measurement NavSpark	Venus822A	GPS, SBAS, QZSS

Tableau 2. Récepteurs RTK.

Référence de la carte	Dénomination et Fabricant	Module GNSS	Satellites reçus
 (Source : U-blox)	NEO-M8P RTK GNSS	U-blox M8P	GPS L1 C/A, GLONASS L1OF, BeiDou B1I
 (Source : NVS Technologies)	NV08C-RTK-M NVS Technologies	NV08C-RTK-M	L1 & L2 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
 (Source : Mikroe)	GNSS RTK Click MIKROE-4456	U-blox ZED-F9P	GPS, GLONASS, Galileo et BeiDou + SBAS et QZSS
 (Source: ArduSimple)	simple RTK2B ArduSimple	U-blox ZED-F9P	GPS, GLONASS, Galileo et BeiDou + SBAS et QZSS
 (Source : NavSpark)	S2525F8-GL-RTK EVB	S2525F8-GL-RTK	GPS, GLONASS



Dans ce cas, seul le récepteur du rover est connecté à un smartphone ou une tablette munie d'une carte SIM et de l'application RTKLIB. La précision est beaucoup plus faible que celle mettant en œuvre deux stations et dépend de la distance de la station de référence utilisée pour la correction. Ce système ne fonctionne que si le mobile peut accéder à un réseau terrestre et s'il y a des stations NTRIP à proximité.

### Récepteurs GNSS pour systèmes RTK

Aujourd'hui, il existe plusieurs récepteurs sur le marché à un prix relativement bas. Les moins chers ne font que des mesures de phase et les transmettent à un PC ou à un Raspberry Pi sur lequel est installé le programme open-source RTKLIB du créateur japonais Tomoji Takasu. Ce programme s'est répandu parce qu'il est gratuit et très actuel. L'un de ces programmes, RTKPOST, peut traiter les données au format brut ou au format RINEX, en post-traitement. Avant d'acheter un récepteur de phase GNSS, il faut vérifier qu'il est inclus dans la liste des récepteurs compatibles avec RTKLIB.

Le **tableau 1** présente quelques exemples de cartes relativement bon marché avec mesure de la phase de la porteuse (RAW) et récepteurs compatibles RTKLIB. Ces cartes, avec un ordinateur et RTKLIB, peuvent devenir des systèmes RTK à faible coût. Seuls quelques modules U-blox sont capables de fonctionner sur la phase, le plus récent étant le NEO M8T.

La carte NavSpark NS-RAW, qui contient une puce SkyTraq Venus822A avec des sorties brutes et un microcontrôleur LEON3 Sparc-V8 32 bits avec une unité IEEE-754 64 bits à virgule flottante cadencée à 100 MHz, est particulièrement intéressante. Le logiciel est développé à l'aide de l'IDE Arduino avec l'ajout du programme Arduino NavSpark Boards by SkyTraq ajouté à l'aide du Card Manager. Le puissant processeur dispose d'une mémoire flash de 1024 Ko et d'une mémoire vive de 212 Ko. L'alimentation est assurée par le port USB, avec un régulateur à faible chute (LDO) qui fournit 3,3 V à la carte. L'antenne satellite se connecte à l'aide d'un connecteur U.FL.

Le **tableau 2** présente des exemples de cartes RTK bon marché. Il ne s'agit que d'exemples que j'ai sélectionnés en tenant compte du prix. J'ai longuement expérimenté les deux derniers récepteurs avec des résultats très satisfaisants, comme on le verra plus loin. Le système chinois SkyTraq a été testé il y a cinq ans et présente un bon rapport qualité-prix. Ce récepteur a été remplacé récemment par un récepteur plus performant.

Il y a quelques années, le système suisse U-blox ZED-F9P a été testé, il présentait de meilleures performances pour un prix plus élevé.

### SkyTraq S2525F8 mesures de test

Une carte de développement basée sur le module SkyTraq S2525F8-GL-RTK [5] a été utilisée pour faciliter les tests.

Il s'agit d'un récepteur RTK, ayant un bon rapport qualité-prix, basé sur le chipset Venus8, qui offre une résolution centimétrique. La version la moins chère fournit une mesure RTK par seconde. La carte d'évaluation comporte deux adaptateurs TTL/USB basés sur la puce CP2102, pour la connexion au PC pendant l'installation et la configuration. Bien entendu, pour la connecter au PC, vous devez installer le pilote correspondant. Par défaut, la sortie NMEA du rover a une vitesse de transmission de 115 200 bit/s, tandis que la base émet au format SkyTraq Raw Data avec une vitesse de transmission de 57 600 bit/s.

La **figure 4** montre l'antenne et la carte, d'une taille d'environ 90×90 mm, utilisées pour les essais. L'antenne est une antenne multi bande bon marché pour GPS/Galileo, BeiDou, GLONASS. Il s'agit d'une antenne active avec un gain de 25×27 dB alimentée par 3,3 V à 10 mA (fournie par le récepteur). Ses dimensions sont de 49×46×16 mm, le connecteur est de type SMA et le câble coaxial est un RG174 de 3 m de long. Pour éviter le bruit des signaux multiples, les antennes ont été fixées sur une plaque métallique mise à la terre d'environ 15 cm de diamètre. Comme indiqué précédemment, il est nécessaire que la station rover reçoive le message de la station de base avec les corrections en temps réel, si l'on veut obtenir une grande précision. Ce message est assez long et sa longueur varie (voir RAW/RTCM dans le paragraphe « récepteur différentiel en code et en phase » ci-dessus). Une liaison radio en bande Wi-Fi réalisée avec des dispo-

Figure 4.  
La carte GNSS RTK et l'antenne.

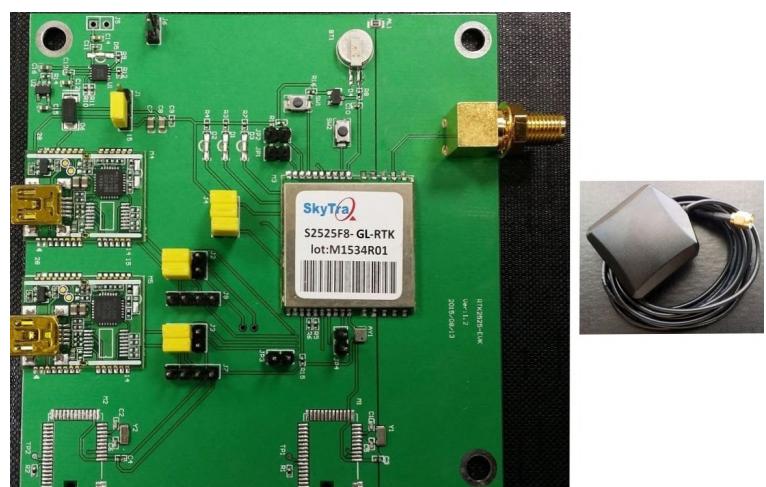


Figure 5. Le modem radio XBee, son antenne et le convertisseur d'alimentation.

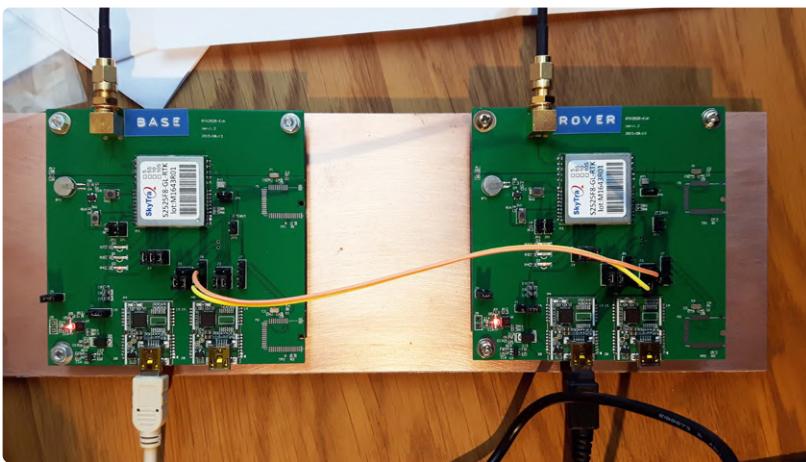


Figure 6. Test de la ligne de base courte.

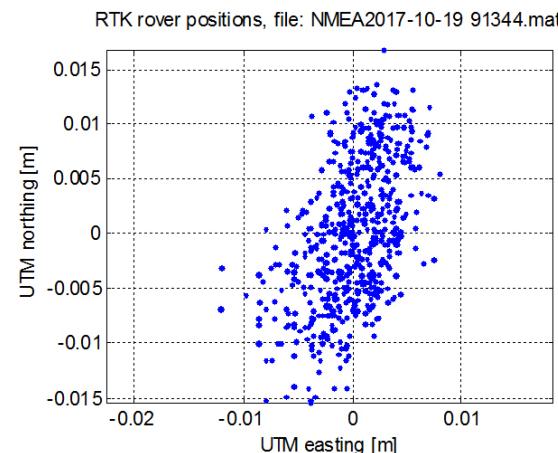


Figure 7.  
Test en position fixe.  
Coordonnées UTM  
en mètres (Universal  
Transverse Mercator).

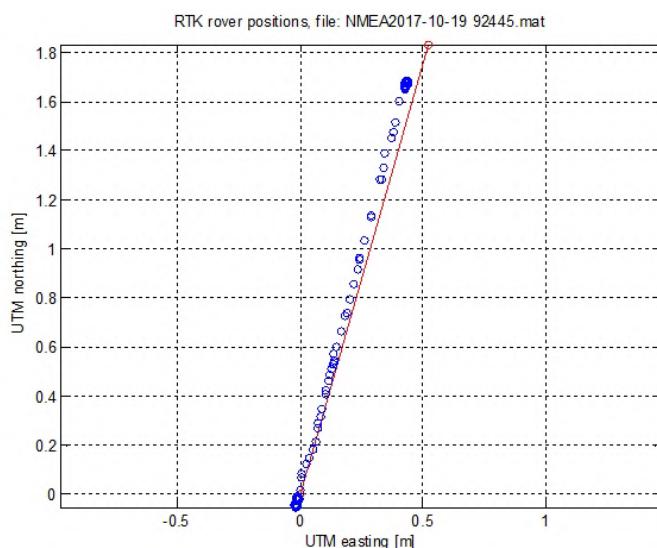


Figure 8. Test en déplacement rectiligne. Coordonnées UTM en mètres (Universal Transverse Mercator).

sitifs XBee était prévue pour ce système, et elle a été testée avec succès jusqu'à une distance d'environ 800 m dans des conditions sous-optimales. Avec des antennes à gain plus élevé et en l'absence d'obstacles, il serait possible d'atteindre une plus grande portée.

### Modems radio et limites imposées par la réglementation en vigueur

Avec ces limites, il est possible de transmettre un signal à faible largeur de bande, limité à quelques kHz et avec des portées en visibilité directe de quelques kilomètres. Les règles sur la bande des 2,4 GHz sont moins restrictives, puisqu'il est possible d'utiliser jusqu'à 100 mW sans aucune autorisation pour des réseaux locaux dans une zone privée. C'est pourquoi le choix s'est porté sur un système XBee Pro S1 de 2,4 GHz de Digi International. Il s'agit d'un émetteur-récepteur de données sérialisées pouvant atteindre 250 kb/s, avec une puissance de sortie maximale de 18 dBm (63 mW) et une sensibilité de réception de -100 dBm. Il est alimenté à 3,3 V et possède un connecteur d'antenne SMA inversé (RP-SMA). Pour compléter chaque appareil, il faut une antenne omnidirectionnelle avec un connecteur femelle RP-SMA et un adaptateur orientable à 90°, ainsi qu'un convertisseur d'alimentation LDO (Low DropOut) à faibles pertes de 5 V à 3,3 V. La figure 5 montre les différents éléments des deux appareils qui constituent la liaison radio.

Pour le module XBee de la station de base, la puissance est réglée sur 3 (High) et non sur 4 (Highest), de sorte que la puissance de sortie est au niveau 3, ce qui correspond à 16 dBm (40 mW).

### Programmes de configuration du récepteur RTK

Le fichier *GNSS\_Viewer.zip* doit être téléchargé [6]. Ce programme est utilisé pour configurer les récepteurs et afficher les mesures RTK du rover. Il y a un autre fichier *GNSS\_Viewer-NmeaPlayer.zip* contenant un programme qui ne configure pas le récepteur, mais qui affiche les mesures RTK et les données précédemment enregistrées au format NMEA.

Les manuels de ces programmes sont également disponibles au format PDF. Un document essentiel à lire pour configurer ces cartes est le fichier *Getting\_Started\_with\_S2525F8-BD-RTK-EVB.pdf*.

La sortie est au format NMEA standard, sauf que la latitude et la longitude sont affichées avec 7 chiffres décimaux, contre 4 chiffres pour un récepteur normal, qui n'aurait pas permis pas d'obtenir la résolution subcentimétrique mesurée sur la phase porteuse.

Tableau 3. Bandes de réception et fréquences des différents systèmes satellitaires.

GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
L1C/A (1 575,42 MHz)	L1OF (1 602 MHz + k * 562,5 kHz, k = -7, ..., 5, 6)	E1-B/C (1 575,42 MHz)	B1I (1 561,098 MHz)
L2C (1 227,60 MHz)	L2OF (1 246 MHz + k * 437,5 kHz, k = -7, ..., 5, 6)	E5b (1 207,140 MHz)	B2I (1 207,140 MHz)

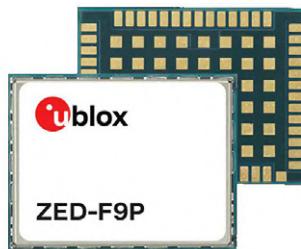


Figure 9.  
Le module ZED-F9P.  
(Source : U-blox)

## Tests statiques et dynamiques avec une ligne de base très courte

Lors des essais préliminaires, une ligne de base très courte a été utilisée : Outre l'interconnexion au sol, le port 1 de la base (Tx1 sur J8) a été connecté au port 2 du rover (Rx2 sur J3), comme le montre la **figure 6**.

Les deux récepteurs ont été alimentés par deux câbles USB connectés à un seul PC. Le système s'est rapidement mis en mode solution RTK. L'enregistrement du point fixe a donné de très bons résultats, probablement en raison de la bonne configuration géométrique et d'un nombre approprié de satellites. La solution RTK obtenue sur l'ensemble du test est de type FIX (Q = 4), soit très bonne, comme le montre la **figure 7**.

Les résultats sont également confirmés par le CEP95 (rayon du cercle contenant 95% des mesures) qui n'est que de 12 mm. Le nuage de points est plus écrasé sur l'axe horizontal car il était impossible, depuis ma maison, de voir certains satellites (qui étaient bas sur l'horizon) au nord.

Pour l'analyse NMEA et l'élaboration des données, j'ai écrit plusieurs programmes en MATLAB. Pour convertir la latitude et la longitude en coordonnées UTM, la fonction `wgs2utm.m` d'Alexandre Schimel a été utilisée. Pour un premier test cinématique, un rail avec un profil en aluminium a été fabriqué, et l'antenne du rover, fixée à un traîneau en bois, a été amenée à suivre le rail à l'aide de deux patins latéraux. Le traîneau a été déplacé à l'aide d'une corde, en maintenant une vitesse aussi régulière que possible.

La **figure 8** montre la trajectoire rectiligne du sud vers le nord. La ligne a été tracée entre les deux points moyens calculés à partir des mesures du point fixe. Pour des raisons mécaniques, le point le plus au sud n'a pas été atteint pendant le test. Les points ne sont pas équidistants car la corde a été tirée manuellement. Les résultats des tests sont très bons, même si l'on tient compte du fait que le site n'était pas optimal pour la visibilité des satellites.

## Le module Ublox ZED-F9P

Le module ZED-F9P [7] (**figure 9**) peut recevoir et suivre plusieurs constellations GNSS : GPS, GLONASS, Galileo et BeiDou, ainsi que les satellites SBAS et QZSS, comme le montre le **tableau 3**.

Tous les satellites en vue peuvent être traités pour fournir une solution de navigation RTK lorsqu'ils sont utilisés avec des données de correction. En mode RTK, la précision de la position du ZED-F9P est de l'ordre du centimètre, comme le confirment de nombreux tests réalisés dans différentes conditions. Il dispose d'une interface USB, de deux ports UART, d'une interface I<sup>2</sup>C et d'une interface SPI.

## La carte RTK2B-V3

La carte ArduSimple RTK2B [8] est une carte très compacte et polyvalente. En plus du module ZED-F9P, elle dispose d'un connecteur de type XBee, d'un

adaptateur USB/TTL et d'un second port USB pour la programmation.

Le fabricant d'ArduSimple fournit une série de modules à monter sur cette interface pour la communication radio, tels que Bluetooth, G4, Wi-Fi, Lora, etc. La **figure 10** montre la carte, dont les dimensions sont similaires à celles de l'Arduino UNO/Zero, avec lequel elle est parfaitement compatible. Les signaux E/S sont compatibles 1,8 V, 3,3 V et 5 V, adaptés automatiquement par la tension IOREF.

Cette carte peut être alimentée directement par les connecteurs Arduino ou par un connecteur micro USB, et elle est protégée contre les sources d'alimentation simultanées (via les connecteurs et l'USB). La consommation d'énergie, sans les modules XBee, est de 204 mW. La carte est équipée d'un régulateur LDO (low-dropout) de haute puissance et à faible bruit. Avec seulement 390 mV de perte, il est possible d'alimenter la carte avec une seule pile au lithium. De nombreuses LED permettent de vérifier le fonctionnement de la carte, qui dispose de divers connecteurs pour l'interfaçage avec des systèmes de type ArduPilot, pour des applications de contrôle de position de haute précision.

## Tests RTK avec NTRIP

Les premiers tests ont été effectués avec la correction envoyée par une station de référence du réseau régional de Ligurie via NTRIP, en utilisant d'abord le PC avec le logiciel U-Blox U-Center, puis un module G4 (voir ci-dessous) sur le slot ArduSimple XBee. La connexion à l'inter-

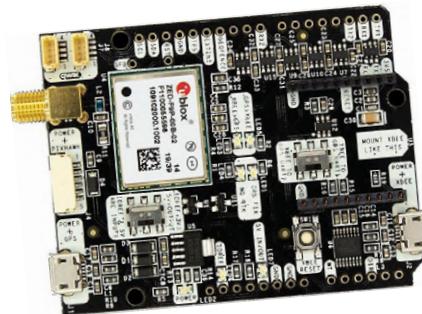


Figure 10.  
La carte ArduSimple simpleRTK2B V3.  
(Source : U-blox)



Figure 11.  
Le module 4G LTE.  
(Source : Telit)

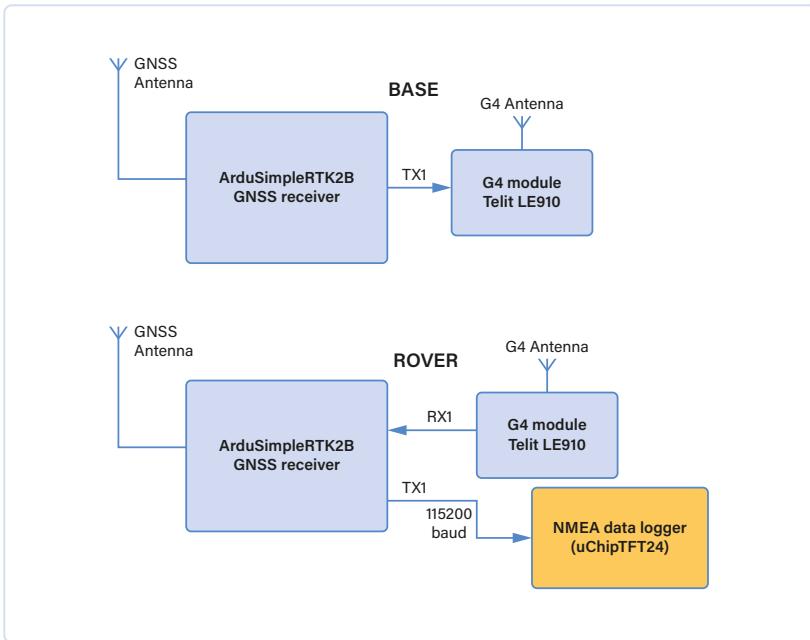


Figure 12.  
Schéma du système.



Figure 13.  
Le microcontrôleur.

Figure 14. Test du point fixe.

net via le PC a permis de mieux choisir la configuration NTRIP. NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) est un protocole développé par l'Agence fédérale allemande pour la cartographie et la géodésie (BKG) à la fin de l'année 2004, qui permet de diffuser des données de correction DGPS ou RTK via Internet. Avec un ordinateur personnel ou un téléphone portable supportant TCP/IP, NTRIP est le meilleur moyen d'envoyer des messages RTCM au récepteur RTK du rover sans avoir à utiliser un système radio local coûteux, qui, pour se conformer aux lois sur les communications radio, doit-être de faible puissance et donc de courte portée.

### Module 4G LTE

Le module 4G utilisé est un Telit modèle LE910 V2. Ses bandes, pour l'Europe, le Moyen-Orient et l'Asie, sont les suivantes :

- Bandes 4G (MHz) : B1 (2 100), B3 (1 800), B7 (2 600), B8 (900), B20 (800)
- Bandes 3G (MHz) : B2 (2 100), B8 (900)
- Bandes 2G (MHz) : B3 (1 800), B8 (900)

Ce module est monté par ArduSimple sur une carte compatible XBee, dont l'aspect est illustré à la **figure 11**. Il nécessite une puissance élevée (HP) et doit être monté sur des cartes de type RTK2-V3.

Pour sa configuration, j'ai suivi les instructions du guide d'installation de la RTK2B-V3, auquel je renvoie le lecteur. Le schéma fonctionnel est illustré à la **figure 12**. Un système basé sur un microcontrôleur 32 bits SAMD21 avec un écran TFT de 2,4 pouces a également été utilisé pour certains tests, sur lequel j'ai développé un logiciel pour calculer les coordonnées cartésiennes en mètres (UTM : *Universal Transverse Mercator*). La **figure 13** montre ce système, qui sert également d'enregistreur. Pour obtenir une résolution élevée, le mode haute précision doit être configuré. Dans cette configuration, la latitude et la longitude ont sept chiffres après la virgule

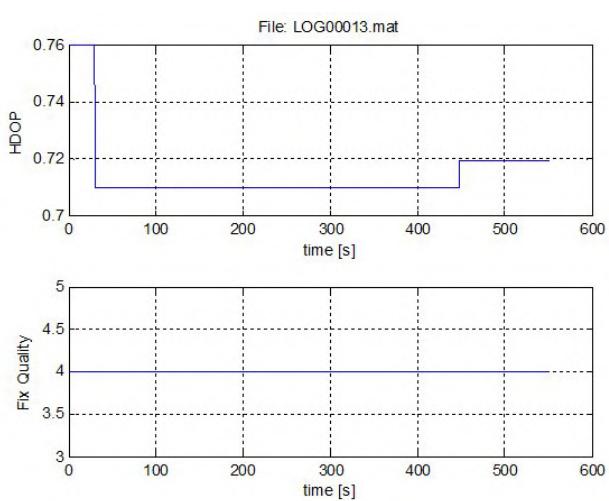
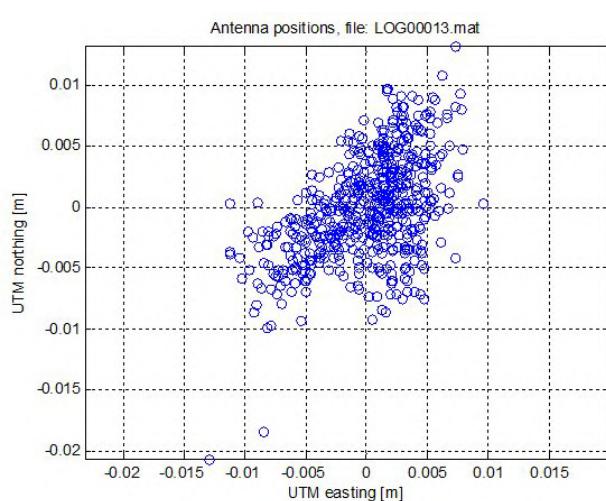




Figure 15. Le banc d'essai à vitesse constante, réalisé par l'auteur.



Figure 16. Gros plan du moteur d'entrainement du chariot.

et l'altitude en a trois. Connectez le Rover au PC et démarrez l'application U-Center, puis dans le menu Configurer, sélectionnez le protocole NMEA et cliquez sur Mode Haute Précision et sauvegardez la configuration.

### Mesure du point fixe (NTRIP)

Voici les résultats de mes programmes Matlab :

```
File name = LOG00013.mat
Values averaged on 551 epochs, from point =
1, to point = 551
Initial GPS time = 32779 and final = 33329
CEP R95 = 0.010 m
```

Bien que la station de référence soit située à 16 km et que la visibilité du ciel ne soit pas totale, les résultats sont excellents (**figure 14**).

### Mouvement rectiligne à vitesse constante

Pour réaliser ce test, un dispositif spécial a été fabriqué. Un rail a été créé à partir d'un profilé d'aluminium, sur lequel un sabot de bois pouvait glisser, tiré par une corde et une poulie actionnée par un motoréducteur électrique. La **figure 15** montre le rail avec l'antenne montée sur le chariot entraîné par le moteur, et le gros plan de la **figure 16** montre le motoréducteur et la poulie. Les photos ne le montrent peut-être pas, mais le rail a été soigneusement mis à niveau et son orientation a été mesurée à l'aide d'une boussole.

**Voici les résultats de mes programmes Matlab :**

```
File name = 30082107.mat
Values averaged on 29 epochs, from point =
309, to point = 337
```

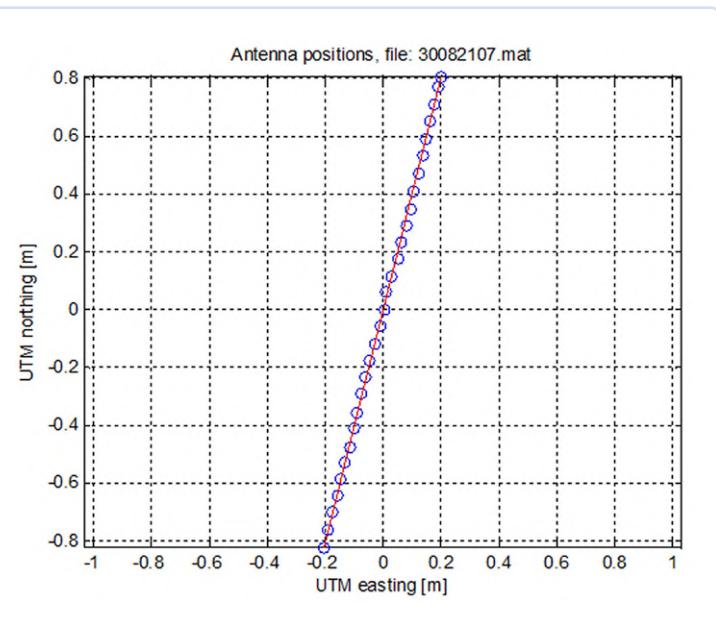


Figure 17 : Test du mouvement rectiligne, avec déplacement du chariot à vitesse constante par un motoréducteur.

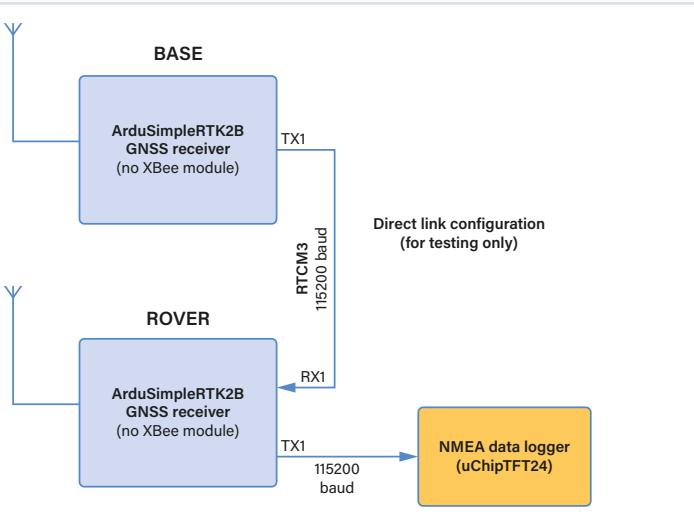


Figure 18. Configuration en liaison filaire directe.

Initial GPS time = 26030 and final = 26058  
 Path traveled = 1.678 m  
 Mean speed = 0.0599 m/s

Comme le montre la **figure 17**, cette mesure a été très bonne, grâce au fait que le site présentait moins d'obstacles, ce qui a même permis de voir les satellites les plus bas au nord. La trajectoire est pratiquement rectiligne. La course a duré 28 secondes avec une vitesse moyenne d'environ 60 mm/s ou 2,16 km/h. Les essais au point fixe, effectués aux extrémités de la course, ont donné des résultats exceptionnels avec un CEP R95 (*Circular Error Probable* Erreur circulaire probable pour 95% des mesures) de seulement 6 mm.

### Mesure du point fixe (Short Base Line et Direct Link)

Ce test de récepteur exclut le système de transmission de la base pour les données de correction et le remplace par un simple fil, comme le montre la **figure 18**.

Bien sûr, c'est le système qui devrait donner la plus grande précision, simplement parce que les deux antennes sont à quelques mètres l'une de l'autre et qu'il n'y a pas de perturbations de la liaison radio.

Le rover doit être configuré pour une sortie des données NMEA à 115 200 bauds. L'enregistreur de données (ArduLog) sauvegarde les phrases NMEA sur une carte SD. La sortie Tx1 du rover doit être configurée pour le protocole NMEA en mode haute précision (coordonnées avec 7 chiffres après la décimale). L'enregistreur de données utilisé pour ce test est un système de type OpenLog.



Des câbles connecteurs pour Arduino sont utilisés pour le câblage, et un port USB est connecté au rover pour l'alimentation et la surveillance du système depuis le PC. Les résultats de cet essai sont présentés ci-dessous :

```
File name = LOG00014.mat
Values averaged on 578 epochs, from point = 1, to point = 578
Initial GPS time = 42023 and final = 42600
Elevation = 685.24 m
CEP R95 = 0.007 m
```

VF : Jean Boyer — 220307-04

### Questions ou commentaires ?

Contactez Elektor (redaction@elektor.fr).



### À propos de l'auteur

Giovanni Carrera est titulaire d'un diplôme en ingénierie électronique. En tant que professeur d'université à la faculté d'ingénierie navale de Gênes, en Italie, il a enseigné de nombreux cours, tels que l'automatisation navale et la simulation des systèmes de propulsion des navires. M. Carrera a commencé à travailler à la fin des années 1970 avec un microprocesseur 6502, avant de passer à d'autres processeurs. Aujourd'hui, il se consacre à la conception et au développement de circuits électroniques analogiques et numériques, dont il a présenté un grand nombre sur ses blogs (ArduPicLab et GnssRtkLab) et dans divers magazines.



### Produits

- **Antenne GNSS multi bande à montage magnétique - 5 m (SMA)**  
<https://elektor.fr/19649>
- **Cartes GPS chez Elektor**  
<https://elektor.fr/catalogsearch/result/?q=gps>

## LIENS

- [1] RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning : <https://rtklib.com>
- [2] Introduction au GNSS : <https://novatel.com/an-introduction-to-gnss>
- [3] Understanding GPS, Principles and Applications, E. D. Kaplan, C. J. Hegarty, Artech House, 2006 : <https://us.artechhouse.com>
- [4] Euref-ip.net GNSS Streaming Server : <https://euref-ip.net/home>
- [5] Getting Started with S2525F8-BD-RTK EVB or S2525F8-GL-RTK EVB, NavSpark : <https://bit.ly/3Wqe1c7>
- [6] GNSS Viewer: [https://navspark.mybigcommerce.com/content/GNSS\\_Viewer-CustomerRelease.zip](https://navspark.mybigcommerce.com/content/GNSS_Viewer-CustomerRelease.zip)
- [7] ZED-F9P Fiche technique du module GNSS de haute précision U-blox F9, UBX-17051259- R08 : <https://bit.ly/3oiKpk>
- [8] SimpleRTK2B V3 Hookup Guide : <https://ardusimple.com/simplertk2b-v3-hookup-guide>

# VOUS AVEZ DE LA CHANCE !



TELECHARGEZ  
GRATUITEMENT

Un abonné à l'e-zine ne manque jamais  
le mensuel «reverse project»

Vous n'êtes pas encore abonné ? Inscrivez-vous à  
notre e-zine gratuit à [elektormagazine.fr/ezine-24](http://elektormagazine.fr/ezine-24)



# routage des circuits imprimés et sécurité

Conseils pour une conception sûre et fiable de vos cartes électroniques



Figure 1. Vue de dessous du câblage volant d'un amplificateur utilisant des tubes KT-88, appartenant à l'auteur. La disposition des composants est claire, et la dissipation thermique correcte. La zone où un isolement électrique renforcé est nécessaire se reconnaît par la présence d'une feuille d'époxy noir. Le montage des composants volumineux, tels que les condensateurs électrolytiques, nécessite des fixations individuelles (supports métalliques). À certains emplacements, les composants sont disposés en couches superposées, ce qui peut compliquer les opérations de maintenance.

Roberto Armani (Elektor) et Marco Castiglioni (Italie)

Comparées au câblage traditionnel, les circuits imprimés (ou PCB de l'anglais Printed Circuit Board) permettent de concevoir ses projets d'une façon professionnelle, rationnelle et compacte. Cependant, pour assurer un fonctionnement fiable, quelques considérations physiques de base sont à prendre en compte lorsque des tensions élevées sont présentes, et/ou certaines pistes du circuit imprimé sont parcourues par des courants élevés. Dans cet article, nous allons passer en revue ce qu'il faut faire, mais plus important, ce qu'il ne faut pas faire !

Les cartes à circuit imprimé (PCB) ont sans nul doute révolutionné la façon dont les circuits sont fabriqués. Les exemples les plus anciens de la mise en œuvre des PCB remonte à 1948, et depuis, la technique de leur réalisation a fait de grands progrès. Si vous êtes particulièrement intéressé par l'évolution de la technologie des circuits imprimés, vous pouvez vous rendre ici [1].

Avant l'avènement des circuits imprimés, le câblage des composants était réalisé par des fils volants reliant directement les composants, en profitant de la longueur de leurs broches ; voir la **figure 1**. L'air, comme on le sait, est un excellent isolant, tandis que la distance importante d'un composant à l'autre, favorisait l'écoulement de l'air assurant la dissipation calorifique. Tout était donc parfait ? Pas vraiment. Les circuits nécessitaient des châssis métalliques galvanisés, les appareils atteignaient

**Table 1: PCB Materials vs. Applications.**

*Dk (ou Er)= Constante Diélectrique Relative, propriété d'un matériau s'opposant à la transmission d'ondes électromagnétiques.*

*Tg = Température de transition du matériau, température à laquelle le matériau passe de l'état rigide à l'état déformable.*

souvent un volume et un poids important, et la technique de construction entièrement manuelle coûtaient une fortune. Mais cette solution demeurait toujours viable car les appareils équipés de tubes électroniques étaient encore très volumineux et le problème de leur encombrement n'aurait pas pu être résolu par un circuit imprimé. Dans l'exemple de la figure 1, qui montre la vue de dessous d'un amplificateur équipé de tubes à vide KT-88, le câblage est assez clair, les composants dissipant de la chaleur étaient bien ventilés, reliés par des fils volants, l'isolation entre eux garantie, en dépit de la présence de haute tension (800 V CC) dans certaines parties du circuit. En plus de l'encombrement élevé, les faiblesses d'un tel procédé de câblage concernent principalement la maintenance, lorsque des composants étaient superposés et devaient parfois être retirés uniquement pour atteindre les composants à remplacer situés en dessous. Avec l'apparition des premiers semi-conducteurs de petites dimensions, les choses ont changé, et les premières cartes à circuit imprimé ont permis la réalisation d'appareils plus compacts et moins coûteux. Cette approche technologique a toutefois introduit quelques problèmes, à la tête desquels l'isolation, la dissipation calorifique, les capacités parasites et la diaphonie entre les pistes, ainsi que les interférences électromagnétiques (EMI). Dans cet article, nous allons nous concentrer principalement sur les aspects de la sécurité, i.e. l'isolation des hautes tensions et la dissipation calorifique en général.

## Matériaux

Le matériau utilisé comme support de circuits imprimés peut être rigide, flexible, ou un mélange des deux. Le choix dépend naturellement du type d'application, et de la température de fonctionnement du circuit. Le plus répandu actuellement est un mélange de fibre de verre et de résine appelé FR4 (Flame Resistant N°4), spécifié dans le standard IPC-4101E [2]. Selon les utilisations, d'autres types de matériau sont également utilisés comme l'indique le **tableau 1**.

## Isolement

Alors que les circuits imprimés ont permis de réduire l'encombrement, la diminution de l'espace entre les conducteurs ont rendu plus critiques les aspects relatifs à l'isolation, nécessitant plus de précautions lors de la conception du tracé d'un circuit. Il y a de nombreux paramètres à considérer lors du calcul de la distance minimum entre deux conducteurs (pistes dans ce cas) du circuit imprimé, pour en citer quelques-uns :

- La tension de fonctionnement
- Le type de matériau diélectrique du PCB
- Le nombre de couches
- La présence de conducteurs dans les couches internes (pour les circuits imprimés ayant 3 couches, ou davantage)
- La présence d'une couche de vernis protecteur

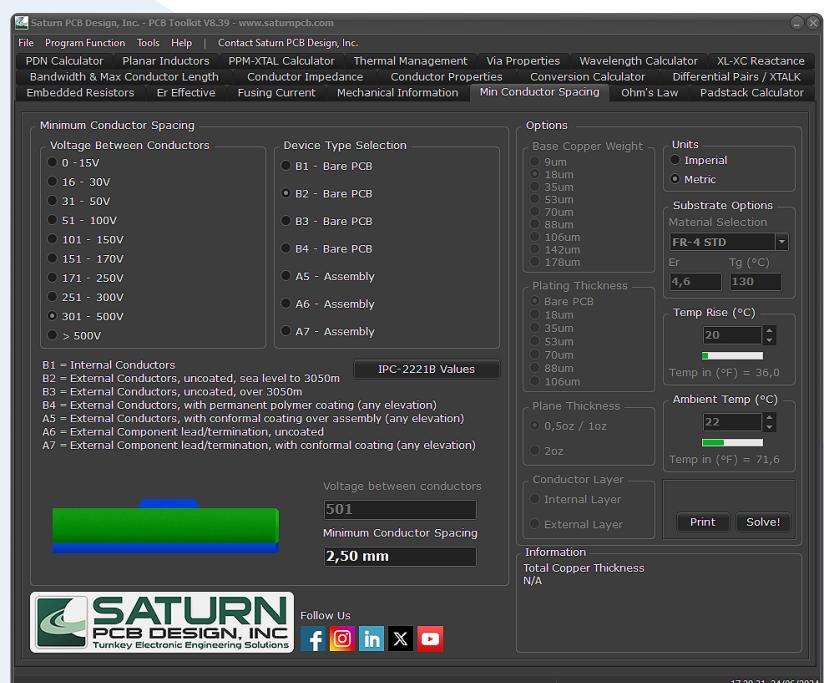
Type de matériau	Dk (ou Er) à 1 MHz	Tg (°C)	Application
FR4	4.2...4.8	135...140	Standard
FR4	4.5...4.8	150...170	Standard/sans plomb
FR4	3.4...3.8 (@ 1 GHz)	180...220	Signaux rapides
PTFE	2.2...2.8	160	Radiofréquences
Polyamide	3.8...4.2	>=250	Hautes températures

## ➤ La pression atmosphérique

Toutefois, à la recherche des économies de temps et afin de consacrer la majeure partie de notre énergie à l'ensemble du procédé de conception, il peut être pratique d'utiliser des outils spécifiques, comme par exemple celui intégré dans le logiciel KiCad, dans d'autres logiciels de conception de PCB, ou pour une approche plus professionnelle, le produit *Saturn PCB Tool Design Kit*, mis à disposition gratuitement par Saturn PCB Design Inc. qui peut être téléchargé en [3].

Sur la **figure 2**, vous pouvez voir une copie d'écran de la fenêtre d'accueil du programme, montrant la multitude d'onglets disponibles. Pour évaluer les contraintes d'isolation, il est possible de se référer à la section *Minimum Conductor Spacing* (Espace minimum entre conducteurs), dans laquelle l'algorithme de calcul est basé sur les spécifications apportées par le Standard IPC-2221B [4]. On peut commencer en choisissant une gamme de tension parmi celles de la table. Les valeurs indiquées

Figure 2. Menu Minimum Conductor Spacing (espace minimum entre conducteurs) du Toolkit Saturn. Selon la norme IPC-2221B Standard, 2,5 mm pour une alimentation de 230 V CA et 1,25 mm pour une tension de 115 V CA.



17:20:31 24/06/2024

Figure 3. L'espacement minimum entre conducteurs est de 2,5 mm pour une tension d'alimentation de 230 V CA. Dans la configuration de cet exemple, il est toujours possible de l'appliquer si la tension d'alimentation est de 100 ou 115 V CA.

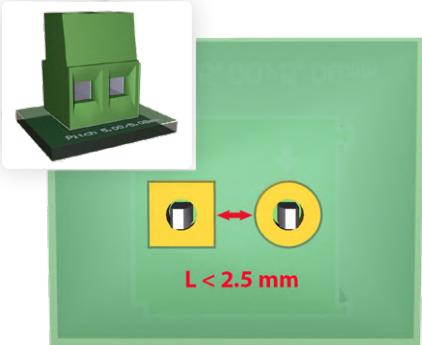


Figure 4. L'alésage entre les plots et les traces augmente fortement l'isolation d'un circuit imprimé, sur lequel ces découpes sont également utilisées pour séparer les zones ayant une différence de potentiels élevée.



Figure 5. En maintenant non connecté (flottant) le contact central, l'espacement d'isolation entre les pistes est doublé, l'utilisation d'une alimentation de 220 V devient une possibilité viable.

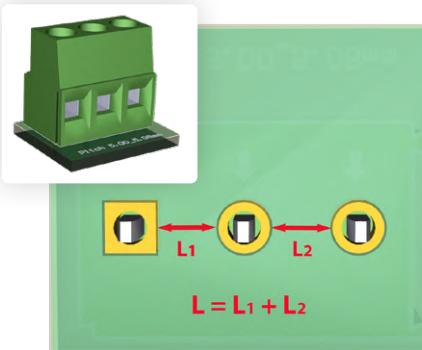
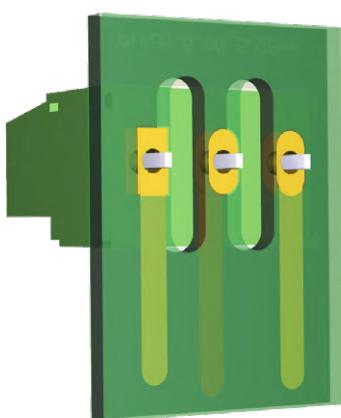


Figure 6. Exemple d'utilisation d'un connecteur à vis à trois plots, avec double découpe. Cette solution permet la connexion d'une alimentation au secteur 230 V CA Phase, Neutre et Terre (L, N et GND).



s'appliqueront directement aux tensions de crête CC et CA ; par exemple pour une tension d'alimentation de 230 V CA, la valeur à considérer sera de 325 V, et la gamme à choisir 301...500 V.

Dans le cas de tensions supérieures à 500 V, il est possible de choisir l'option >500 V et fixer directement *Voltage Between Conductors* (Tension entre les conducteurs) par la valeur préremplie. Après avoir entré la valeur, il faut cliquer sur le bouton *Solve* pour obtenir le résultat. Choisissez ensuite l'option B2, une des sept disponibles dans le menu *Device Type Selection* (choix du type de circuit), qui se réfère à un PCB non vernis, à une altitude standard. Une courte description de chaque choix possible est indiquée juste en dessous.

En choisissant les différentes options (pour une même tension), il est possible de vérifier immédiatement la distance minimum à respecter entre les conducteurs. Pour la tension d'alimentation de l'exemple précédent, le système indique une valeur de 2,5 mm.

**Note** : on peut observer que pour le fonctionnement à une altitude de plus de 3050 m, l'espacement augmente de façon significative, car la pression atmosphérique est de la plus haute importance pour limiter les phénomènes de génération d'arcs électriques. Si le circuit est prévu pour être utilisé en hautes altitudes, il est nécessaire de le protéger par une couche de vernis isolant, plutôt que de compter sur l'espacement entre les pistes.

### Gardons la distance !

Ayant déterminé la valeur de l'espacement minimum dans notre cas, voyons comment mettre cela en pratique sur le circuit imprimé, en utilisant des connecteurs pour déconnecter le câblage si nécessaire, excluant les cas de connexions directes (par soudage) des liaisons sur la carte.

Les **borniers à vis** sont la solution la plus répandue et économique pour cela. Ils existent en différents pas : 2,5/2,54 mm, 3,5/3,81 mm, 5,00/5,08 mm et 7,5/7,62 mm, pour ne citer que les principaux. Afin de maintenir un espacement de 2,5 mm entre les conducteurs, on peut éliminer les deux premiers cités, cependant le connecteur au pas de 5,00/5,08 mm (voir la **figure 3**) nécessite de prendre quelques précautions.

La distance *L* (inscrite en rouge) entre les deux broches inférieures est d'environ 2 mm, ce qui est inférieur à la limite requise. Cette taille de connecteur ne peut donc pas être utilisée pour une tension d'alimentation de 230 V CA, sauf en appliquant des considérations spéciales lors du routage du PCB.

En fait, si l'espace est limité, ce connecteur peut toujours être utilisé, à condition de modifier le diélectrique entre les contacts. Comment ? En le remplaçant par de l'air, comme sur la **figure 4**. En ce cas, la forme des plots a été modifiée, et un interstice de 2 mm a été fraisé entre eux. Cet interstice devra se prolonger jusqu'au point où les

pistes aboutiront — sur le routage du PCB — au moins en respectant le minimum requis.

Il s'agit d'un compromis qui devra être évité si l'espace disponible permet l'utilisation de connecteurs plus importants. Des perçages et découpes sont souvent utilisés pour augmenter l'isolation entre des zones à tensions élevées et celles à basse tension sur une carte PCB, y compris les plans de masse qui sont en général reliés au potentiel de la terre.

Une autre solution pratique (**figure 5**) consiste à utiliser trois plots de contacts sur un connecteur à vis de pas 5,00/5,08 mm, sans relier le connecteur central. Dans ce cas, la distance d'isolation  $L = L_1 + L_2$  autorise la connexion à la tension du secteur électrique, à condition que le plot central ne soit relié à aucune liaison ou piste du circuit imprimé et demeure flottant. À nouveau, cela doit être considéré comme un compromis de conception. La **figure 6** montre une autre configuration utilisant un connecteur à vis à trois bornes, avec deux évidements fraisés entre les plots. Cette configuration permet la connexion de la phase, du neutre et de la terre, (L, N et GND) au secteur électrique standard de 230 V, tout en respectant les considérations établies dans les cas précédents.

Pour terminer, la **figure 7** montre une alternative sans compromis, utilisant un connecteur au pas de 7,00/7,62 mm. Son empreinte est d'environ 16 mm pour une configuration à deux broches, et 23 mm pour un connecteur à 3 broches. Ce n'est évidemment pas un connecteur miniature, mais certainement le plus sécurisé, parmi les plus sûrs en termes d'isolation et de capacité de charge. Son pas important autorise toute forme de routage et permet de relier le circuit à une tension d'alimentation supérieure à celle du secteur électrique.

**Les cosses Faston**, ou les cosses en fourche, sont très répandues. Elles permettent de nombreuses solutions intéressantes, faible coût, contacts fiables et résistance aux vibrations. Par contre, leur utilisation sur une carte circuit imprimé nécessite des pastilles de connexion adéquates et une excellente qualité des soudures. Par ailleurs, la force d'insertion des éléments mâles/femelles de ces connecteurs nécessite d'être compensée par un support mécanique adéquat de la carte afin qu'elle ne se plie pas lors de leur insertion. L'épaisseur recommandée de la carte pour cette mise en œuvre est de 1,6 mm. Les **figures 8a** et **8b** montrent, respectivement, la face composants et la face soudures d'un exemple de PCB conçus au laboratoire de l'auteur.

Sur la partie à gauche de la face composants, on peut remarquer la présence d'une paire de cosses Faston prévues pour les connexions des tensions élevées, la paire située sur la droite étant réservée aux entrées à faible tension. La sérigraphie indique clairement, par une ligne épaisse, la limite entre la zone à tension élevée et celle des signaux à faible tension. La mention "Attention haute-tension" est cependant absente.



Figure 7. Solution sans compromis utilisant un connecteur à vis de pas 7,5/7,62 mm, qui ne nécessite pas de précautions particulières, et permet également une alimentation par une tension plus élevée que celle du secteur électrique standard.

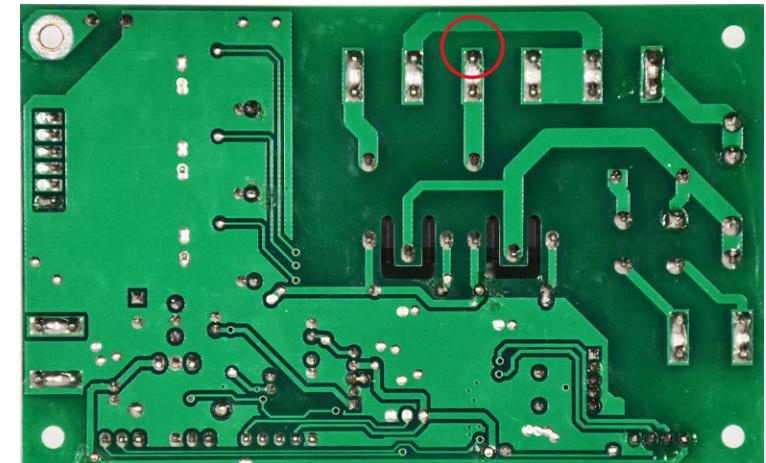
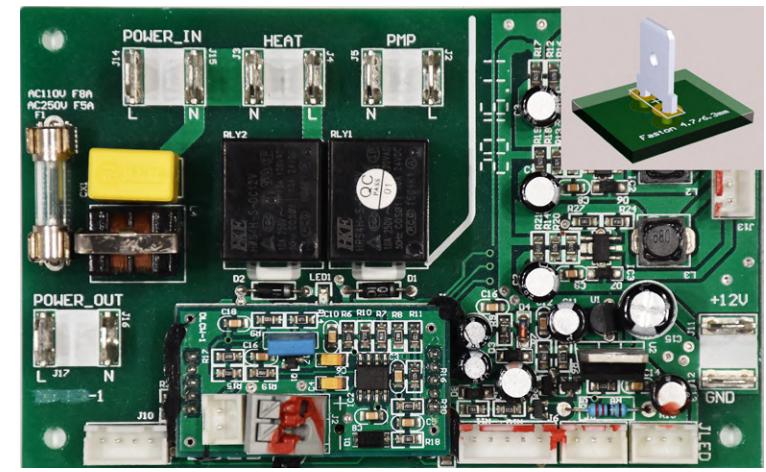


Figure 8. Carte avec contrôle de la dissipation thermique, vues des faces composants et soudure. En haut et à gauche se trouve une représentation 3D de la borne Faston utilisée. Remarquez l'espacement important entre les connecteurs et la ligne blanche délimitant les zones à haute et basse tensions. Sur la face soudure, la zone élargie renforçant la soudure des bornes Faston et indispensable, tout comme les découpes d'isolation en U près des relais. Notez la distance minimum (2,5 mm) entre le Neutre et la Phase repérée par un cercle rouge. (Source : laboratoire de l'auteur).

## L'effet Joule

Dans tout circuit électrique, quand un courant traverse un conducteur, une partie de l'énergie n'est pas transférée, mais dissipée sous d'autres formes d'énergie ; principalement de la chaleur. Ce phénomène qui concerne tout type de courant continu ou alternatif, est appelé l'Effet Joule. Pour comprendre pourquoi cela se produit, il faut considérer le conducteur au niveau microscopique. Un courant électrique est généré par un flux de charges se déplaçant toutes dans la même direction, en raison du champ électrique créé par une source de tension. Les électrons libres mis en mouvement dans le conducteur par le champ électrique ne suivent pas une trajectoire parfaitement linéaire, mais un déplacement sinueux en raison de la présence d'atomes ou molécules dans le réseau cristallin du matériau, changeant leur direction de déplacement, en libérant un peu d'énergie lors de leurs collisions avec les éléments constitutifs. Ces derniers absorbent l'énergie libérée par les électrons et augmentent leur mouvement oscillatoire autour de leurs positions d'équilibre ; Il en résulte une agitation des atomes et molécules correspondant à une élévation de température du matériau conducteur. Dans certaines applications comme les appareils de chauffage à air ou eau, ou dans les lampes à incandescence, ce phénomène est mis à profit intentionnellement, pour convertir un maximum d'énergie électrique en chaleur. Dans les circuits électroniques — il en va différemment — l'effet Joule doit être minimisé afin de permettre un fonctionnement sécurisé et faible des appareils.

Figure 9. Paramètres du menu Conductor Properties (Propriétés des pistes conductrices) du Toolkit PCB Saturn montrant un cas critique : une piste utilisée pour le passage d'un courant de 3 A qui (selon le standard IPC-2152) est prévue pour une intensité maximale de 1,99 A. Un travail de modification de cette conception est ici indispensable !

La face soudure de la carte montre les plots de support des cosses Faston, qui ont été conçus sans masque de soudure. Ce choix augmente la surface soudée et en conséquence la résistance mécanique des liaisons. L'espacement entre les contacts est important avec une exception (entourée en rouge), où la distance entre les pistes est de 2,5 mm, le minimum imposé par le standard IPC-2221B. Une autre bonne solution d'isolation toutefois nécessaire, a été mise en œuvre par les deux fraisages en U aménagés entre les connexions à haute-tension des relais et leurs plots respectifs reliés aux bobines à basse tension.

## Restons froids !

Un autre aspect de la sécurité concerne la dissipation calorifique. Dans un circuit électrique ou électronique, les conducteurs peuvent s'échauffer en raison du courant qui les traverse, selon l'**Effet Joule**, à propos duquel vous pourrez trouver plus d'informations dans l'encadré de cet article.

Pour permettre un contrôle correct de l'échauffement dans une carte à circuit imprimé, la chaleur produite doit être évacuée, afin de maintenir le circuit à une température acceptable durant son fonctionnement. La température ambiante et la ventilation sont des facteurs clés à la base de toute évaluation thermique durant la phase de conception.

Observons l'onglet *Conductor Properties* du Toolkit PCB Saturn (figure 9), dans lequel les paramètres les plus importants doivent être informés et les options correspondantes à notre conception choisies. En ce qui concerne le type de PCB :

- Material Selection (sélection du matériau)
- PCB Thickness (épaisseur du support)
- Base Copper Weight (épaisseur du cuivre)
- Plating Thickness (épaisseur du plaquage métallique)
- Bottom Copper Layer (yes/no) (face inférieure cuivrée oui/non)

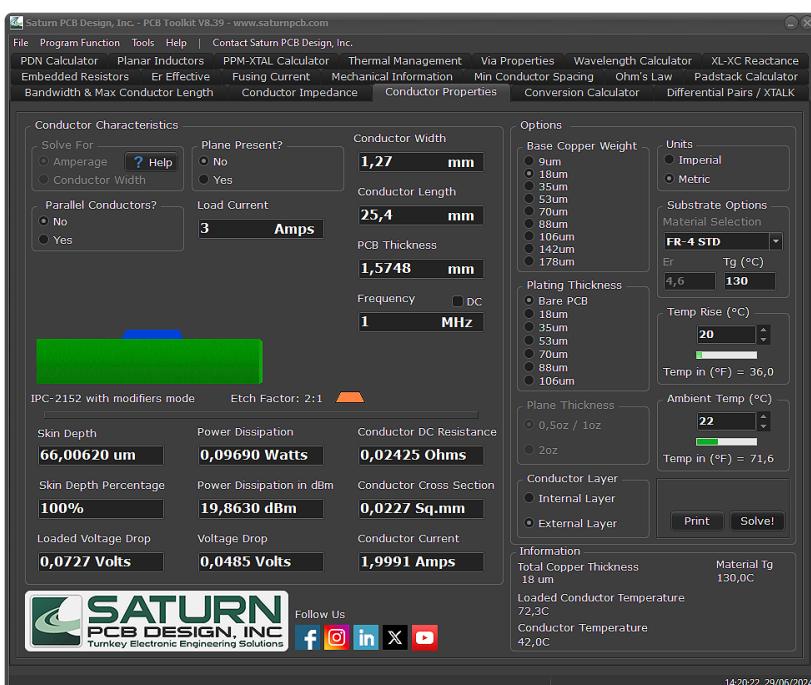
En ce qui concerne les dimensions des pistes :

- Conductor Width (largeur des pistes)
- Conductor Length (longueur des conducteurs)
- Parallel-Connected Conductors (conducteurs reliés en parallèle)

En ce qui concerne les paramètres d'environnement :

- Ambient Temperature (°C) (température ambiante en °C)
- Temperature Rise (°C) (élévation de température en °C)

Supposons que nous ayons un circuit imprimé de 1,6 mm d'épaisseur de type FR4-STD, avec une seule couche cuivrée, nue, de 18  $\mu$ , et que nous souhaitons évaluer les performances thermiques d'une piste de largeur 1,5 mm, de longueur 25,4 mm, parcourue par un courant de 3 A. À la lecture des résultats obtenus en cliquant sur le bouton *Solve* (calcul) après avoir entré les paramètres nécessaires, on constate que selon le standard IPC-2152 [5], notre piste autorise un courant de 1,991 A (*Conductor current* dans le menu), alors que nos contraintes sont de 3 A. Le courant indiqué est déterminé pour une élévation de température de 20°C à une température ambiante initiale de 22°C ce qui porte la piste à la température de  $22 + 20 = 42^\circ\text{C}$ .



Par un mécanisme de rétro-ingénierie, le programme nous permet de simuler une situation existante. En supposant que l'on ait besoin de maintenir un courant de 3 A dans notre piste — sans modifier ses propriétés électriques (résistance) — en cliquant sur le paramètre *Temp Rise* (augmentation de la température) jusqu'à obtention d'une valeur indiquée proche de 3 A, on constaterait que l'élévation de température atteindrait 49°C, qui ajoutée à la température ambiante, de 22°C, porterait la température de fonctionnement à 71°C, trop élevée pour un fonctionnement continu.

Ceci, même avant d'avoir considéré la dissipation thermique de tous les composants de puissance installés sur la carte — résistances, diodes, semi-conducteurs de puissance, circuits intégrés, régulateurs de tensions etc. — dont les apports calorifiques doivent être ajoutés à notre cas. L'évaluation thermique globale d'un circuit imprimé nécessite une modélisation complexe qui est en dehors de l'objectif de cet article, mais qui pourrait être l'objet d'un prochain article.

Il y a plusieurs solutions pour cet exemple, examinons quelques-unes d'entre elles :

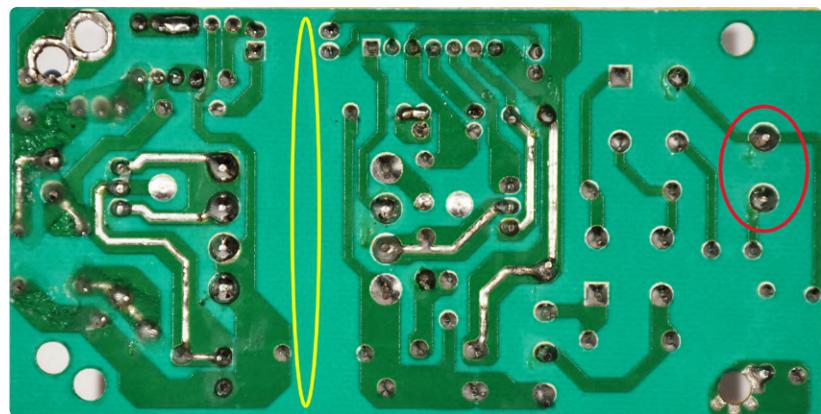
**Augmentation de la taille de la piste** : en augmentant la largeur et/ou l'épaisseur de la piste (en choisissant un circuit imprimé dont la couche cuivrée est plus épaisse, ou plaquée, ou les deux), l'intensité admissible augmente considérablement. Toutefois, dans le cas ou des contraintes d'encombrement existent, l'augmentation de la largeur des pistes doit s'accompagner du respect des conditions d'isolement entre-elles (distance minimum, comme décrit précédemment), et cette approche n'est pas toujours possible.

**Augmentation de l'épaisseur de la piste par dépôt de soudure** : c'est certainement la plus pratique et la plus économique des solutions. Elle permet d'accroître la capacité d'une piste à véhiculer le courant, sans augmenter sa largeur. Un bon exemple est illustré sur la **figure 10**, concernant une alimentation à découpage, où les pistes parcourues par un courant important dans la section à tension élevée et dans celle à basse tension, ont été renforcées par de la soudure à l'étain.

**Couche de cuivre externe** : sur les circuits imprimés comportant deux couches ou davantage, la couche de cuivre inférieure se comporte comme un dissipateur de chaleur. Sa présence, en addition d'être un blindage efficace du circuit, aide à évacuer la chaleur et augmente la performance thermique du circuit.

**Pistes multiples** : la circulation du courant peut être répartie entre deux pistes, ou davantage, reliées en parallèle ce qui accroît la dissipation thermique et le courant pouvant circuler. Le logiciel de conception de PCB Saturn vous permet de définir le nombre de telles pistes et effectue les calculs en conséquence.

S'il y a suffisamment de place sur le plan du circuit imprimé, la largeur de piste peut être augmentée dans le paramètre *Conductor Width* (*largeur des pistes*)



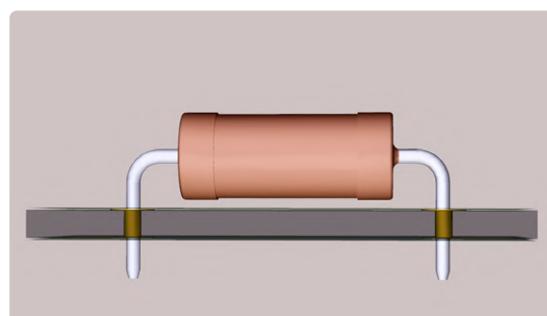
jusqu'à obtenir un résultat de 3 A dans la valeur *Conductor Current* (*Intensité dans les pistes*) ; dans ce cas il s'agirait de 2,6 mm, qui permet, selon les spécifications, une intensité de 3,03 A.

Toutefois, dans le cas d'un espace restreint, la solution simple décrite précédemment n'est pas possible, l'intensité de 3 A dans la piste pourrait être obtenue en choisissant un PCB 18 $\mu$  plaqué (cuivre d'épaisseur 18 $\mu$  comportant un plaquage), ou de préférence, une couche de cuivre 35 $\mu$  au lieu de celle de 18 $\mu$ . Ces choix pourront toutefois avoir un impact sur le coût du circuit.

Par ailleurs, si l'option choisie est l'augmentation d'épaisseur de la piste avec de la soudure à l'étain, il faut se rappeler qu'après soudage, il ne sera plus possible de connaître la résistivité de la piste de façon théorique, mais uniquement en la mesurant avec un milliohmètre avant de placer les composants sur la carte. Cette solution peut être viable si le nombre de pistes véhiculant des courants élevés est faible, mais pas dans les autres situations où l'accroissement de l'épaisseur du cuivre et le plaquage métallique est certainement l'approche la plus professionnelle.

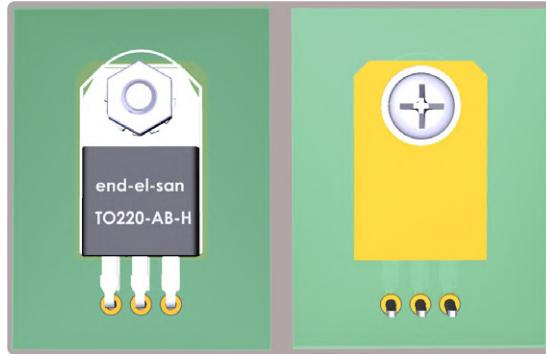
En plus de la chaleur générée par le courant circulant dans les pistes, il faut évidemment considérer attentivement les composants qui dissipent une quantité non négligeable de chaleur, comme par exemple les résistances et les diodes de puissance. Il n'est jamais recommandé de se fier au circuit imprimé pour dissiper (partiellement) par contact, la chaleur générée par un composant, sauf si la conception de son boîtier a été spécialement conçue pour cela. Par exemple, sur la **figure 11**, le composant est soudé dans une position éloignée de la surface du PCB. Cela facilite le refroidissement par convection (air) et évite un stress thermique du matériau support du PCB, par contacts sur de petites surfaces.

▲  
**Figure 10.** Face soudure d'un circuit imprimé d'une alimentation à découpage de 12 V. Les pistes renforcées par de la soudure sont clairement visibles. Remarquez l'alimentation par le secteur électrique de 230 V sur un connecteur de pas 7,62 mm à droite (en rouge) et la grande zone d'isolation (>7 mm en jaune) entre les zones à haute et basse tensions du circuit. (Source : laboratoire de l'auteur).



◀  
**Figure 11.** Résistance de puissance placée légèrement en hauteur par rapport à la surface de la carte. Cela améliore la ventilation du composant et réduit le stress thermique du PCB.

Figure 12. Un circuit intégré en boîtier TO-220 placé sur un circuit imprimé avec une petite zone sur la face opposée afin de faciliter la dissipation de la chaleur générée.



À l'opposé, dans l'exemple de la **figure 12**, le composant en boîtier TO-220 (à gauche) est inséré sur le PCB à un emplacement où une petite surface de dissipation de chaleur a été créée sur la face opposée aux composants (à droite). Cette solution est assez pratique dans les situations où la chaleur dissipée par le composant est trop importante pour envisager un montage vertical sans radiateur, mais trop faible pour justifier l'utilisation d'un radiateur métallique qui augmenterait l'encombrement.

### Avant de conclure

Avant de terminer notre tour d'horizon, je crois utile de mentionner que la norme IPC-2221B, à laquelle quelques exemples de cet article se sont référés, est la moins restrictive au niveau industriel en ce qui concerne l'isolation, et les espacements prescrits ne peuvent pas être réduits. Pour des applications critiques, comme certains types d'appareils domestiques, ou pour des équipements médicaux, il existe des standards plus exigeants comme, par exemple, IEC 60335, que nous vous conseillons de consulter selon les besoins de vos projets.

Je voudrais remercier Marco Castiglioni, professionnel talentueux dans le routage des cartes à circuits imprimés pour l'industrie, pour la préparation de tous les documents 3D, et spécialement pour son travail sans relâche de consultant, lors de l'écriture de cet article. 

VF : Jean Boyer — 230570-04

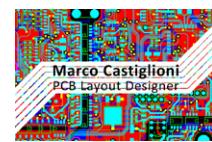
### Questions ou commentaires ?

Avez-vous des questions ou commentaires relatifs à cet article ? Contactez Roberto Armani (roberto.armani@elektor.com) ou Marco Castiglioni (info@msterista.it).



### À propos de Roberto Armani

Roberto Armani est ingénieur en électronique. Après ses études à Politecnico de Milan, il a acquis une expérience de 35 ans dans divers secteurs. Avant de rejoindre l'équipe Elektor, en tant qu'Éditeur Sénior, il a travaillé dans l'industrie informatique, l'imagerie électronique, les télécommunications, les équipements de test des matériaux et les publication Web. En dehors de l'électronique, il aime écouter (et chanter) la musique classique, et randonner en haute montagne.



### À propos de Marco Castiglioni

Marco Castiglioni est ingénieur spécialisé en électronique. Après ses études, il a d'abord travaillé comme concepteur de circuits imprimés dans une compagnie Italienne d'équipement audio professionnels, dans laquelle il a utilisé des outils de conception tels que Cadstar, Orcad, Protel, Pcad et Veribest. En 1985, il crée sa société, spécialisée dans le routage de circuits imprimés pour des sociétés de tous secteurs d'activités (Audio, Medical, Industriel, éclairages à LED, Domotique etc.). Après 30 ans, il est toujours actif dans la profession, continuant à apprendre, et se maintenir à jour, sur les règles en vigueur et les nouvelles technologies relatives à la fabrication des cartes à circuit imprimé. Vous pourrez le rencontrer lors de plusieurs conventions cinématographiques ou humoristiques, déguisé en humanoïde au stand Star Trek. Il peut être contacté à info@msterista.it – [www.msterista.it](http://www.msterista.it)



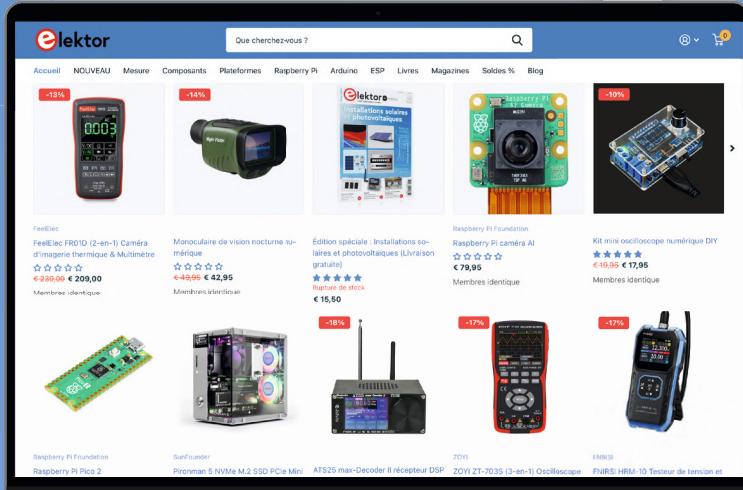
### Produits

- Whadda WTS100 Kit de démarrage de soudure  
[www.elektor.fr/20426](http://www.elektor.fr/20426)
- Weller ESF 120ESD Support pour circuit imprimé  
[www.elektor.fr/17481](http://www.elektor.fr/17481)

### LIENS

- [1] Chronologie de l'histoire des Circuits imprimés : <https://www.printedcircuits.com/blog/history-of-pcb/>
- [2] Contenu du document des standards IPC-4101E concernant les matériaux de base des circuits imprimés : <https://www.ipc.org/TOC/TOC-IPC-4101E.pdf>
- [3] Page de téléchargement des outils de conception des PCB Saturn : <https://saturnpcb.com/saturn-pcb-toolkit/>
- [4] Contenu du document des standards IPC-2221B concernant les circuits imprimés rigides et multicouches : <https://www.ipc.org/TOC/IPC-2221B.pdf>
- [5] Contenu du document des standards IPC-2152 permettant de déterminer les capacités de passage du courant dans une carte à circuit imprimé : <https://www.ipc.org/TOC/IPC-2152.pdf>

# Quel est votre avis ?



Chez Elektor, nous offrons bien plus que de simples produits électroniques – nous créons une expérience avec des produits de qualité et un service client exceptionnel, soutenus par la passion de notre communauté.

Partagez votre avis sur  
[www.elektor.fr/pages/customer-reviews](http://www.elektor.fr/pages/customer-reviews)



**Très bonne présentation**  
Malgré mon anglais technique poussif, la présentation et le développement du sujet aident vraiment le novice que je suis. Les programmes, sur fond bleu, se détachent parfaitement du reste du texte.



**Un utilisateur satisfait de son achat**  
Excellent rapport qualité/prix, régulation en température précise, n'a rien à envier à une marque commençant par un "W", dont les produits équivalents sont beaucoup plus chers. Je conseille cette station de soudage.



**Très bon service client Elektor**  
Malgré un problème de composants oubliés, j'ai reçu un autre exemplaire du kit dans un délai très rapide.

Bravo pour cette efficacité devenue trop rare.

# testeur d'ampli-op

Pour les applications audio et autres

Alfred Rosenkränzer (Allemagne)

La gamme d'amplificateurs opérationnels disponibles sur le marché est extrêmement diversifiée. En général, la sélection initiale pour une application spécifique est basée sur les caractéristiques techniques - souvent consultables sur les sites web des distributeurs de semi-conducteurs. Si plusieurs options demeurent envisageables, des mesures supplémentaires pourraient s'avérer nécessaires. En effet il n'est pas toujours possible de déterminer tous les paramètres critiques directement des fiches techniques, en fonction des conditions d'utilisation prévues. C'est précisément à cela que sert le testeur présenté ici.

Une fois que vous avez présélectionné des options possibles, il est souvent inévitable de commander des échantillons et de tester ces ampli-op. La distorsion harmonique, en particulier, dépend du niveau d'entrée, du gain, du niveau de sortie, de la charge et de la fréquence. Les fiches techniques fournissent généralement ces valeurs pour des paramètres spécifiques qui ne couvrent pas toutes les utilisations possibles et ne permettent pas toujours une comparaison entre les modèles de différents fabricants. Nous avons donc développé cette petite

carte de test afin de pouvoir effectuer les tests nécessaires sur différents ampli-op dans des conditions limites identiques. Ce testeur s'avère également très utile pour sélectionner facilement des circuits intégrés similaires ou pour trouver les modèles les plus performants.

## Principe de fonctionnement

La simplicité du montage élimine le besoin d'un schéma fonctionnel. Comme le montre la **figure 1**, le circuit comprend deux ampli-op doubles en boîtier DIL. IC1 est utilisé en montage non-inverseur, tandis que IC2 est

en montage inverseur. Les entrées de IC1A et IC1B sont connectées à une impédance d'entrée fixée d'environ  $50\text{ k}\Omega$  via R1 et R6 respectivement, puisque les entrées non inverseuses des deux ampli-op ont une impédance élevée. R3 n'est pas utilisé pour IC1A. Le gain est donc de +1. Par contre pour IC1B, le gain a une valeur de +10 calculé selon le rapport  $(R8 + R9) / R8$ . Cependant, les gains respectifs peuvent facilement être ajustés selon vos besoins en modifiant les valeurs ou en ajoutant R3.

Pour IC2A, le gain est exactement de -1 en raison du rapport  $R12 / R13$ . Les valeurs de R16 et R17 donnent un gain de -10 pour IC2B. Par conséquent, dans ce circuit de test avec deux ampli-op doubles, vous obtenez quatre circuits de test avec inverseur et non-inverseur et gain simple et décuple. Les valeurs indiquées dans le circuit de la figure 1 conviennent aux applications audio typiques. Il faut noter que les entrées des circuits inverseurs ont une impédance nettement plus faible d'environ  $3\text{ k}\Omega$  pour IC2A et d'environ  $1\text{ k}\Omega$  pour IC2B que pour IC1A et IC1B.

Chaque sortie d'amplificateur est reliée à deux connecteurs. L'appareil de mesure est branché aux connecteurs bipolaires via une résistance de  $220\ \Omega$ . Ces résistances en série sont destinées à empêcher le dépassement en présence des charges capacitatives (par exemple, en raison de la capacité typique de  $\geq 30\text{ pF}$  à l'entrée d'un oscillo). La valeur exacte n'est pas critique et doit être comprise entre

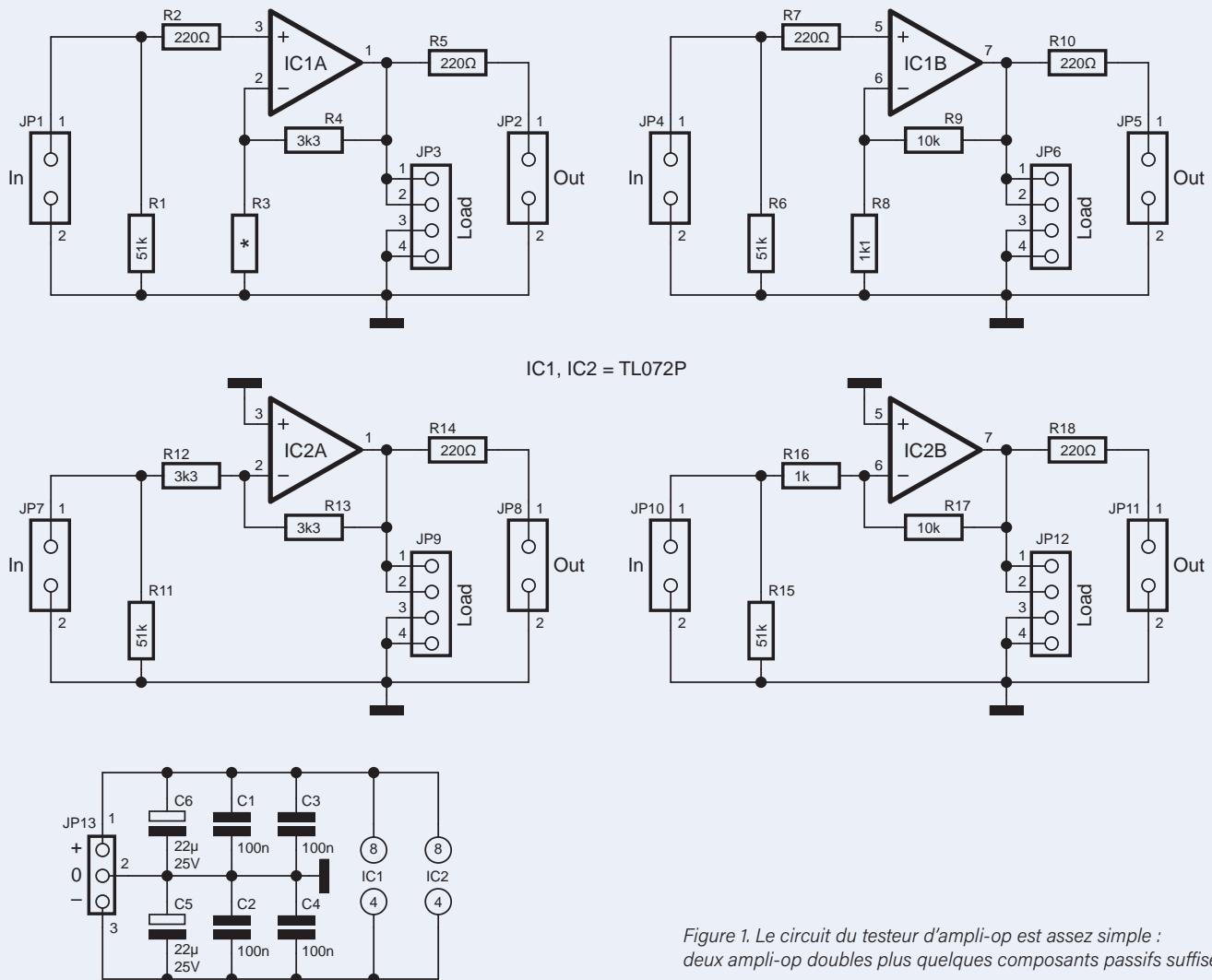


Figure 1. Le circuit du testeur d'ampli-op est assez simple : deux ampli-op doubles plus quelques composants passifs suffisent.

50 et 1,000  $\Omega$  - son but principal est d'empêcher l'ampli-op d'osciller sous des charges capacitatives. Les charges peuvent être connectées via les connecteurs à 4 broches, permettant ainsi de tester l'amplificateur dans diverses conditions de fonctionnement. Ceci décrit suffisamment le circuit.

### Quelques remarques

L'alimentation est symétrique via le connecteur JP13. Deux condensateurs électrolytiques et deux condensateurs de 100 nF par circuit intégré sont utilisés pour le découplage. Nous avons volontairement omis les régulateurs pour pouvoir tester le comportement des ampli-op avec différentes tensions d'alimentation.

Les fichiers du circuit imprimé sont disponibles au téléchargement sur la page web d'Elektor consacrée à cet article [4] (figure 2). Des sockets DIL usinés de haute qualité sont prévus pour les ampli-op, ce qui permet de changer facilement et sans soudure les différents circuits intégrés. Les circuits intégrés

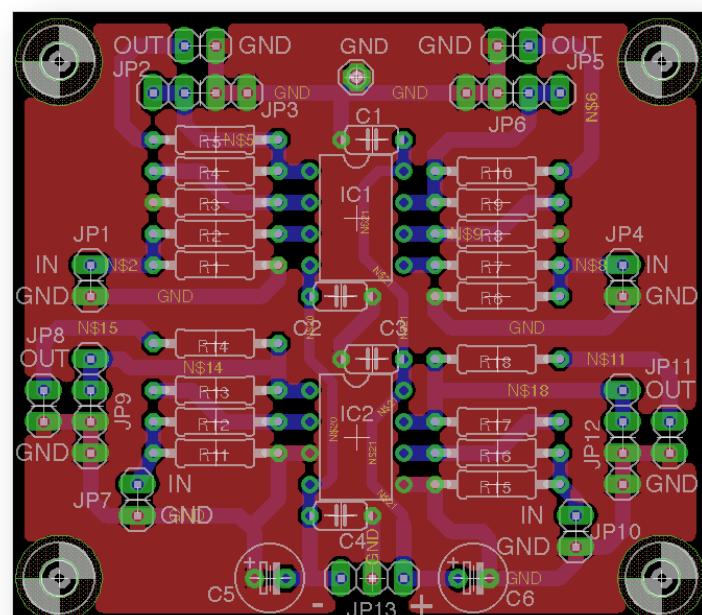


Figure 2. Les fichiers du circuit imprimé sont téléchargeables sur la page web d'Elektor consacrée à cet article [4].

CMS nécessitent ce que l'on appelle des BoB (breakout boards), que vous pouvez fabriquer vous-même ou acheter. La **figure 3** montre une carte assemblée avec de telles cartes CMS. Durant mes tests, je n'ai observé aucune influence mesurable de ces cartes d'extension sur les performances.

Si votre objectif est de tester des ampli-op pour des applications audio, il est recommandé de choisir un circuit à faible bruit. Toutes les résistances doivent donc être à film métallique. En bas à droite de la figure 3, vous pouvez voir une charge enfichable sous la forme d'une résistance soudée à un connecteur femelle SIL à 4 broches. Il est ainsi facile de créer différentes charges enfichables équipées de différentes résistances et/ou capacités.

Pour mesurer de faibles distorsions, vous avez besoin d'appareils de mesure appropriés. Au fil des ans, j'ai publié de nombreux articles sur le sujet des techniques de mesure dans la revue Elektor [1]. Mon article sur le QA403 de QuantAsylum décrit un analyseur audio intéressant [2]. De plus, l'utilisation de certains filtres peut permettre d'élargir la plage

de mesure vers les plus faibles distorsions. Vous trouverez un exemple ici [3].

230210-04

### Questions ou commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur (alfred\_rosenkraenzer@gmx.de), ou contactez Elektor (redaction@elektor.fr).



### À propos de l'auteur

Alfred Rosenkraenzer a consacré de nombreuses années à sa carrière d'ingénieur en développement, initialement dans le secteur de la technologie de la télévision professionnelle. Depuis la fin des années 1990, il se spécialise dans le développement de circuits numériques à haute vitesse et de circuits analogiques destinés aux testeurs de circuits intégrés. Par ailleurs, l'audio représente sa passion et son domaine de prédilection.

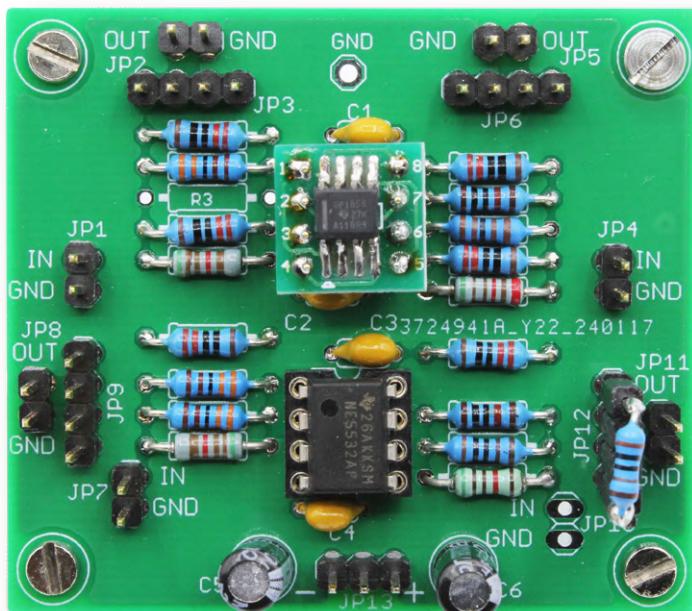


Figure 3. La carte assemblée avec IC1 dans le boîtier SOIC8 sur une carte d'adaptation. IC2 est conçu comme une version DIL « large ». Une charge est connectée à la sortie JP12.

## Liste des composants

### Résistances

1% film métallique, wired  
R1, R6, R11, R15 = 10 kΩ  
R2, R5, R7, R10, R14, R18 = 4,7 k  
R3 = omis\*  
R4, R12, R13 = 3,3 k  
R8 = 1,1 k  
R9, R17 = 10 kΩ  
R16 = 1 kΩ

### Condensateurs

C1...C4 = 100 nF, film, pas 2/10 pouces.  
C5, C6 = 22 µF /25 V, électrolytique, pas 1/10 pouces.

### Semi-conducteurs

IC1, IC2 = TL072, ampli-op double\*

### Divers

4x Socket de CI, 8 broches, machined  
JP1, JP2, JP4, JP5, JP7, JP8, JP10, JP11 = connecteurs à 2 broches, au pas de 1/10 pouce.  
JP3, JP6, JP9, JP12 = connecteurs à 4 broches, au pas de 1/10 pouce.  
JP13 = connecteur à 3 broches, au pas de 1/10 pouce.  
Connecteurs femelles à 4 broches adaptés aux charges\*  
Circuit imprimé 230210-01\*

\* Voir le texte

## Produits

➤ **QuantAsylum QA403 Analyseur audio 24 bits**  
[www.elektor.fr/20530](http://www.elektor.fr/20530)

➤ **Siglent SDG1032X Générateur de signaux à 2 voies (30 MHz)**  
[www.elektor.fr/20276](http://www.elektor.fr/20276)

➤ **PeakTech 1404 Oscilloscope à 2 voies (100 MHz)**  
[www.elektor.fr/20229](http://www.elektor.fr/20229)

## LIENS

[1] Measurement technology articles by Alfred Rosenkraenzer: <https://tinyurl.com/bdckkr4a>

[2] A. Rosenkraenzer, "Comparing the QuantAsylum QA403 to the Gold Standard," 2023: <https://tinyurl.com/yudmy5sk>

[3] A. Rosenkraenzer, "Active 1-kHz Filter for Distortion Measurement," Elektor 5-6/2023 : <https://tinyurl.com/4vhzhn9z>

[4] Page web de cet article : <https://elektormagazine.fr/230210-04>

# Rejoignez notre communauté



[www.elektormagazine.fr/community](http://www.elektormagazine.fr/community)

# mise à jour du projet #4 : compteur d'énergie ESP32

Surveiller l'énergie avec MQTT

Saad Imtiaz (Elektor)

Précédemment, nous nous sommes concentrés sur la configuration du compteur d'énergie basé sur ESP32 et sur son intégration dans Home Assistant. Nous avons aussi évoqué les possibilités offertes par la puce ESP32-S3 pour des fonctionnalités d'IA et de ML qui permettraient de prédire les modèles de consommation d'énergie et d'identifier les appareils. Dans cette mise à jour, nous franchissons une nouvelle étape en déployant un micrologiciel qui permet la surveillance de l'énergie en temps réel via MQTT, jetant les bases pour des fonctionnalités plus avancées.

Nous avons déjà discuté en détail du parcours complet du compteur d'énergie ESP32, depuis l'assemblage initial jusqu'à son installation finale dans le boîtier de disjoncteurs. Ce processus a inclus la configuration du compteur d'énergie avec ESPHome et Home Assistant, sa calibration et les tests, et enfin l'installation dans le boîtier de disjoncteurs. Dans la dernière mise à jour [1], nous avons entrepris d'intégrer pleinement ce système dans Home



Assistant. Notre objectif ambitieux est désormais de développer des fonctionnalités avancées d'intelligence artificielle (IA) et d'apprentissage automatique (ML) afin de prévoir les tendances de consommation énergétique et d'identifier les appareils électriques à partir de leur signature énergétique

Bien que l'intégration AI/ML soit toujours en phase de développement, en raison de la préparation approfondie des données requises, cette mise à jour intermédiaire met en lumière une avancée significative : la mise en place de la surveillance énergétique en temps réel via MQTT. MQTT est un protocole de messagerie léger qui est spécialement conçu pour faciliter une communication rapide et efficace. Pour plus de détails sur MQTT, nous vous invitons à consulter l'encadré « **Qu'est-ce que MQTT ?** ».

## Micrologiciel personnalisé et MQTT

Dans cet article, nous aborderons l'étape suivante de notre projet - exploiter MQTT et l'EDI Arduino pour permettre la gestion de l'énergie en temps réel. Nous détaillerons le développement du micrologiciel qui permet à l'ESP32 de communiquer avec un courtier MQTT, envoyant des données énergétiques à un serveur Home Assistant ou à toute autre plateforme compatible MQTT. L'utilisation de MQTT avec un micrologiciel individuel

### Qu'est-ce que MQTT ?

MQTT est un protocole de messagerie léger conçu pour une communication efficace entre les appareils, en particulier dans les environnements IoT. Ce système repose essentiellement sur un courtier MQTT, un serveur qui agit comme un hub pour l'échange de messages. Le courtier reçoit les messages des appareils, appelés éditeurs, et les achemine vers les destinataires appropriés, appelés abonnés, sur la base d'un système de sujets. Dans MQTT, un sujet (topic) est une chaîne de caractères qui catégorise les messages, servant de canal pour la publication d'informations, tandis qu'un abonné est un appareil ou une application qui suit des sujets spécifiques pour recevoir ces messages. Par exemple, dans une maison intelligente, un sujet tel que `home/energy/voltage` pourrait être utilisé pour diffuser des relevés de tension que recevrait et afficherait un tableau de bord, permettant une surveillance en temps réel.

Le rôle du courtier est de s'assurer que les messages sont transmis de manière efficace et sécurisée, même sur des réseaux peu fiables. Dans les applications IoT, le courtier MQTT est essentiel pour gérer l'échange de données entre les capteurs, les appareils et les systèmes (qui sont les clients MQTT), permettant ainsi la surveillance, le contrôle et l'automatisation en temps réel.



## Listage 1. Micrologiciel (extrait).

```
#include <WiFi.h>
#include <SPI.h>
#include <ATM90E32.h>
#include <MQTTPubSubClient.h>
#include <config.ino> // Include configuration file for WiFi and MQTT details

// WiFi Credentials
const char* ssid = WIFISSID;      // Your WiFi SSID
const char* pass = WIFIPASSWORD;   // Your WiFi Password

WiFiClient client;
MQTTPubSubClient mqtt;

ATM90E32 energymeter{};

void setup() {
    ...
    /* Initialize the ATM90E32 energy meter with the specified parameters */
    energymeter.begin(CS_PIN, LINEFREQ, PGA_GAIN, VOLTAGE_GAIN, GAIN_CT_A, GAIN_CT_B, GAIN_CT_C);
    ...
    /* Begin the WiFi connection using the provided SSID and password */
    WiFi.begin(ssid, pass);

    /* Initialize the MQTT client */
    mqtt.begin(client);

    /* Connect to WiFi, MQTT broker, and Home Assistant */
    connect();
    ...
}

void loop() {
    /* Keep the MQTT client updated */
    mqtt.update();

    /* Reconnect to the MQTT broker if the connection is lost */
    if (!mqtt.isConnected()) {
        connect();
    }

    /* Check and send energy data to Home Assistant every 3 seconds */
    static uint32_t prev_ms = millis();
    if (millis() > prev_ms + 3000) {
        prev_ms = millis();
        getEnergyData(); // Retrieve energy data and send via MQTT
    }
}

void getEnergyData() {
    // Retrieve system status from the ATM90E32
    unsigned short sys0 = energymeter.GetSysStatus0(); //EMMState0
    unsigned short sys1 = energymeter.GetSysStatus1(); //EMMState1
    unsigned short en0 = energymeter.GetMeterStatus0(); //EMMIntState0
    unsigned short en1 = energymeter.GetMeterStatus1(); //EMMIntState1

    // Print system and meter status for debugging
    Serial.println("Sys Status: S0:0x" + String(sys0, HEX) + " S1:0x" + String(sys1, HEX));
    Serial.println("Meter Status: E0:0x" + String(en0, HEX) + " E1:0x" + String(en1, HEX));
    delay(10);

    // Check if the MCU is not receiving data from the energy meter
    if (sys0 == 65535 || sys0 == 0) Serial.println("Error: Not receiving data from energy meter - check your connections");

    // Retrieve all parameters from the ATM90E32
    float lineVoltageA = energymeter.GetLineVoltageA();
    float lineVoltageB = energymeter.GetLineVoltageB();
    float lineVoltageC = energymeter.GetLineVoltageC();
    ...

    // Send all the collected energy data via MQTT to Home Assistant
    mqtt.publish("esp32energymeter/lineCurrentA", String(lineCurrentA).c_str());
    mqtt.publish("esp32energymeter/lineCurrentB", String(lineCurrentB).c_str());
    mqtt.publish("esp32energymeter/lineCurrentC", String(lineCurrentC).c_str());
    mqtt.publish("esp32energymeter/totalCurrent", String(totalCurrent).c_str());
    ...
}
```

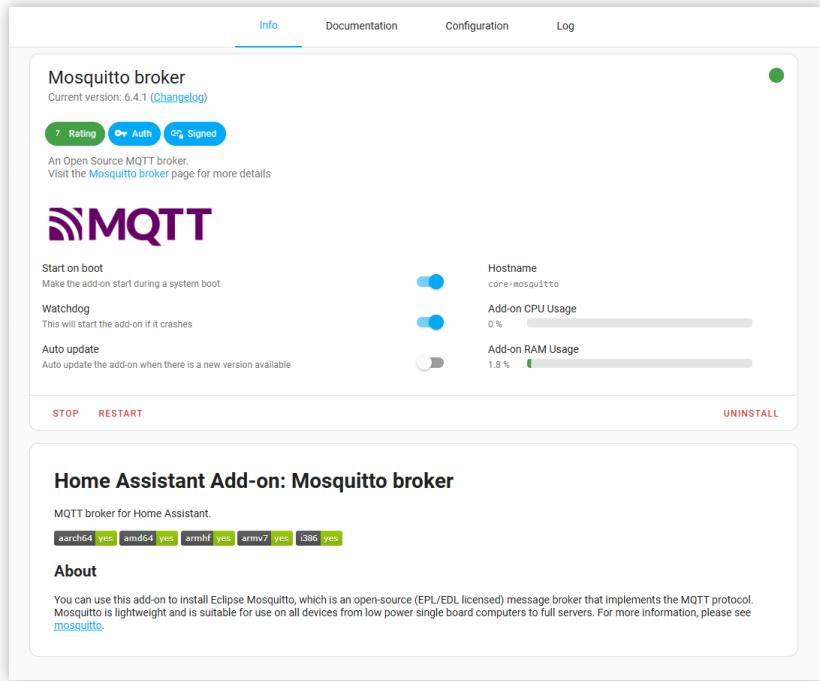


Figure 1. Options de configuration du courtier MQTT dans Home Assistant, y compris l'option Start on boot pour assurer un démarrage automatique.

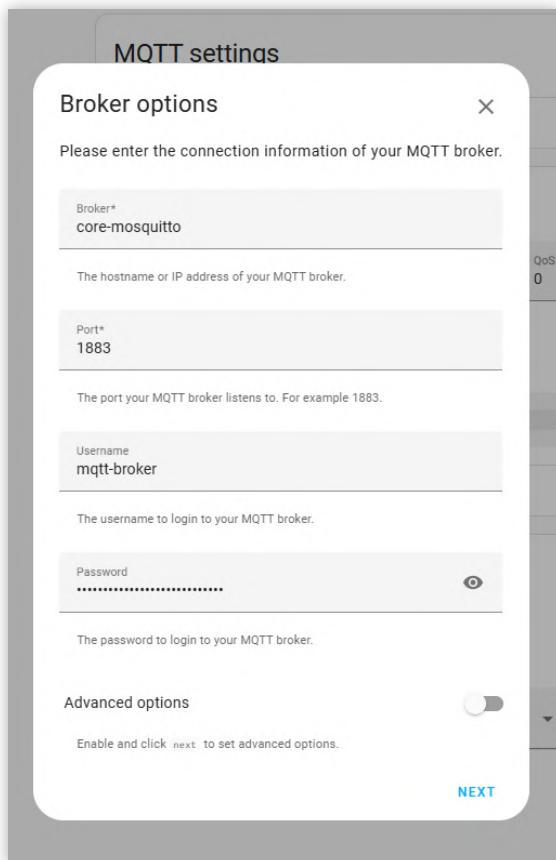


Figure 2. Configuration de l'intégration MQTT dans Home Assistant avec l'adresse IP, le port et les informations d'identification de l'utilisateur.

plutôt qu'avec ESPHome offre beaucoup plus de flexibilité en termes d'intégration et de personnalisation. Avec un micrologiciel personnalisé, vous avez un contrôle complet sur la collecte, le traitement et la transmission des données, ce qui vous permet d'adapter le système aux besoins spécifiques du projet. Ce niveau de personnalisation est particulièrement bénéfique pour les applications complexes nécessitant une optimisation des performances, l'intégration de matériel non standard, ou l'implémentation de fonctionnalités avancées telles que l'IA et les algorithmes d'apprentissage automatique. De plus, les micrologiciels personnalisés facilitent l'intégration avec diverses plateformes au-delà de Home Assistant, telles que les services basés sur le cloud, les tableaux de bord personnalisés et d'autres systèmes IoT. Vous pouvez également mettre en œuvre des mesures de sécurité plus renforcées, telles que des protocoles de cryptage spécifiques ou des mécanismes d'authentification avancés, assurant ainsi une protection accrue des données à travers le réseau. En outre, il est possible d'optimiser ces micrologiciels pour des cas d'utilisation spécifiques, réduisant les frais généraux et améliorant l'efficacité du système, un atout majeur dans les environnements aux ressources limitées.

## Logiciel

Le micrologiciel est conçu pour permettre de connecter l'ESP32 à un réseau WiFi et d'utiliser MQTT pour la communication, facilitant l'envoi des données énergétiques à un serveur Home Assistant à des fins de surveillance et d'automatisation. Le **listage 1**, présente un extrait du code. Pour accéder au code complet et aux fichiers associés, consultez le dépôt GitHub du projet [2]. Le projet repose sur deux bibliothèques fondamentales : la bibliothèque *ATM90E32*, développée par CircuitSetup [3], qui gère la communication avec le circuit intégré de mesure de l'énergie, et la bibliothèque *MQTTPubSubClient* [4], qui gère la communication en tant que client MQTT. La bibliothèque *ATM90E32* est essentielle pour la collecte des données provenant de la puce du compteur d'énergie, incluant des paramètres tels que la tension, le courant et la puissance. Lors du développement, l'intégration de MQTT avec une authentification par nom d'utilisateur et mot de passe a représenté un défi majeur. Bien que de nombreuses bibliothèques MQTT assurent les fonctions de base, *MQTTPubSubClient* s'est révélée être l'une des rares à offrir une compatibilité avec l'ESP32 tout en supportant les fonctions d'authentification nécessaires. Le logiciel commence en incluant les bibliothèques essentielles pour la connectivité réseau, la communication SPI, l'interface avec le circuit intégré du compteur d'énergie et à la gestion de la communication MQTT. Les configurations du WiFi et de MQTT sont sauvegardées dans un fichier séparé. La fonction `setup()` initialise le port série pour le débogage, configure le compteur d'énergie ATM90E32 avec les paramètres spécifiés, et

## Définir les données MQTT comme des capteurs dans Home Assistant

Pour contrôler les données envoyées par votre compteur d'énergie ESP32 via MQTT, vous devez définir ces points de données comme des capteurs dans Home Assistant. Suivez les étapes suivantes :

### Accédez au fichier de configuration :

Ouvrez votre fichier de configuration de Home Assistant (configuration.yaml) avec l'éditeur de fichiers ou tout autre éditeur de texte.

### Définissez les capteurs MQTT :

Dans le fichier configuration.yaml, ajoutez la configuration suivante pour définir vos capteurs MQTT :

```
mqtt:
  sensor:
    - name: Line Voltage A
      unique_id: esp32_voltage_a
      state_topic: "esp32energymeter/lineVoltageA"
      unit_of_measurement: "V"

    - name: Line Current A
      unique_id: esp32_current_a
      state_topic: "esp32energymeter/lineCurrentA"
      unit_of_measurement: "A"
```

### Personnalisez vos capteurs :

Remplacez `Line Voltage A`, `Line Current A`, etc., par des noms qui répondent à vos besoins.

Assurez-vous que le `state_topic` correspond au topic utilisé dans votre firmware ESP32 pour publier les données. L'identifiant unique `unique_id` doit être un identifiant unique pour chaque capteur, permettant à Home Assistant de les suivre et de les gérer correctement.

### Sauvegardez et redémarrez Home Assistant :

Après avoir ajouté les définitions des capteurs, sauvegardez le fichier configuration.yaml et redémarrez Home Assistant pour appliquer les changements.

### Visualisez vos capteurs :

Une fois Home Assistant redémarré, vos capteurs MQTT devraient apparaître dans le tableau de bord, vous permettant de suivre les données énergétiques en temps réel.

établit les connexions au réseau Wifi et au courtier MQTT. Cette configuration initiale assure que l'ESP32 est prêt à communiquer avec Home Assistant et d'autres plate-formes compatibles MQTT.

Dans la boucle `main()`, le client MQTT est mis à jour en continu pour maintenir la connexion avec le courtier. Si la connexion est interrompue, le micrologiciel tente automatiquement de se reconnecter. Par ailleurs, le logiciel est conçu pour récupérer les données énergétiques de la puce ATM90E32 et les transmettre au courtier MQTT. Cette configuration permet à Home Assistant de suivre la consommation d'énergie en temps quasi réel, fournissant ainsi des données essentielles pour la domotique. La fonction `getEnergyData()` joue un rôle crucial dans le logiciel en collectant diverses mesures énergétiques depuis la puce ATM90E32. Ces mesures incluent la tension de ligne, le courant, la puissance (active, réactive et apparente), le facteur de puissance, l'angle de phase, la fréquence et la température. Les données collectées sont ensuite publiées sur des sujets MQTT spécifiques, les rendant disponibles pour la surveillance et l'analyse dans Home Assistant. Pour les développeurs et les utilisateurs qui utilisent le mode débogage, les données énergétiques sont également affichées sur le moniteur série, ce

qui facilite le dépannage et la validation des données. Pour garantir que l'ESP32 maintient une connexion stable au réseau et au courtier MQTT, nous avons implémenté la fonction `connect()`. Cette fonction gère le processus de reconnexion en cas de perte de connexion Wifi ou MQTT. Des messages de débogage fournissent un retour en temps réel sur l'état de la connexion, et une LED s'illuminne pour indiquer visuellement quand les connexions sont établies avec succès.

## Configuration d'un courtier MQTT dans Home Assistant

Pour permettre au compteur d'énergie ESP32 d'utiliser le protocole MQTT pour envoyer le relevé du compteur, vous devez d'abord configurer un courtier MQTT. Un broker MQTT peut être installé sur presque n'importe quel ordinateur connecté à votre réseau domestique. Il peut être configuré sur votre PC à l'aide d'un conteneur Docker, installé directement sur un Raspberry Pi, ou même hébergé sur un serveur cloud pour un accès à distance. Cependant, pour que les choses restent simples et s'intègrent parfaitement à votre installation domestique intelligente, nous allons le configurer avec Home Assistant. Pour installer le module complémentaire MQTT dans

Figure 3. Test de la connexion MQTT en s'abonnant à tous les sujets pour s'assurer que les messages sont bien reçus par Home Assistant.

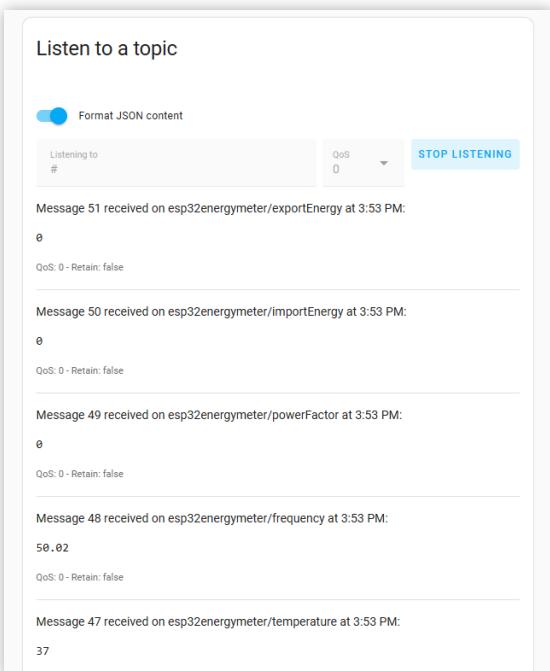


Figure 4. Tableau de bord personnalisé dans Home Assistant, montrant les données énergétiques en temps réel du compteur d'énergie ESP32.

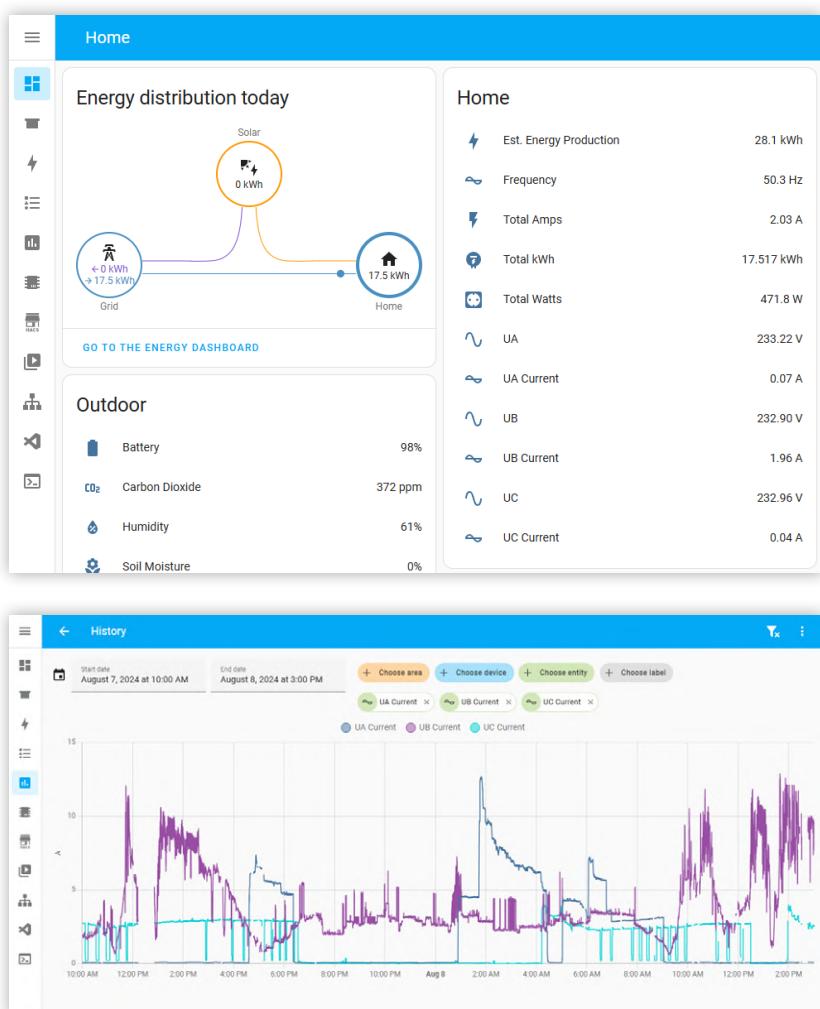


Figure 5. Exemple de graphiques créés dans Home Assistant pour surveiller la consommation énergétique dans le tableau de bord de l'historique.

Home Assistant, accédez d'abord à votre tableau de bord Home Assistant en vous rendant sur l'URL où est exécutée votre instance. Dans la barre latérale, sélectionnez *Settings*, puis *Add-ons*, et ouvrez le *Add-on Store*. Cherchez *MQTT*, et vous devriez trouver le courtier officiel *Mosquitto* parmi les résultats. Cliquez dessus, puis sélectionnez *Install* ; l'installation peut prendre un peu de temps. Une fois installé, vous pouvez configurer le courtier MQTT en modifiant les options de configuration – les paramètres par défaut conviennent généralement, mais il est recommandé de définir un nom d'utilisateur et un mot de passe. Après configuration, cliquez sur le bouton *Start* pour activer le courtier MQTT, et activez l'*option Start on boot* pour assurer son démarrage automatique à chaque redémarrage de Home Assistant (voir **figure 1**).

Ensuite, configurez l'intégration MQTT dans Home Assistant. Rendez-vous dans *Settings*, puis dans *Devices & Services*, et sélectionnez *Integrations*. Cliquez sur *Add Integration*, recherchez *MQTT* et sélectionnez-le. Home Assistant détectera automatiquement le courtier MQTT en cours d'exécution. Si nécessaire, configurez les paramètres MQTT, tels que l'adresse IP du courtier – utilisez *localhost* si celui-ci est installé sur le même appareil que Home Assistant (ou bien *core-mosquitto* pour le même résultat). Laissez le port par défaut à *1833*. Assurez-vous que les informations d'identification de l'utilisateur sont celles d'un utilisateur actuel dans Home Assistant comme le montre la **figure 2**. Vous pouvez également créer un utilisateur spécifique pour MQTT dans Home Assistant.

Il est essentiel de configurer Home Assistant pour qu'il reçoive correctement les messages de votre compteur d'énergie ESP32. Pour tester la connexion, abonnez-vous à un sujet « # » afin de recevoir tous les messages envoyés à votre courtier MQTT (voir **figure 3**). Cette page est accessible en cliquant sur *Configure* dans *Integration entities* sous l'élément *MQTT integration*.

Avec le courtier MQTT activé sur Home Assistant, vous pouvez connecter votre compteur d'énergie ESP32. Dans le fichier *config.ino* de votre micrologiciel ESP32, définissez *HOMEASSISTANT\_IP* à l'adresse IP de votre instance de Home Assistant. Configurez ensuite *DEVICE\_NAME*, *USER\_ID*, et *PASSWORD* si l'authentification est activée sur le courtier MQTT. Après avoir configuré ces paramètres, flashez l'ESP32 avec le micrologiciel et assurez-vous qu'il se connecte au courtier MQTT avec succès. Une fois connecté, le compteur d'énergie ESP32 commencera à envoyer des données énergétiques au courtier MQTT, que vous pouvez surveiller dans Home Assistant en vous abonnant aux sujets MQTT appropriés.

Enfin, pour visualiser les données énergétiques dans Home Assistant, des entités MQTT seront automatiquement créées pour chaque sujet publié par votre compteur d'énergie ESP32. Si ce n'est pas le cas, ce qui peut arriver parfois, vous devrez définir les entités MQTT dans le fichier *configurations.yaml* de Home Assistant.

Vous trouverez les instructions nécessaires dans l'enca- dré « **Définir les données MQTT comme capteurs dans Home Assistant** ».

Vous pouvez accéder aux entités des capteurs sous *Settings* dans Home Assistant, puis *Devices & Services*, et *Entities*. Utilisez ces entités pour créer des tableaux de bord personnalisés dans Home Assistant, ce qui vous permettra de visualiser les données énergétiques en temps réel, de créer des graphiques et de configurer des alertes basées sur des seuils de consommation, comme illustré dans les **figures 4 et 5**. Avec MQTT et Home Assistant, vous pouvez également automatiser des actions basées sur les données énergétiques comme le montre la **figure 6**, intégrer d'autres appareils intelligents et obtenir des informations précieuses sur l'utilisation de l'énergie dans votre maison.

Pour les débutants, je recommande le document *Getting Started Guide by Home Assistant* [5], qui offre une introduction complète à la configuration et à l'utilisation de Home Assistant. Consultez également la documentation sur l'intégration MQTT de Home Assistant [6][7] pour des détails sur la configuration de MQTT et l'intégration efficace de vos appareils. Ces ressources vous aideront à démarrer avec Home Assistant et MQTT, facilitant ainsi l'installation de votre maison intelligente de manière efficace et conviviale. 

240349-04

## À propos de l'auteur

Saad Imtiaz, ingénieur senior chez Elektor, est spécialisé en mécatronique. Il dispose d'une solide expertise dans les systèmes embarqués et le développement de produits. Au cours de sa carrière, il a collaboré avec une diversité d'entreprises, allant des start-up novatrices aux grandes corporations internationales, et a dirigé des projets de prototypage et de développement à la pointe de la technologie. Fort de son expérience approfondie dans l'industrie aéronautique et en tant que leader d'une start-up technologique, Saad apporte à Elektor un mélange précieux de compétences techniques et de vision entrepreneuriale. Il contribue au développement de projets logiciels et matériels.

Automations			
Filters	Search 4 automations	Group by Category	Sort by Name
Last triggered			?
Ungrouped			⋮
Low Grid Voltage Shutdown	Aug 10, 10:04 P...	<input checked="" type="checkbox"/>	⋮
Phase A, over 12 Amps	Never	<input checked="" type="checkbox"/>	⋮
Printer Completed Notification	Jun 6, 11:30 AM	<input type="checkbox"/>	⋮
Turn off Printer after Printing	Jun 8, 2:50 PM	<input type="checkbox"/>	⋮

## Questions ou commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur (saad.imtiaz@elektor.com), ou contactez Elektor (redaction@elektor.fr).

Figure 6. Actions automatisées dans Home Assistant basées sur les données énergétiques reçues du compteur d'énergie ESP32 via MQTT.



### FEATURED TOPIC

Visit our **Power Electronics & Energy page** for articles, projects, news, and videos.

[www.elektormagazine.com/power-energy](http://www.elektormagazine.com/power-energy)





Home Assistant Green  
The first ready-to-go smart energy solution for everyone.









### Produits

- **Home Assistant Green** [www.elektor.fr/20725](http://www.elektor.fr/20725)
- **Raspberry Pi 5 (2 GB RAM)** [www.elektor.fr/20951](http://www.elektor.fr/20951)

## LIENS

- [1] Saad Imtiaz, «mise à jour du projet #3 : compteur d'énergie basé sur ESP32» Elektor 7-8/2024 : <https://elektormagazine.fr/240244-04>
- [2] Dépôt Github du compteur d'énergie ESP32 : <https://github.com/ElektorLabs/esp32-energymeter>
- [3] Bibliothèque ATM90E32 pour Arduino par CircuitSetup : <https://github.com/CircuitSetup/ATM90E32>
- [4] Bibliothèque MQTTPubSubClient de hideakitai : <https://github.com/hideakitai/MQTTPubSubClient>
- [5] Getting started, Home Assistant : <https://www.home-assistant.io/getting-started/>
- [6] MQTT Integration, Home Assistant : <https://www.home-assistant.io/integrations/mqtt/>
- [7] MQTT Sensor, Home Assistant : <https://www.home-assistant.io/integrations/sensor.mqtt/>



# analyseur de spectre

Figure 1.  
Le SPECTRAN® V6  
PLUS XPR 250XB-WR12  
offre un facteur de bruit  
de 10 dB à 77 GHz.  
Cela en fait un choix  
idéal pour les mesures  
radar dans le secteur  
automobile (76 GHz à  
81 GHz).

## temps-réel à technologie guide d'onde et PC à interfaces multiples

Aaronia introduit une nouvelle ligne de produit et présente ses premiers prototypes au salon Electronica de Munich

contribué par Aaronia AG

L'heure est venue, pour le monde de l'électronique, de se rendre au salon Electronica à Munich. Du 12 au 15 novembre, plus de 2 500 exposants vont animer cette foire commerciale mondiale, la plus importante source de nouveautés pour l'industrie électronique. Cette année, Aaronia AG de Strickscheid ne se limitera pas à la présentation des derniers développements de sa série d'analyseurs temps-réel SPECTRAN® et de Aartos, système de détection de drones. En fait, ce leader mondial Allemand va surprendre les visiteurs par son entrée dans le marché PC et présenter les prototypes des futures cartes PC Aaronia. Les analyseurs de spectre en temps-réel (RTSA) sont des outils indispensables pour les technologies radio modernes. La complexité toujours croissante des signaux RF, imposée par les avancées technologiques telles que la 5G, l'IoT (Internet des objets) et les communications satellites, nécessite des méthodes de mesure précises

et performantes. La 5G, le Wi-Fi 6 et les systèmes de communication à largeur de bande élevée (UWB Ultra Wideband), utilisent des techniques de modulation complexes et des bandes passantes élevées.

### Prêt pour IEEE 802.11ax

Les analyseurs de spectre en temps-réel offrent des avantages décisifs dans ces domaines, car ils peuvent simultanément enregistrer et analyser les signaux RF. Les analyseurs de spectre en temps-réel de la série Aaronia SPECTRAN® V6 permettent, en particulier, de façon continue, mais simple, l'acquisition de données, sans perte d'information, des signaux courts ou intermittents. Cela rend possible la détection, la caractérisation et, si nécessaire, le décodage des évènements sporadiques ou transitoires, qui jouent un rôle essentiel dans les technologies modernes de communication. Après avoir été enregistrées, les données sont totalement disponibles sur le PC



*L'augmentation du nombre d'interfaces USB disponibles est une des raisons qui nous ont conduit à développer nos cartes PC. C'est en ce domaine, que les appareils conventionnels atteignent rapidement leurs limites.*

utilisé, par exemple, pour l'optimisation de l'affectation des canaux, la localisation d'appareils individuels, ou pour déterminer les emplacements de répéteurs.

### **Mesures dans la bande EHF (fréquences extrêmement hautes)**

La 5G utilise une grande étendue de gammes de fréquences, plus élevées que pour les standards radio mobile précédents, telle que la bande EHF qui s'étend de 30 à 300 GHz. L'analyse des signaux de ces fréquences élevées nécessite des analyseurs de spectre qui permettent une résolution élevée en fréquence, et une bande passante suffisante pour représenter les structures complexes de ces signaux. En plus, les systèmes 5G utilisent des techniques de formation de faisceaux (*beamforming*) et MIMO (*Multiple input multiple output* ou entrées multiples, sorties multiples) de façon massive, ce qui complique encore davantage les analyses. Aaronia fournit le SPECTRAN® V6 5G pour cela, et pour les mesures dans les environnements radio mobile. Le dispositif supporte également les profils WiGig 45 GHz (802.11aj) et 60 GHz (802.11ad/aj/ay), qui sont maintenant inclus dans la dernière version de la suite RTSA PRO pour l'enregistrement des signaux et l'analyse des données.z (802.11a) et 60 GHz (802.11ad/aj/a) qui sont maintenant inclus dans la dernière version de la suite RTSA PRO, pour l'enregistrement et l'analyse des signaux et l'analyse des données.

### **Solution abordable pour les applications automobiles**

Avec une largeur de bande en temps-réel pouvant atteindre 490 MHz, et une vitesse de balayage de 3 THz/s, et une vitesse de balayage de 3 THz/s, SPECTRAN® V6 Xplorer est la nouvelle référence en termes de vitesse. Muni de connexions pour guides d'ondes, l'analyseur permet des mesures dans la gamme des ondes millimétriques, qui seraient impossibles avec des moyens conventionnels. Les guides d'ondes transmettent le signal sans distorsion ni pertes. Ils sont moins sensibles aux perturbations externes telles que les interférences électromagnétiques, ce qui est important dans un environnement comportant de nombreux appareils et signaux radio. Il en résulte un signal demeurant propre et les mesures effectuées par l'analyseur de spectre ne sont pas faussées.

Le nouveau SPECTRAN® V6 Xplorer est une solution abordable pour la maintenance et la vérification des

capteurs de sécurité modernes qui déterminent la distance entre les véhicules, les assistants d'angle mort et, dans certains cas, pour le réglage des dispositifs d'assistance au stationnement. Ces capteurs déterminent la distance entre des objets en émettant des ondes électromagnétiques et en mesurant le temps mis pour être réfléchies. Ces ondes se déplacent très rapidement, pratiquement à la vitesse de la lumière. Les ateliers de réparation automobiles rencontrent en général des difficultés lors de la maintenance de ces capteurs. Ils peuvent difficilement envisager l'achat des équipements coutant plusieurs centaines de milliers d'Euros. Cependant, des associations de contrôle technique, par exemple, pourraient acquérir un système basé sur SPECTRAN® V6 et vérifier ces capteurs durant les contrôles techniques.

Avec les analyseurs de spectre SPECTRAN® V6 munis de la technologie à guides d'ondes, les signaux à hautes fréquences évoluant rapidement peuvent être analysés et évalués de façon fiable. Grâce aux connexions de guides d'ondes, les analyseurs de spectre temps réel d'Aaronia AG peuvent y relier leurs propres systèmes amplificateurs et séparateurs, en respectant leurs contraintes, ainsi que les guides d'ondes qui seront disponibles dans le futur. Aaronia apporte ainsi des solutions abordables à ces applications.

### **Arrivée dans le marché des PC**

L'analyse des données est un aspect, la puissance de calcul disponible en est une autre. Bien que le traitement très efficace des données IQ soit déjà possible avec des ordinateurs standards, l'utilisation de l'analyseur de spectre temps réel Aaronia, avec la suite RTSA PRO, nécessite dans de nombreuses situations, une augmentation des contraintes de bande passante et de vitesse de traitement.



Figure 2:  
Thorsten Chmielus,  
CEO d'Aaronia AG

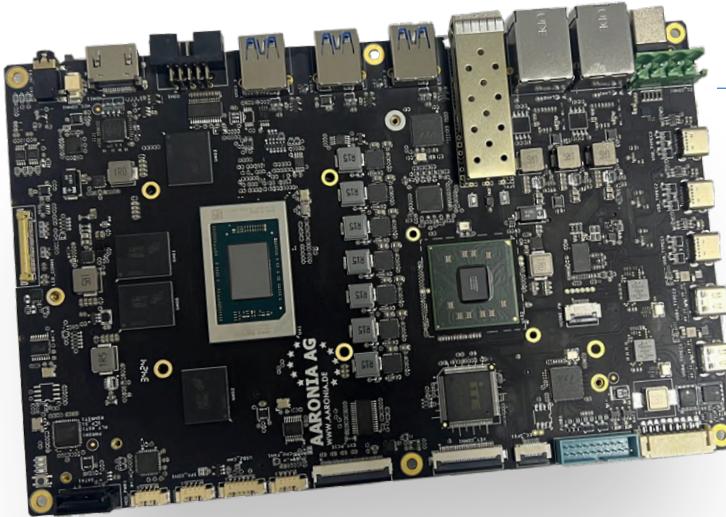


Figure 2. Les cartes PC équipées des derniers processeurs Intel® ou AMD® offrent de nombreuses entrées sorties de toutes sortes et permettent, par exemple, l'utilisation simultanée des 4 analyseurs SPECTRAN® V6 ECO (4x USB PD).

«Nous sommes constamment à la recherche de moyens de calcul satisfaisant nos besoins en termes de vitesse, capacité de stockage et interfaçage» explique Thorsten Chimielus, CEO d'Aronia AG. «Ainsi, nous avons décidé de développer nous-mêmes le matériel nécessaire, et nous sommes heureux de vous présenter d'ores et déjà nos premières réalisations.» Les cartes PC équipées des derniers processeurs Intel® ou AMD® offrent de nombreuses entrées sorties de toutes sortes et permettent, par exemple, l'utilisation simultanée des 4 analyseurs SPECTRAN® V6 ECO (4x USB PD Power Delivery).

Avec SPECTRAN® V6 MOBILE, Aronia présente le premier analyseur de spectre en temps réel portable avec une bande passante en temps réel (RTBW) de 490 MHz. Cela signifie que même les canaux de largeur 320 MHz du standard IEEE 802.11ax peuvent être enregistrés dans leur intégralité. Avec une gamme de fréquence s'étendant de 9 kHz à 140 GHz, et une vitesse de balayage de 3 THz/s, les analyseurs de spectre Aronia utilisés sont prévus pour satisfaire à toutes les situations. Leur tablette est équipée de la dernière génération de processeurs, le choix entre les variantes équipées d'un processeur Intel® Ultra 985H ou AMD® Ryzen 7949 HF est proposé. Le convertisseur analogique-numérique (CAN) à 16 bits possède une vitesse de conversion pouvant atteindre 2 Géch/s (GSPS).

Les 8 ports USB sont une caractéristique inhabituelle, quatre d'entre eux étant de type PD (Power Delivery) capable de fournir une puissance atteignant 100 W avec un câble USB C. D'une façon générale, les systèmes s'appuyant sur des PC conventionnels ont un maximum de deux ports USB-PD. Mr Chimielus ajoute : «L'augmentation du nombre d'interfaces USB disponibles est une des raisons qui nous ont conduits à développer nos cartes PC. La technologie de mesure impose

la connexion par USB de dispositifs périphériques de plus en plus nombreux, aux analyseurs de spectre temps réel. Les appareils conventionnels atteignent rapidement leurs limites et l'utilisation d'extensions USB est hors de question, en particulier en raison des délais de transmission. De plus, les dispositifs USB sont de plus en plus alimentés par leur port USB, ce qui rend nécessaire de disposer d'un nombre important d'interfaces USB-PD.» Un boîtier robuste en aluminium protège l'électronique et l'affichage pour les usages à l'extérieur. Avec les nouvelles tablettes SPECTRAN® V6, Aronia demeure fidèle à sa philosophie offrant la bonne solution pour chaque application. Les clients peuvent, au choix, acquérir une version pré-configurée, ou personnaliser le dispositif selon leurs besoins. ▶

VF : Jean Boyer — 240571-04

### À propos d'Aronia AG

Aronia AG est une société technologique basée à Strickscheid dans la région Allemande Eifel. Crée en 2003 par Thorsten Chimielus, la société produit principalement des analyseurs de spectre basés sur un traitement d'analyse de spectre breveté. Depuis la conception et le développement à l'assemblage final et au développement logiciel, l'ensemble de cette haute-technologie est réalisé en Allemagne.

Le premier analyseur de spectre a été produit et livré en 2004. En 2008, la génération suivante des analyseurs de spectre a été présentée avec la Série V4, qui a établi un record mondial pour un appareil portable en ce qui concerne le facteur de bruit, moyen DANL (Displayed Average Noise Level) de -170 dBm (Hz). Les analyseurs de spectre SPECTRAN de la 6ème génération sont sur le marché depuis 2020.

Avec la nouvelle génération d'analyseurs de spectre, Aronia augmente les limites en matière de vitesse. En reliant en cascade plusieurs appareils SPECTRAN, une bande passante dans la gamme du gigahertz peut être atteinte. La série SPECTRAN® V6 atteint les sommets dans la gamme des appareils USB compacts. Le système est utilisé mondialement dans de nombreuses installations individuelles et dans des systèmes complexes.

Aronia AG développe, distribue et commercialise des appareils de mesure, des brevets technologiques dans le domaine des mesures des basses et hautes fréquences, la robotique et la protection contre les champs de fréquences basses et hautes de toutes sortes. De plus, la société mène des recherches technologiques dans le domaine des communications et de la mesure, et développe ses propres circuits et méthodes, en particulier pour le développement de technologies de mesures extrêmement sensibles et précises dans le domaine des hautes fréquences.

Aronia AG  
présentera  
ses derniers  
produits et  
développements  
au salon

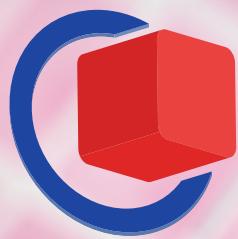


**electronica 2024**

Munich - 12 au 15 novembre

Hall A3 au Stand 516

[www.aronia.com](http://www.aronia.com)



# embeddedworld

Exhibition & Conference

CONNECTING THE  
EMBEDDED COMMUNITY

11–13.3.2025

NUREMBERG, GERMANY

JUNI  
T TED

Get your  
free ticket now!

[embedded-world.de/codes](https://embedded-world.de/codes)

Use the voucher code **GGew25**



#### Media partners

elektroniknet.de

Markt&Technik

Elektronik

Elektronik  
automotive

Elektronik  
•medical

connect  
professional

NÜRNBERG MESSE

# inductances SMT

## bobines et ferrites - un choix simplifié

Dr. Heinz Zenkner (Würth Elektronik eiSos)

Comment choisir la bonne inductance pour votre application ? Cet article compare les différences entre trois composants SMT inductifs, à savoir les inductances céramiques, les ferrites SMT et les inductances en ferrite bobinées. Leurs propriétés électriques les rendent adaptées à différentes applications, et leurs propriétés physiques parasites peuvent être utilisées à votre avantage dans la conception des circuits électroniques.

Les composants inductifs sont disponibles sous de nombreuses formes. Les versions SMT sont très populaires, car elles sont faciles à monter sur les cartes de circuits imprimés. Cependant, toutes les inductances ne sont pas identiques, comme le montre cet article en utilisant trois variantes d'inductances SMT, avec l'inductance céramique, l'inductance ferrite SMT et l'inductance ferrite bobinée.

La **figure 1** montre une comparaison des courbes d'impédance des trois types d'inductances :

- Ferrite SMT : WE-CBF [1];
- Inductance SMT avec noyau céramique (« noyau à air ») : WE-KI [2];
- Enroulements de fil sur un noyau de ferrite (« ferrite bobinée ») : WE-RFI [3]

Les composants ont été sélectionnés de manière à présenter une courbe d'impédance similaire dans la plage située en dessous de leurs impédance maximale. Les différences d'impédance sont visibles dans la zone des pics, la ferrite SMT atteint son maximum à la fréquence la plus basse, tandis que la ferrite bobinée atteint son maximum à la fréquence la plus élevée. L'inductance en céramique présente la montée et la descente les plus raides dans la zone du maximum d'impédance, et par conséquent, le facteur de qualité Q le plus élevé.

### Comparaison des paramètres électriques

La **figure 2** compare les paramètres électriques des inducteurs. Pour les inductances sans noyau de ferrite (WE-KI), l'inductance est indiquée comme une valeur dans les fiches techniques, dans ce cas 560 nH. Bien que la valeur de l'inductance soit donnée pour une certaine fréquence mesurée, la valeur en dessous de la fréquence de résonance est quasiment constante (voir la fiche technique). En y regardant de plus près, la réactance de l'inductance n'augmente pas linéairement avec la fréquence. L'impédance de la bobine à noyau d'air est augmentée par deux effets, à savoir l'augmentation de la réactance par la loi de Lenz et l'augmentation de la résistance à cause de l'effet de peau.

Dans le circuit purement inductif, la bobine est connectée directement à la tension d'alimentation en courant alternatif. Lorsque la tension augmente et diminue avec la fréquence, la force contre-électromotrice (FCEM) auto-induite dans la bobine augmente et diminue également en fonction de ces variations. Cette force contre-électromotrice auto-induite est directement proportionnelle au taux de variation du courant dans la bobine

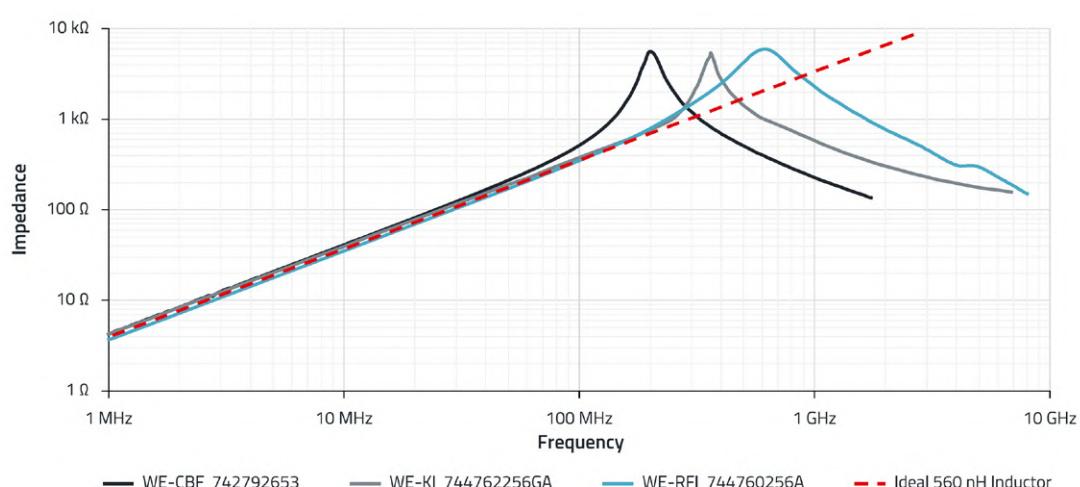
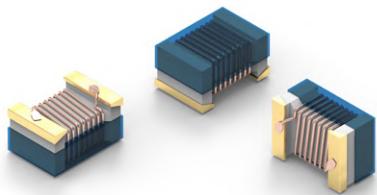
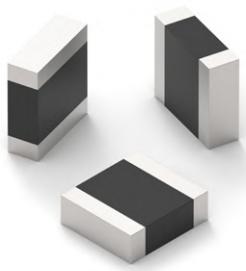


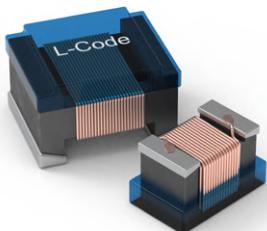
Figure 1. Comparaison des impédances de ferrites SMT, de l'inductance céramique/air et de la ferrite bobinée.



Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
<b>Inductance</b>	L	25 MHz	560	nH	±2%
<b>Q-Factor</b>	Q	100 MHz	45		min.
<b>DC Resistance</b>	$R_{DC}$	@ 20 °C	1.5	Ω	max.
<b>Rated Current</b>	$I_R$	$\Delta T = 15 K$	310	mA	max.
<b>Self Resonant Frequency</b>	$f_{res}$		430	MHz	min.



Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
<b>Impedance @ 100 MHz</b>	Z	100 MHz	600	Ω	±25%
<b>Maximum Impedance</b>	$Z_{max}$	200 MHz	4500	Ω	typ.
<b>Rated Current 1</b>	$I_{R1}$	$\Delta T = 20 K$	300	mA	max.
<b>Rated Current 2</b>	$I_{R2}$	$\Delta T = 40 K$	500	mA	max.
<b>DC Resistance</b>	$R_{DC}$	@ 20 °C	0.65	Ω	max.
<b>Type</b>			High Speed		



Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
<b>Inductance</b>	L	25.2 MHz	0.56	µH	±5%
<b>Q-Factor</b>	Q	100 MHz	45		min.
<b>Impedance @ 100 MHz</b>	Z	100 MHz	350	Ω	±25%
<b>Maximum Impedance</b>	$Z_{max}$	600 MHz	5570	Ω	typ.
<b>Rated Current 1</b>	$I_{R1}$	$\Delta T = 15 K$	450	mA	max.
<b>Rated Current 2</b>	$I_{R2}$	$\Delta T = 40 K$	620	mA	max.
<b>DC Resistance</b>	$R_{DC}$	@ 20 °C	0.55	Ω	max.
<b>Self Resonant Frequency</b>	$f_{res}$		340	MHz	min.

Figure 2. Comparaison des paramètres de la ferrite SMT, de l'inductance céramique/air et de la ferrite bobinée.

(loi de Lenz) et augmente donc avec la fréquence. Par conséquent, la réactance de l'inductance augmente également avec la fréquence, et cette fonction est proportionnelle.

Une augmentation supplémentaire de l'impédance est provoquée par l'effet de peau. À basse fréquence, un conducteur utilise toute sa surface transversale comme moyen de transport pour les porteurs de charge. Si la fréquence augmente, une augmentation du champ magnétique dans la direction du centre du conducteur représente une impédance pour les porteurs de charge, ce qui entraîne une diminution de la densité de courant au centre du conducteur et une augmentation de la densité de courant au bord du conducteur. Cette augmentation de la densité de courant à la périphérie du conducteur est connue sous le nom d'effet de peau. L'effet augmente avec la fréquence et se produit également avec tous les autres inducteurs (avec un noyau de ferrite).

La fréquence de résonance de l'inductance sans noyau de ferrite est principalement due à la capacité parasite entre les différentes spires. Dès que deux conducteurs sont disposés à proximité immédiate mais séparés par un diélectrique, et qu'il y a une différence de tension entre eux, un condensateur est créé.

La combinaison de ces capacités des spires est connectée en parallèle à l'inductance de l'enroulement, et forme ainsi un circuit résonant parallèle. En plus, il y a une capacité parasite entre les connexions (points de soudure), qui est parallèle à la capacité de l'enroulement. Il en résulte un circuit équivalent formé d'une capacité parasite totale en parallèle avec l'enroulement. Le circuit équivalent est illustré à gauche dans la **figure 3**.

Pour les inductances avec noyau en ferrite (WE-RFI) et les ferrites SMT (WE-CBF), la fiche technique n'indique pas une valeur d'inductance, mais une impédance à une fréquence de mesure donnée. On constate également que la ferrite SMT présente la tolérance la plus élevée, tandis que l'inductance sans ferrite présente la tolérance la plus faible.

Comme l'inductance WE-KI n'a pas de noyau en ferrite, elle nécessite plus de spires de fil pour la même impédance que les composants avec ferrite, ce qui explique pourquoi l'inductance WE-KI a également la résistance ohmique la plus élevée ( $R_{DC}$ , Résistance DC). Un facteur Q, c'est-à-dire un facteur de qualité, est spécifié pour la WE-KI et la WE-RFI, mais pas pour la WE-CBF. Le facteur Q est une mesure de la propriété dissipative d'une inductance. Les inductances ayant un facteur Q élevé ont de faibles pertes et une courbe d'impédance plus étroite. Les inductances avec un facteur Q faible,

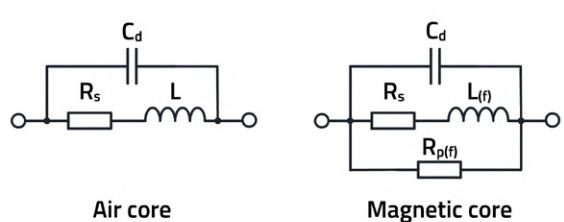
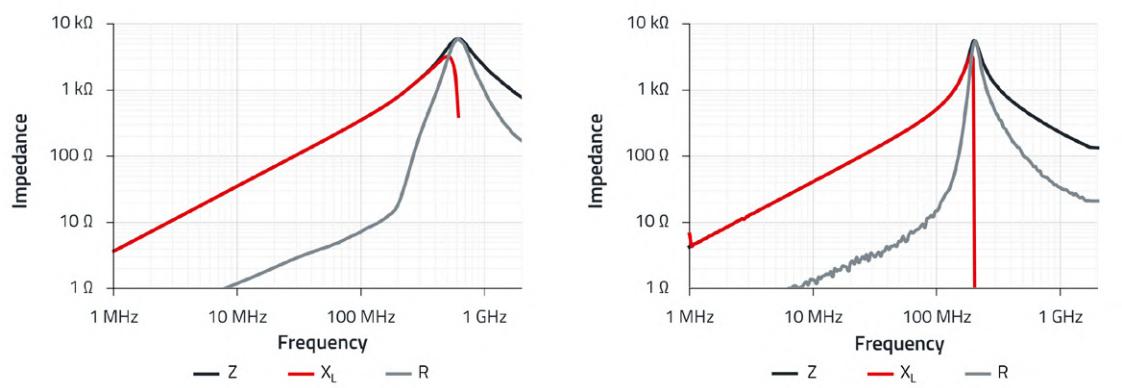


Figure 3. Circuit équivalent d'une inductance sans noyau magnétique (à gauche) et avec noyau magnétique (à droite).

Figure 4. Courbes d'impédance typiques de l'inductance WE-RFI 744760256A (à gauche) et de la ferrite SMT WE-CBF 742792653 (à droite).



en revanche, ont des pertes plus élevées et une courbe d'impédance plus large. L'amplitude de l'impédance maximale de l'inducteur est liée au facteur de qualité Q. Les inductances à faibles pertes avec un facteur Q élevé ont une impédance maximale très élevée, tandis qu'une inductance à fortes pertes a une impédance maximale plus faible. L'impédance maximale et la plage de fréquences du pic d'impédance peuvent être ajustées, en modifiant la façon dont une inductance est bobinée ou les matériaux utilisés pour le noyau. Mais qu'est-ce que l'impédance maximale ?

### Les matériaux du noyau magnétique

La **figure 4** montre les courbes d'impédance en fonction de la fréquence de l'inductance WE-RFI et de la ferrite SMT WE-CBF. Les deux composants utilisent des matériaux ferrites comme matériau de base. Les diagrammes montrent chacun trois courbes différentes, avec R pour la résistance (ohmique),  $X_L$  pour la réactance (inductive) et Z comme valeur de l'impédance du composant. Il est important de comprendre ces diagrammes afin d'utiliser avec succès les inductances en ferrite dans les circuits.

Dans de nombreuses applications en radiofréquence, où de grandes valeurs d'inductance sont nécessaires dans un espace réduit, les inductances à « noyau d'air » ne peuvent pas être utilisées en raison de leur taille. La conception de l'inductance peut être réduite si le noyau d'air est remplacé par un noyau avec un matériau ayant une perméabilité magnétique plus élevée ( $\mu_r > 1$ ).

Si la taille reste la même, la valeur de l'inductance est maintenue malgré la réduction du nombre de spires.

Cela permet d'obtenir plusieurs avantages :

- Une taille réduite, en raison du nombre de spires plus petit nécessaire pour une inductance donnée.
- Un facteur Q plus élevé, car moins de spires signifient moins de résistance du fil.
- Réglage de l'impédance de l'inductance en fonction de la fréquence, par sélection/mélange ciblé du matériau du noyau.

Pourtant, l'utilisation de noyaux magnétiques pose quelques problèmes importants, et il convient de veiller à ce que le matériau choisi pour le noyau soit le bon pour l'application concernée. Voici quelques-uns de ces problèmes :

- Chaque matériau de noyau présente de fortes pertes au-delà d'une plage de fréquences spécifique. Par exemple, l'ajout d'un noyau magnétique à une bobine à air peut réduire la qualité de l'inductance, en fonction du matériau utilisé et de la fréquence de fonctionnement.
- La perméabilité de tous les noyaux magnétiques varie avec la fréquence, et tombe généralement à une valeur très faible à l'extrémité supérieure de leur plage de fonctionnement. Elle

fini par se rapprocher de la perméabilité de l'air ( $\mu_r = 1$ ) et devient « invisible » pour le circuit.

- Plus la perméabilité du noyau est élevée, plus il est sensible aux variations de température. L'inductance de la bobine peut donc fluctuer considérablement sur de larges plages de température.
- La perméabilité du noyau magnétique varie en fonction du niveau du signal appliqué. Si le courant traversant l'inductance est trop élevé et que la densité du flux magnétique à travers le noyau devient trop importante, le noyau va saturer.

Ces problèmes peuvent être résolus, en prenant garde au cours de la phase de développement, à ce que les inductances soient sélectionnées correctement pour l'usage auquel elles sont destinées. Pour cela, les diagrammes d'impédance avec les trois courbes d'impédance différentes R,  $X_L$  et Z sont nécessaires. Le comportement des courbes en fonction de la fréquence dépend en grande partie des propriétés magnétiques du matériau du noyau.

Le circuit équivalent d'une inductance sans noyau magnétique est illustré à la **figure 3** à gauche.

Le facteur de qualité d'un inducteur à « noyau d'air » est donné par l'**équation 1** :

$$Q = \frac{X_L}{R_S}$$

Où (**équation 2**) s'applique à  $X_L$ :

$$X_L = \omega \cdot L$$

où  $R_S$  est la résistance des bobinages.

Si un noyau magnétique est ajouté à l'inductance, le circuit équivalent ressemble à la **figure 3** (à droite). La résistance  $R_p(f)$  a été ajoutée pour représenter les pertes qui se produisent dans le noyau lui-même. Ces pertes, qui dépendent de la fréquence, se présentent sous la forme d'un hystérésis magnétique. L'hystérésis est la perte de puissance dans le noyau, qui se produit en raison des courants de Foucault et du réalignement des particules magnétiques dans le matériau lorsque la magnétisation change. Des courants de Foucault circulent dans le noyau à cause des courants qui y sont induits. En plus de cela, l'inductance L dépend également de la fréquence L(f), car comme mentionné auparavant, la perméabilité magnétique du matériau varie de manière non linéaire avec la fréquence f. La qualité d'une inductance à noyau de ferrite est donc un paramètre variable qui dépend du courant circulant dans l'inductance et doit donc être déterminée au cas par cas.

La ferrite est un matériau qui contient principalement du fer. Elle est fabriquée à partir d'un mélange d'oxyde de fer et d'autres micro-métaux. Comme le matériau a une faible conductivité électrique, il réduit les courants de Foucault, et par conséquent, les pertes dues aux courants de Foucault restent faibles. Une propriété particulière de ces matériaux est leur forte dépendance à la fréquence, à la densité du flux magnétique et à la température.

### Perméabilité complexe

Les propriétés magnétiques des matériaux peuvent être décrites par la « perméabilité magnétique »  $\mu$ . C'est une propriété qui quantifie la réponse magnétique de la densité de flux  $B$ , lorsque le matériau est exposé à un champ magnétique  $H$ . Elle est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique et au rapport entre les variations de  $B$  et de  $H$  (**équation 3**) :

$$\mu = \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

La valeur de la perméabilité absolue  $\mu$  exprime le rapport direct entre  $B$  (T) et  $H$  (A/m), l'unité SI résultante étant (H/m). La perméabilité relative est sans unité, elle se réfère à la perméabilité du vide ( $\mu_0$ ) et est généralement spécifiée dans les fiches techniques des inductances. Les valeurs relatives fournissent un indicateur facilement compréhensible, de la capacité du matériau en question à concentrer le champ magnétique « mieux » que le vide.

On obtient ainsi la relation suivante à l'**équation 4** :

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

Avec  $\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide :  $1,26 \times 10^{-6}$  (H/m).

La plupart des matériaux ferritiques utilisés sont des mélanges de poudres de fer additionnées de manganèse-zinc (MnZn) et de nickel-zinc (NiZn), et  $\mu_r$  est généralement compris entre 600 et 15 000 pour le MnZn et entre 10 et 1 500 pour le NiZn. Il est important de noter que la perméabilité relative dépend énormément de la fréquence du champ magnétique. En plus, les courbes de la **figure 4** indiquent déjà que la perméabilité magnétique relative a deux composantes, une composante réelle  $\mu_r'$  et une composante imaginaire  $\mu_r''$ . Cette perméabilité complexe devient pertinente avec les effets de champ magnétique à haute fréquence, dans lesquels un déphasage entre  $H$  et  $B$  se produit. Cette relation se traduit par l'**équation 5** :

$$\mu = \frac{B_0 \cdot e^{j(\omega t - \delta)}}{H_0 \cdot e^{j\omega t}} = \frac{B_0}{H_0} \cdot e^{-\delta} = \frac{B_0}{H_0} \cdot \cos(\delta) = -j \cdot \frac{B_0}{H_0} \cdot \sin(\delta)$$

appliquée à une inductance avec un noyau de ferrite se traduit par l'**équations 6 et 7** :

$$L_s = \mu' \cdot L_0 \quad \text{and} \quad R_s = \omega \cdot L_0 \cdot \mu''$$

Où  $L_0$  est l'inductance du bobinage sans ferrite.

La relation à l'**équation 8** s'applique par conséquent :

$$Z = j \cdot \omega \cdot L_0 \cdot (\mu' - j \cdot \mu'') = R + j \cdot X_L$$

Avec  $L_0$  : Inductance sans ferrite.

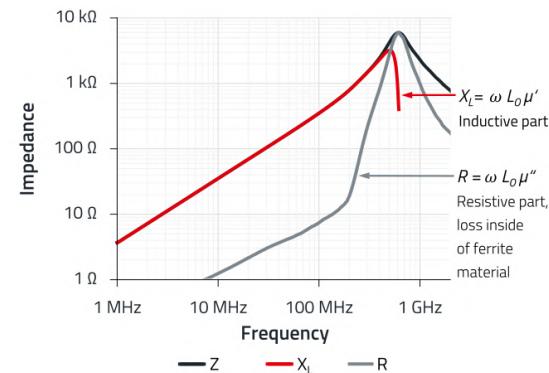


Figure 5. Courbes d'impédance de l'inductance WE-RFI 744760256A.

Il est facile de voir dans les formules qu'une perméabilité élevée conduit à une inductance élevée, mais elle est aussi habituellement associée à des pertes plus importantes dans le noyau.

Les différentes composantes de l'impédance, à savoir  $Z(f)$ ,  $X_L(f)$  et  $R(f)$ , sont indiquées dans les fiches techniques des inductances en ferrite. La **figure 5** montre à nouveau les courbes d'impédance de l'inducteur WE-RFI 744760256A.

Cela montre également pourquoi les courbes d'impédance sont d'une grande importance pour le fonctionnement d'un circuit lors de l'utilisation d'inductances à noyau de ferrite. L'impédance ( $Z$ ) est une combinaison vectorielle de la résistance et de la phase. La résistance ohmique  $R$  a une propriété dissipative, car l'énergie est convertie et non récupérée. La réactance  $X_L$  est la partie de l'impédance qui est générée par l'inductance. La phase est le retard entre une tension appliquée au composant et le courant qui le traverse. La résistance ohmique et la réactance varient avec la fréquence, et donc la phase également.

Mais ce n'est pas tout. Les matériaux magnétiques présentent des effets de saturation qui, au-delà de certaines fréquences, dépendent principalement de la densité du flux magnétique, c'est-à-dire du courant qui traverse l'inductance en ferrite. C'est ce que l'on appelle la saturation du noyau, un effet que l'**« inductance à air »** ne connaît pas. La **figure 6** montre l'impédance des deux inductances WE-RFI 744760256A et WE-CBF 742792653 avec différentes polarisations en tensions continues selon la fréquence. La différence est clairement visible.

Les inductances bobinées sont moins sensibles à la polarisation en courant continu que les ferrites SMT, pour la même intensité nominale.

L'influence de polarisations magnétiques de différentes intensités sur les courbes d'impédance, peut être simulée pour toutes les références, à l'aide de la plate-forme de simulation en ligne RedExpert de Würth Elektronik [4].

### Domaines d'application privilégiés des inductances

Le **tableau 1** fournit une vue d'ensemble des paramètres les plus importants des trois types d'inductances et de leurs domaines d'application préférés.

Les aspects de la mesure du comportement de l'impédance, comme les conseils détaillés sur l'utilisation de la bonne inductance dans diverses applications, dépassent le cadre de cet article.

L'AppNote ANP129 de Würth Elektronik [5], sur laquelle cet article est basé, propose une configuration plus détaillée pour mesurer le comportement de l'impédance, et présente une méthode simple pour mesurer l'impédance.

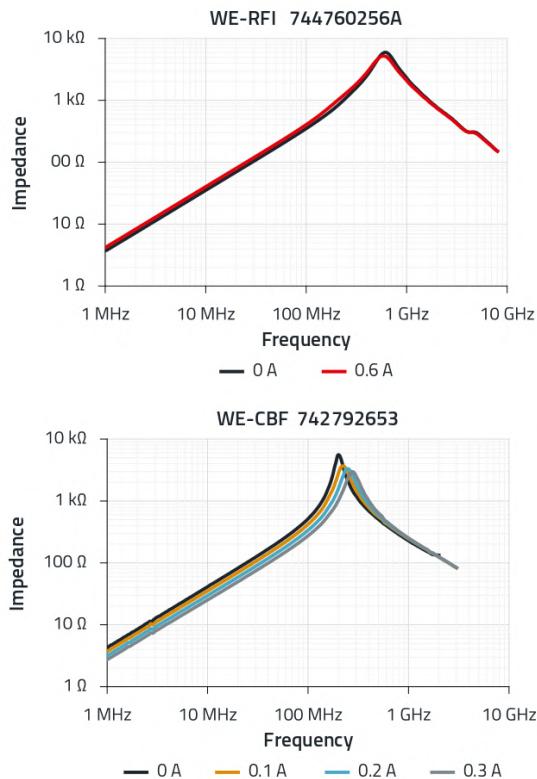


Figure 6. Impédance des deux inductances WE-RFI 744760256A et WE-CBF 742792653, avec différents courants de polarisation DC selon la fréquence.



### À propos de l'auteur

L'ingénieur diplômé Heinz Zenkner a étudié l'électrotechnique, avec une spécialisation dans les technologies des communications et des radiofréquences, et il est titulaire d'un doctorat. Il est depuis de nombreuses années un expert officiellement mandaté et asservi en matière de CEM. Outre ses nombreuses publications scientifiques, il est l'auteur de nombreux ouvrages sur la CEM. Heinz a également été chargé de cours dans diverses universités, à la Chambre de commerce et d'industrie et dans de nombreux séminaires. Il travaille depuis de nombreuses années dans le domaine de l'électronique industrielle, depuis l'idée initiale d'un produit jusqu'à la production en série. Il s'intéresse particulièrement à la transmission d'énergie sans fil, pour laquelle il a développé ses propres concepts théoriques et pratiques.

De plus, les différents champs d'application des différents types d'inductances sont illustrés avec l'exemple de l'utilisation d'un générateur de signaux de 20 MHz. ↗

VF : Laurent Rauber — 240520-04

**Tableau 1. Aperçu et comparaison des paramètres les plus importants des ferrites SMT, des inductances en céramique, et des inductances ferrite bobinées.**

Parameter	SMT ferrite	Ceramic inductor	Wire-wound ferrite inductor
Inductance range	---	low	high
Impedance range	high	low	high
Tolerance of the inductor	high	very low	low
Rated current range	high	very high	low
Loss resistance $R_{DC}$	low	very low	medium/high
Self-resonance frequency	high	very high	low/medium
Shape of the resonant frequency (bandwidth)	wide	narrow	narrow, multiple
Quality Q in the range below the resonant frequency	low	very high	medium
Preferred application	Attenuation/reduction of HF currents	HF filters and resonant circuits	High-frequency decoupling, steep filters, attenuation/reduction of HF currents

### LIENS

- [1] Ferrite SMT WE-CBF de Würth Elektronik : <https://www.we-online.com/en/components/products/WE-CBF>
- [2] Inductance SMT avec noyau céramique de Würth Elektronik : <https://www.we-online.com/en/components/products/WE-KI>
- [3] Perles de ferrite bobinées SMT de Würth Elektronik : [https://www.we-online.com/en/components/products/WE-RFI\\_FERRITE\\_BEAD](https://www.we-online.com/en/components/products/WE-RFI_FERRITE_BEAD)
- [4] Exemple de simulation dans RedExpert : <https://we-online.com/re/5oGcZLA5>
- [5] Zenkner, H.: Inductances, ferrites SMT et ferrites SMT bobinées - Le fil fait la différence. AppNote ANP129 de Würth Elektronik : <https://www.we-online.com/ANP129>

# ECI News

## La plateforme d'information de l'électronique



Composants actifs, composants passifs, interconnexions, hyperfréquences, instrumentation et mesure, logiciels, IdO...

Pour tous les secteurs : automobile, aéronautique et spatial, santé, industrie, télécoms...

ECI News est la plateforme d'information française de l'électronique aux côtés des portails européens eeNews Europe, eeNews Embedded Europe et Microwave Engineering Europe édités par European Business Press.

# utilisation d'un blindage EMI pour assurer la conformité à la compatibilité électromagnétique

Mark Patrick (Mouser Electronics)

Dans cet article, nous abordons l'importance du blindage contre les interférences électromagnétiques (EMI), lequel permet d'assurer la conformité à la compatibilité électromagnétique (CEM), en particulier dans le contexte des technologies modernes telles que la 5G et l'Internet des objets (IoT). Cet article porte également sur les divers matériaux, techniques et stratégies de blindage EMI que les ingénieurs peuvent utiliser tout au long du processus de conception pour prévenir les interférences et garantir la fiabilité des produits.

En raison des avancées technologiques, notamment du déploiement de la 5G et de l'impact croissant de l'Internet des objets (IoT), la demande de blindage contre les EMI augmente. Garantir la conformité à la compatibilité électromagnétique (CEM) et la réduction des sources d'EMI dès le début du processus de conception est essentiel pour éliminer l'inefficacité, éviter les ajustements coûteux et prévenir les retards dans le lancement des produits. Du boîtier au module en passant par le circuit imprimé (PCB), il est possible d'intégrer un blindage EMI dans chaque élément ou sous-système. Les ingénieurs disposent d'un large éventail d'options de blindage pour chaque étape du processus de conception dans presque toutes les applications, qu'il s'agisse d'infrastructures commerciales ou énergétiques, de la défense ou de l'automobile. Cet article offre aux ingénieurs un aperçu des avancées technologiques qui remettent en question les approches actuelles du blindage EMI et fournit une vue d'ensemble des matériaux disponibles sur le marché.

## Omniprésence des interférences électromagnétiques

Les champs électromagnétiques sont une caractéristique commune à presque tous les circuits. Des champs électriques oscillants et des lignes de flux magnétique (voir

**figure 1**) se produisent autour du circuit lorsqu'un courant alternatif circule le long d'un câble ou à travers une piste de PCB. Lorsque ces champs sont induits ou transmis à un autre circuit ou câble, cela se traduit par du bruit ou des interférences indésirables. Ce bruit indésirable, généralement appelé EMI, peut perturber ou interrompre le fonctionnement de l'autre circuit. Une décharge électrostatique (ESD) est une autre forme d'EMI. Les ESD se produisent généralement à des fréquences variables, tandis que les EMI sont permanentes. Tout transitoire de haute tension et de courte durée ( $dV/dt$  élevé) peut entraîner un fonctionnement erratique ou des dommages permanents sur les systèmes électroniques sensibles. La plupart des systèmes électroniques génèrent des EMI de manière non intentionnelle, notamment les horloges, les commutations numériques à grande vitesse, les convertisseurs CC/CC et les interfaces sans fil.

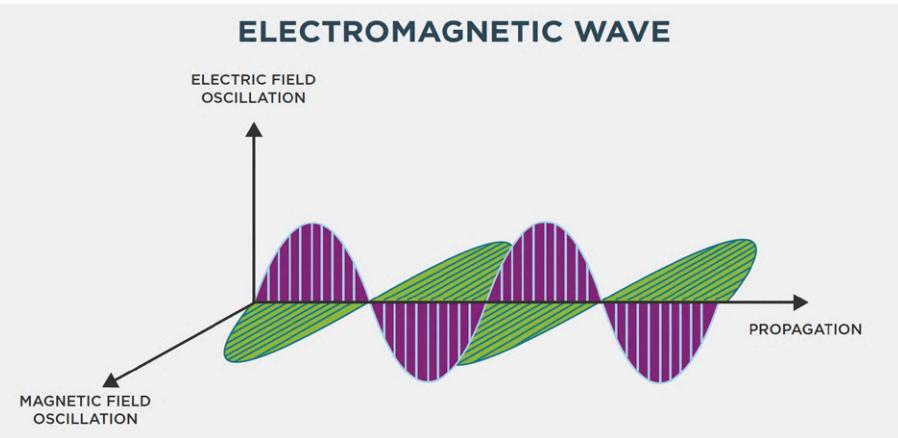


Figure 1. Champs magnétiques et électriques d'une onde électromagnétique. (Source de toutes les images : Kemtron Ltd, qui appartient désormais à TE Connectivity)

Les émissions d'EMI se retrouvent dans d'autres circuits par conduction ou par rayonnement. Par exemple, les horloges à petit signal qui passent le long d'une piste de circuit imprimé peuvent rayonner, généralement au-dessus de 10 MHz, car les pistes deviennent de véritables antennes. Le principe de la CEM est qu'un circuit ou un système est immunisé contre les EMI (voir **figure 2**).

## Dynamique et tendances du marché

La connectivité permanente est désormais partout. Que ce soit à la maison, en déplacement, au travail ou dans notre voiture, jamais une infrastructure de communication fiable et résiliente n'a apporté autant de bénéfices. L'essor de l'IoT et de son pendant, l'Internet industriel des objets (IIoT), ainsi que la croissance des communications cellulaires ont renforcé notre besoin et notre dépendance à l'égard des communications sans fil, qui, malheureusement, sont à la fois un outil essentiel et une source potentielle d'EMI. Le déploiement des infrastructures sans fil 5G, qui utilisent un spectre sans fil à ultra-haute fréquence précédemment inutilisé, élargit encore plus la possibilité d'EMI. Par conséquent, il n'a jamais été aussi important de veiller à ce que les produits soient protégés contre les EMI.

## Normes de compatibilité électromagnétique

Les normes CEM nationales et régionales, qui s'alignent généralement sur les normes CEM internationalement reconnues (voir **figure 3**), fournissent aux fabricants les spécifications auxquelles les produits doivent répondre avant d'être vendus. Les normes stipulent les émissions maximales autorisées pour le développement d'un produit et son immunité ou sa susceptibilité aux émissions par rayonnement ou par conduction. À chaque nouvelle conception, il est recommandé aux ingénieurs concepteurs d'envisager la possibilité d'EMI et d'intégrer des contre-mesures CEM au cours du processus de prototypage plutôt que de procéder à des ajustements ultérieurs. Il est primordial de comprendre les normes EMI et CEM applicables, les éventuelles sources d'émissions et les fonctions du circuit qui peuvent être plus sensibles au bruit EMI (voir **tableau 1**).

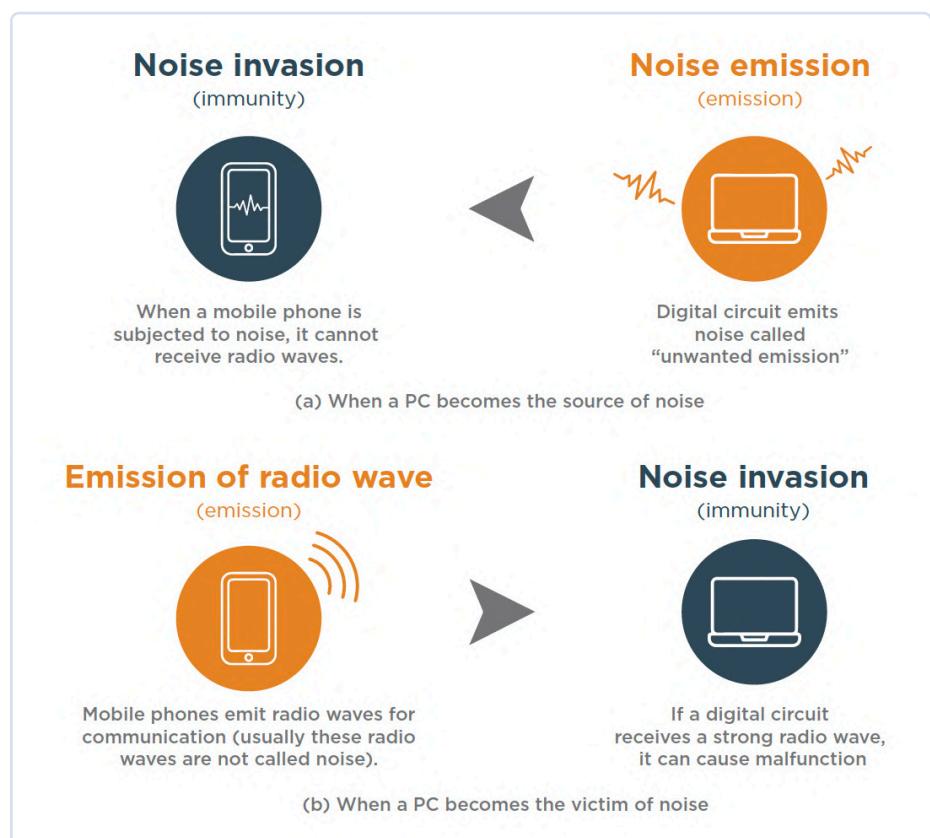


Figure 2. L'immunité aux émissions EMI est essentielle pour assurer la conformité CEM.

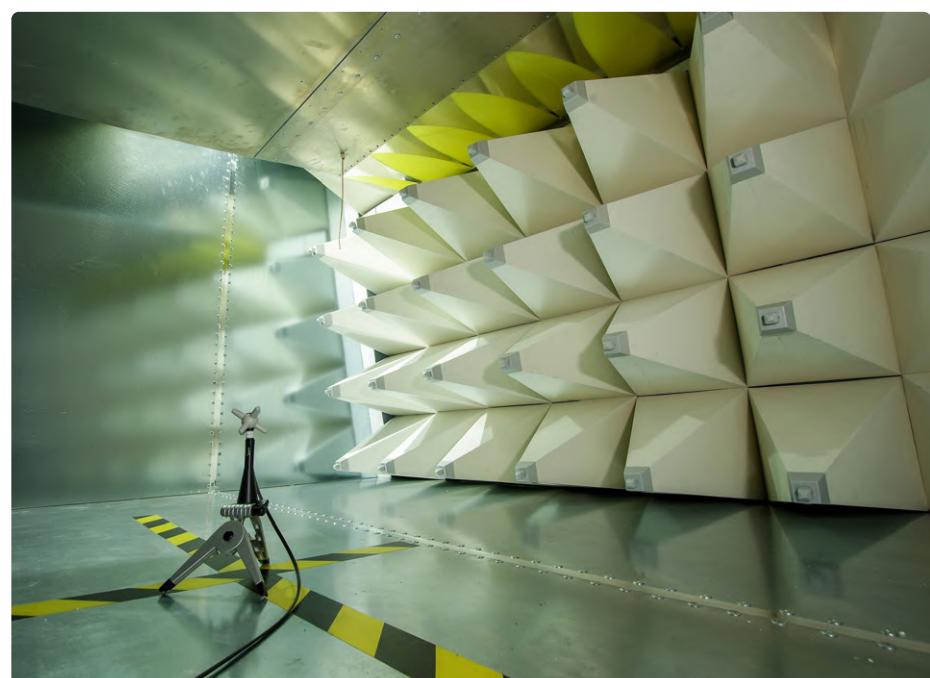


Figure 3. Essai de pré-conformité d'un dispositif testé aux émissions d'EMI.

Tableau 1. normes EMI et CEM courantes, détaillées par secteur et par application.

Application / Industry	EMC Standard
Aerospace, Defense and Marine equipment	DEF STAN 59-411 MIL-STD-461 MIL-STD-704 MIL-STD-1275 MIL-STD-1399
Automotive components	IEC CISPR 25 ISO 11451 ISO 11452 ISO 7637 SAE (multiple numbers)
Commercial equipment	FCC Part 15 class B IEC 61000-6-1 (generic) IEC 61000-6-3 (generic)
Industrial devices	FCC Part 15 class A IEC 61000-6-2 (generic) IEC 61000-6-4 (generic)
Medical devices	IEC 60601-1-2
Power station and substitution equipment	IEC 60000-6-5
Power station and measurement equipment (<1000 V AC, 1500 V DC)	IEC 61326-1
Switch gears and control gears (1000 V AC, 1500 V DC)	IEC 60947-1

IEC: International Electrotechnical Commission

ISO: International Organization for Standards

SAE: Society of Automotive Engineers

FCC: Federal Communications Commission

(Source : Kemtron Ltd, now part of TE Connectivity)

## Obtention de la certification

### CEM

Bien qu'un centre d'essais CEM accrédité ne puisse effectuer que la certification CEM, l'équipe d'ingénieurs peut se pencher sur un certain nombre d'éléments avant de remettre le produit au laboratoire d'essais. Les mesures de base des émissions rayonnées et conduites effectuées à l'aide d'un analyseur de spectre ou d'un récepteur EMI équipé de sondes de champ H et E appropriées indiqueront si des essais supplémentaires ou des contre-mesures EMI sont nécessaires. S'il s'agit d'équipements de test coûteux pour une petite équipe de conception de produits, les sociétés spécialisées dans la location d'équipements de test et de mesure des EMI représentent une alternative rentable. Il est vivement recommandé de procéder à des essais de pré-conformité, car ils permettent à l'équipe de conception

de localiser les sources de bruit potentielles et de mettre en œuvre des méthodes de réduction des EMI, telles que le blindage,

les plans de masse et le découplage. Il est également important d'exposer un produit aux émissions d'EMI.

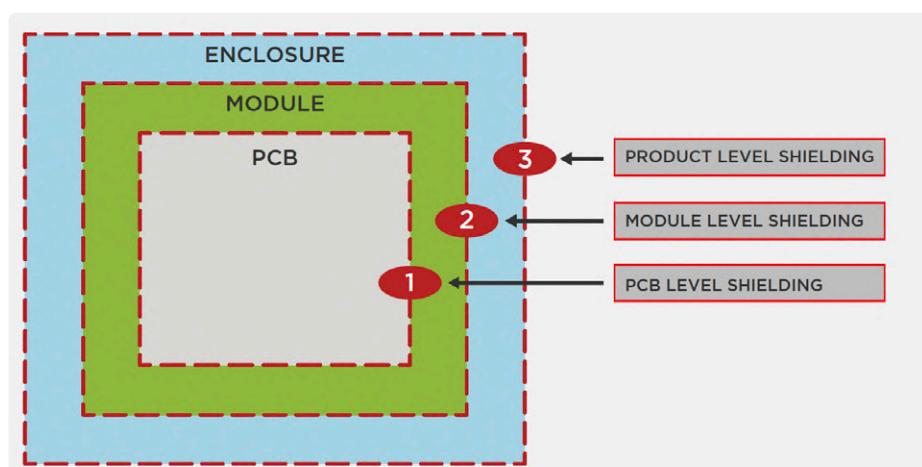


Figure 4. Approche à trois niveaux pour la mise en œuvre du blindage EMI.

## SHIELDING EFFECTIVENESS

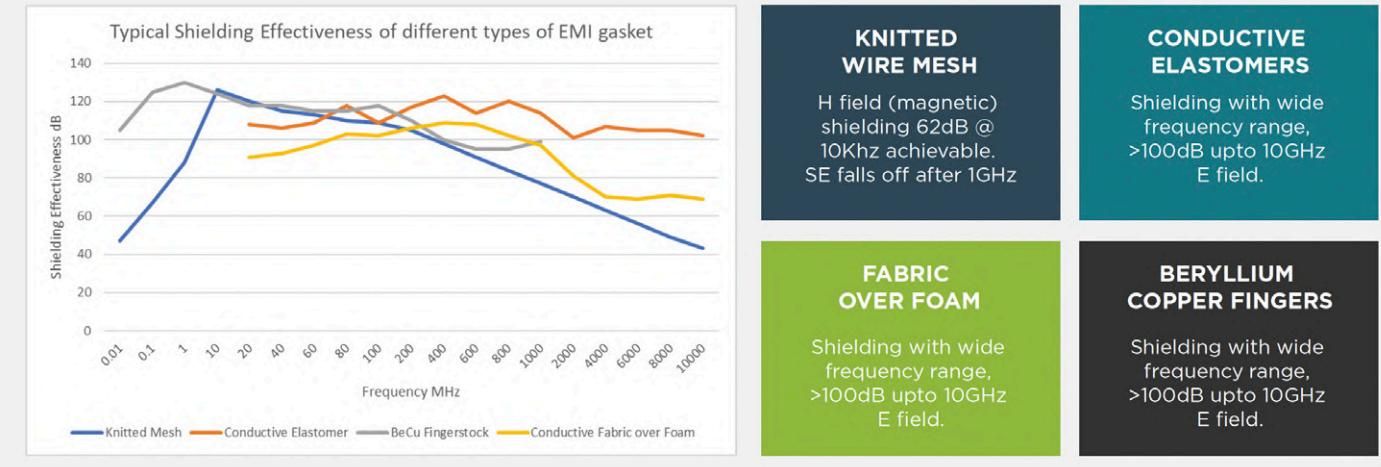


Figure 5. Caractéristiques d'atténuation des EMI de quatre méthodes courantes de blindage en fonction de la fréquence.

### Niveaux de blindage EMI

La réduction des EMI et l'immunisation des fonctions des circuits contre les EMI nécessitent une approche systématique tout au long du processus de conception du produit. Cela inclut certains aspects de la conception du circuit imprimé, l'incorporation de plans de masse et la séparation des dispositifs bruyants des EMI des chaînes de signaux analogiques sensibles. Le blindage des composants, des parties fonctionnelles et des modules offre une approche pratique pour de nombreuses applications, basée sur une méthode à trois niveaux, axée sur le boîtier, le module et le PCB (voir **figure 4**). Le blindage contre les émissions rayonnées consiste à créer une cage de Faraday autour de la source d'EMI. La mise en œuvre d'un blindage au niveau du boîtier réduit toute source de bruit potentielle sortant ou entrant. Cependant, certaines fonctions du circuit peuvent nécessiter des niveaux de protection supplémentaires afin d'éviter que les EMI internes n'aient un impact sur d'autres fonctions du circuit. Le blindage au niveau modulaire est très utile. Il est régulièrement utilisé autour des modules sans fil, des convertisseurs de commutation CC/CC et des panneaux LCD. Il peut s'avérer nécessaire de prévoir un blindage au niveau de la carte pour les composants sensibles, tels qu'un convertisseur analogique-numérique.

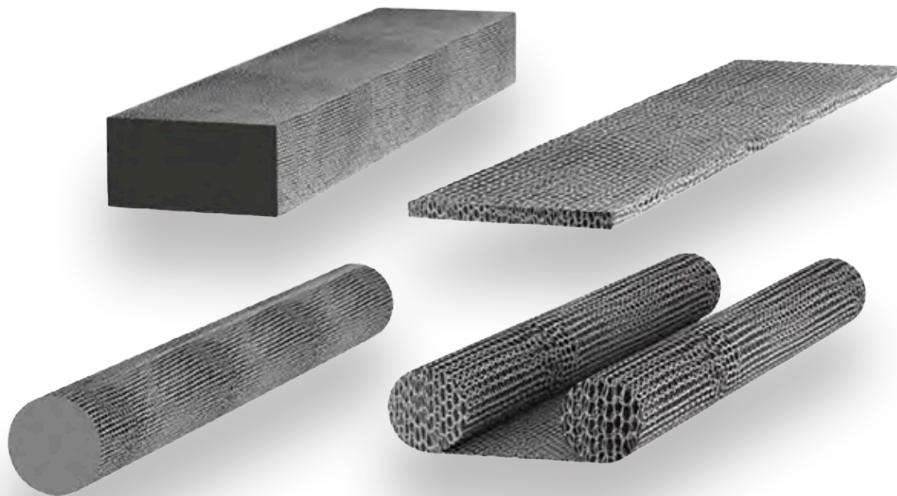


Figure 6. Les joints en treillis métallique tricoté Kemtron de TE Connectivity sont disponibles en longueurs continues et façonnés dans des dimensions spécifiques.

mérique. Le blindage convient également pour toute forme d'interconnexion, de sorte qu'il ne faut pas oublier d'empêcher les émissions rayonnées de s'échapper par les presse-étoupes, les fiches et les prises.

### Matériaux de blindage EMI

Parmi les composants de blindage EMI, on peut citer les joints en treillis métal-

lique tricoté, les élastomères conducteurs d'électricité, les tissus conducteurs et les doigts métalliques. Chaque type présente des caractéristiques d'atténuation des EMI légèrement différentes et convient à des cas d'utilisation spécifiques. La **figure 5** illustre les performances d'atténuation de ces quatre types de blindage en fonction de la fréquence.



Figure 7. Les élastomères conducteurs de Kemtron / TE Connectivity permettent une atténuation jusqu'à 100 dB, à 10 GHz.

**Treillis métallique tricoté :** l'utilisation de plusieurs couches de fils tricotés sur une éponge ou un tube en utilisant différents matériaux de maillage offre une solution efficace contre les interférences électromagnétiques et une compatibilité galvanique. Cette méthode permet la fabrication de formes complexes et le collage à des matériaux porteurs pour créer une protection contre la pénétration. Le blindage à mailles convient à divers cas d'utilisation, y compris les portes d'armoires, les couvercles et les plaques de recouvrement amovibles. Les performances du blindage tendent à diminuer au-delà de 1 GHz, à moins que des couches supplémentaires ne soient incorporées. Parmi les exemples, on peut citer la gamme Kemtron de TE Connectivity de joints en treillis métallique tricoté (voir **figure 6**), disponible en longueurs coupées ou fabriquée en formes de joints finis [1].

**Élastomères conducteurs d'électricité :** disponible en divers matériaux et formes, la gamme de Kemtron Ltd (qui fait désormais partie de TE Connectivity) (voir **figure 7**) offre une atténuation supérieure à 100 dB jusqu'à 10 GHz [2]. Les matériaux

de remplissage comprennent l'aluminium argenté et le graphite revêtu de nickel, les options de liant comprennent le silicone ou le fluorosilicone. Les formes les plus courantes sont les feuilles, les joints plats et les joints toriques. Les joints toriques «contre-écrou» sont conçus explicitement pour le blindage RF EMI et sont disponibles pour les formats de connecteurs les plus courants [3].

**Grille de ventilation en nid d'abeille :** pour les applications où le refroidissement par air forcé utilise un ventilateur, l'ouverture du ventilateur offre une voie d'échappement directe du bruit d'un boîtier par ailleurs étanche aux interférences électromagnétiques. Pour éviter cela, l'utilisation d'une grille de ventilation en nid d'abeilles, comme celles de la gamme Kemtron/TE Connectivity, offre une meilleure performance EMI tout en permettant un flux d'air adéquat grâce à sa construction de cellules en nid d'abeilles laminées, à une seule couche de feuille d'aluminium. Les grilles sont disponibles dans toutes les tailles de ventilateurs courantes, de 40 mm à 120 mm [4].

## Conformité à la CEM grâce aux blindages EMI

Les interférences électromagnétiques provenant des émissions sonores indésirables des équipements perturbent le bon fonctionnement des systèmes. Le respect de la CEM est une exigence réglementaire et une nécessité pour éviter un comportement erratique des systèmes. Ce bref article présente quelques méthodes de blindage que les ingénieurs peuvent mettre en œuvre pour améliorer l'immunité aux interférences électromagnétiques. 

240531-04



### À propos de l'auteur

En tant que directeur du contenu technique chez Mouser Electronics dans la région EMEA, Mark Patrick est responsable de la création et de la diffusion du contenu technique dans la région – un contenu essentiel à la stratégie de Mouser pour soutenir, informer et inspirer le public technique. Avant de prendre la direction du contenu technique, Mark Patrick faisait partie de l'équipe EMEA Supplier Marketing de Mouser et a joué un rôle important dans l'établissement et le développement de relations avec les principaux partenaires de fabrication. L'expérience antérieure de Mark comprend des tâches pratiques d'ingénieur, l'assistance technique, les ventes techniques de semi-conducteurs et divers postes de marketing. Mark est un ingénieur pratique et possède un diplôme de premier ordre en génie électrique de l'université de Coventry. Il est passionné par les vieux synthétiseurs et les motos britanniques, et n'hésite pas à les entretenir ou à les réparer.

## LIENS

- [1] Treillis métallique tricoté : <https://www.mouser.de/new/te-connectivity/te-kemtron-knitted-wire-mesh-gaskets/>
- [2] Élastomères conducteurs d'électricité : <https://www.mouser.de/new/te-connectivity/te-kemtron-emi-connector-gaskets/>
- [3] Joints toriques contre-écrou : <https://www.mouser.de/new/te-connectivity/te-kemtron-jam-nut-seals/>
- [4] Grille de ventilation en nid d'abeille : <https://www.mouser.de/new/te-connectivity/te-kemtron-honeycomb-air-vents/>

# l'outil ultime pour tous les passionnés d'électronique

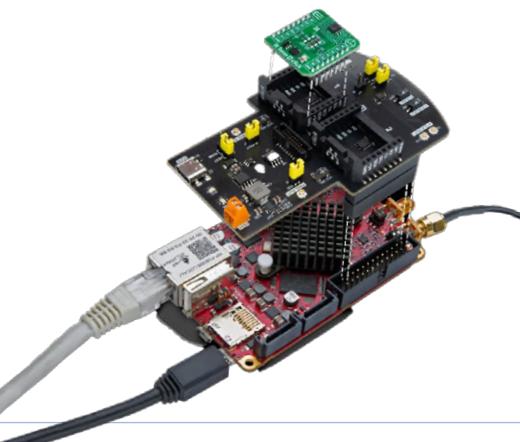
Débloquez des possibilités infinies avec Red Pitaya et plus de 1 000 Click Boards™

contribué par Red Pitaya

Si vous êtes un férus d'électronique et que vous cherchez à améliorer vos projets, la carte Red Pitaya est l'outil qu'il vous faut. Cette plateforme révolutionnaire à code source ouvert combine plusieurs instruments en un seul appareil compact, ce qui en fait un outil indispensable pour les ingénieurs, les amateurs et les chercheurs. Souvent appelée le « couteau suisse » des électroniciens, la carte Red Pitaya remplace les équipements de laboratoire encombrants tels que les oscilloscopes, les générateurs de signaux et les analyseurs de spectre. Et ceci tout en offrant des fonctionnalités puissantes dans un boîtier compact, de la taille d'une carte de crédit, et à un prix abordable. Grâce à sa conception open source, elle contribue également à l'innovation en permettant aux utilisateurs de développer et de partager des applications personnalisées, ce qui en fait la solution tout-en-un par excellence pour vos projets d'électronique.

## Pourquoi choisir Red Pitaya ?

➤ **La polyvalence à son plus haut niveau :** une carte Red Pitaya peut s'adapter à un large éventail d'applications, allant du traitement des signaux et des télécommunications à la robotique et aux projets I/O. Sa conception modulaire signifie que vous pouvez toujours l'adapter à vos besoins spécifiques.



➤ **Une innovation rentable :** dites « au revoir ! » aux équipements coûteux et spécialisés. Une carte Red Pitaya vous offre des fonctionnalités haut de gamme sans se ruiner, rendant l'électronique avancée accessible à tous.

➤ **La portabilité et la facilité d'utilisation :** la carte Red Pitaya, avec son format compact, de la taille d'une carte de crédit, vous permet d'emporter votre laboratoire partout. Que vous soyez sur le terrain ou à votre bureau, Red Pitaya est votre compagnon de tous les instants.

➤ **La communauté open source :** rejoignez un réseau mondial de passionnés et de professionnels qui partagent des applications, des tutoriels et des idées. Grâce à une documentation et à une assistance complètes, vous ne vous sentirez jamais perdu.

## Présentation de Red Pitaya Click Shield : Des possibilités infinies

Comme si la Red Pitaya n'était pas assez polyvalente, la nouvelle **Red Pitaya Click Shield** la porte à un tout autre niveau. Cette carte d'extension innovante vous permet de connecter plus de **1 000 Click boards™ différents** de MikroElektronika, ouvrant ainsi un tout un monde de possibilités. Ces modules plug-and-play contiennent toutes sortes d'éléments, depuis les capteurs et les interfaces de communication jusqu'aux contrôleurs de moteur et aux écrans. Avec la Red Pitaya Click Shield, l'intégration de nouvelles fonctionnalités dans vos projets n'a jamais été aussi simple.

## Qu'est-ce que la Red Pitaya Click Shield ?

La Red Pitaya Click Shield sert de liaison entre la Red Pitaya et la vaste gamme de cartes Click board™. Elle permet une

intégration transparente sans nécessiter de câblage complexe ou d'expertise technique avancée. Il suffit de fixer la Red Pitaya Click Shield à votre Red Pitaya, de brancher les Click boards™ que vous avez choisis, et vous êtes prêt à vous lancer dans les expérimentations.

## En quoi cela peut-il aider vos projets ?

➤ **Personnalisation à l'infini :** imaginez que vous puissiez ajouter toutes les fonctionnalités dont vous avez besoin avec un minimum d'effort. Vous avez besoin de surveiller les conditions environnementales, de piloter des moteurs ou de mettre en œuvre une communication sans fil ? Il existe une Click board™ pour cela !

➤ **Simplicité d'utilisation :** conçu pour une intégration parfaite, la carte Red Pitaya Click Shield élimine les configurations compliquées. Pas de soudure ou de câblage complexe : branchez simplement votre Click board™ et commencez à travailler.

➤ **Une extension rentable :** améliorez les capacités de votre Red Pitaya sans investir dans de multiples dispositifs spécialisés. La Red Pitaya Click Shield est un moyen économique d'élargir l'étendue de votre projet.

➤ **Soutien de la Communauté :** grâce à une vaste communauté d'utilisateurs et à une documentation complète, vous disposerez de toutes les ressources nécessaires pour réussir. Partagez vos idées, trouvez l'inspiration et obtenez de l'aide quand vous en avez besoin. ▶

VF : Laurent Rauber — 240590-04

Rendez-nous visite au salon electronica 2024, stand A3/572 !  
12 au 15 novembre à Munich.

# HDI au milieu

Un nouveau service PCB-pooling rentable pour des petits BGA

## contribué par Eurocircuits

Parfois, il y a un composant que nous voulons vraiment utiliser, mais il n'est disponible que dans un boîtier BGA à pas fin – l'utiliser ferait basculer notre conception au-delà de la « technologie PCB standard » vers le domaine HDI. HDI signifie techniquement « interconnexion à haute densité », et pratiquement, cela signifie que nous pouvons concevoir avec des isolements plus petits et des traces plus fines. De plus, nous pouvons utiliser des « microvias » : des via avec des pastilles plus petites et des diamètres de trous plus

petits que ce qui est normalement possible avec un perçage mécanique.

Le HDI permet la miniaturisation, ce qui est formidable, mais cela peut être gênant si cela nous est « imposé » par un seul petit composant sur tout un PCB, rendant ainsi la fabrication excessivement chère. Chez Eurocircuits, nous avons la solution – « au milieu » – qui peut aider nos clients à gérer à la fois l'ennui et le coût. Notre HDI pool (**figure 1**), une construction en 8 couches, conserve les classes techniques « technologie standard » telles quelles, et ajoute des microvias

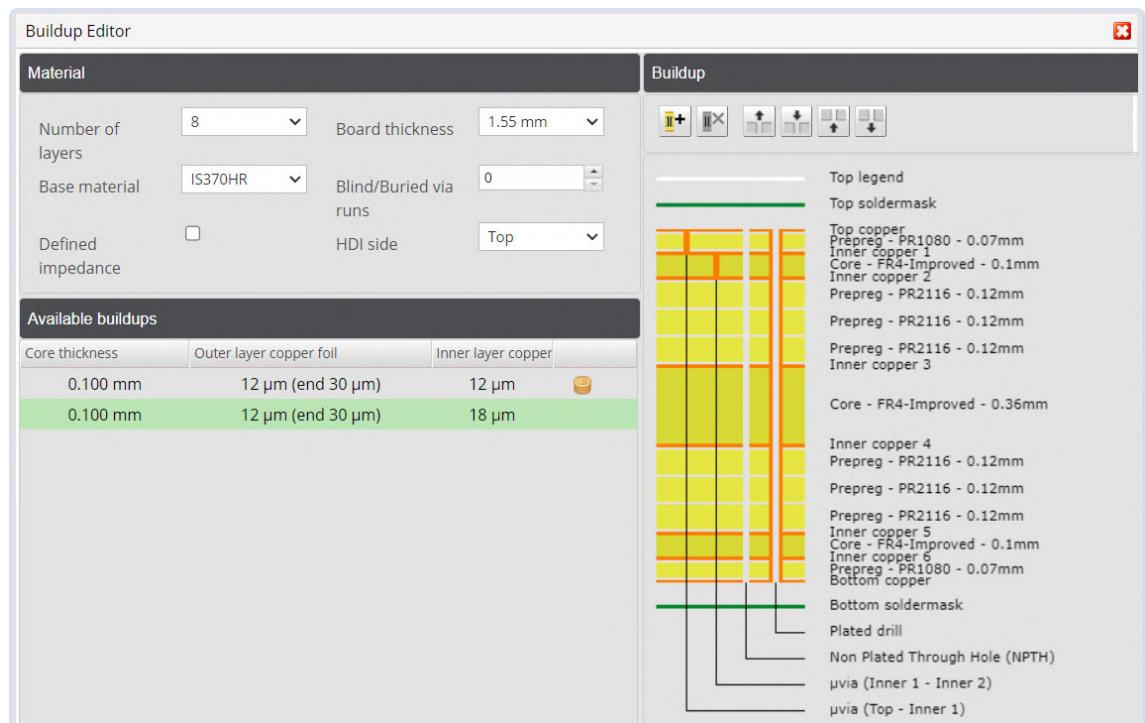


Figure 1. Notre empilage 8 couches de HDI pool

## Pattern classification

	7	8	9
Copper clearance, any layer	≥ 125	100	90
Pad diameter, outer layers Add this value to N/PTH diameter	≥ +350	+300	+300
Pad diameter, inner layers Add this value to N/PTH diameter	≥ +350	+350	+300
Clearance from PTH, inner layers From hole edge	≥ 250	250	250
Clearance from NPTH, inner layers From hole edge	≥ 200	200	200
HDI microvia pad diameter Available only for layers 1-2 and 2-3	≥ 280	230	210
HDI microvia diameter Available only for layers 1-2 and 2-3	= 100	100	100



## Hole diameter classification

	A	B	C	D	E
Plated through-hole (PTH) diameter	≥ 500	350	250	150	100
Non-plated through-hole (NPTH) diameter	≥ 600	450	350	250	200
Max PCB thickness (mm)	= 3.20	3.20	2.40	2.00	1.60

entre les couches 1-2 et 2-3 ou entre 8-7 et 7-6. Cela permet à nos clients de concevoir avec ces BGA à pas fin, où le coût reste gérable puisque le « HDI » est limité à une petite zone et à deux passages de microvias.

## En pratique

Que signifie cela en pratique ? Prenons la classe technique 7 avec la classe de perçage E de la **figure 2**, où le plus petit diamètre de pastille possible est de 0,45 mm (0,1 + 0,35 mm) ; cela ne rentre pas dans la plupart des diamètres de pastille de BGA à pas fin. Cependant, lorsque nous utilisons la même classification avec le HDI pool, le plus petit diamètre devient 0,28 mm, ce qui conviendra ! Cela permet aux concepteurs de placer des vias au centre des pastilles de BGA sans avoir à agrandir les pastilles au-delà des recommandations du fabricant. Les pastilles de microvia plus petites signifient également que l'utilisation des motifs dogbone devient une possibilité.

Évidemment, il est impossible de couvrir toutes les matrices de broches BGA et leurs configurations pour déterminer quelle partie sera routable et laquelle ne le sera pas. Cependant, nous avons configuré nos paramètres pooling de manière à ce que les matrices 8×8 soient entièrement routables pour les BGA jusqu'à un pas de 0,4 mm. (La **figure 3** montre un exemple d'une matrice 8×8 à pas de 0,4 mm entièrement connectés.) Mais bien sûr, des matrices plus grandes sont également possibles, et cela dépend de la taille de la matrice, de la configuration des broches et de

la manière dont ces broches sont utilisées. Dans de nombreux boîtiers, il y a des broches « No Connect », et dans la plupart des conceptions, toutes les broches d'un microcontrôleur ou d'un processeur ne sont pas utilisées, ce qui peut faciliter le routage de grandes matrices BGA avec seulement deux passages de microvias.

Que faire maintenant ? Nous vous invitons à télécharger vos conceptions dans notre Visualizer [1] et à les vérifier pour leur fabricabilité. Comme toujours, nous accueillons vos retours sur la manière dont ce service peut résoudre vos problèmes de fabrication.

240593-04

Figure 2. Les paramètres de nos classes techniques pour lesquels le regroupement HDI est disponible (notez que la classe 9 n'est pas pooling.)

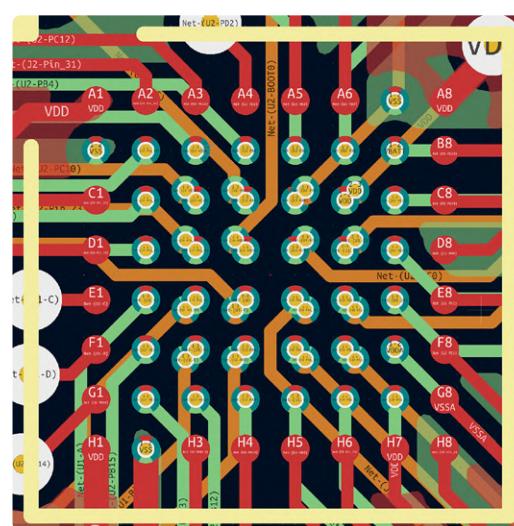


Figure 3. Exemple d'une fan-out d'un STM32F412 dans un boîtier WLCSP64 à pas de 0,4 mm. La première « boucle » de BGA est routée sur la couche 1 (rouge), la deuxième sur la deuxième couche (verte) en utilisant des microvias L1-L2 au centre des pastilles, et la troisième et quatrième boucles sont routées sur la troisième couche (orange) en utilisant des vias décalés entre L1-L2 et L2-L3.

## LIEN

[1] : <http://be.eurocircuits.com/shop/orders/configurator.aspx?loadfrom=web&service=hdipool&deliverycountry=fr&invcountry=fr&country=fr&lang=fr>

# défis de l'analyse DFM pour les circuits flexibles et flexibles-rigides

contribué par DownStream Technologies

La construction de circuits imprimés flexibles et flexibles-rigides n'est pas un concept nouveau. Elle est devenue courante, car les ingénieurs recherchent des solutions alternatives comme support des circuits pour des produits électroniques de plus en plus petits. Le schéma sur une feuille pour un simple câble est analogue à son support physique plat. Un schéma sur de multiples feuilles, qui détaille un circuit flexible-rigide, n'a que peu de ressemblance visuelle avec son assemblage flexible-rigide tridimensionnel construit avec différents matériaux. Cependant, dans les deux exemples de schémas, les outils d'analyse basés sur les schémas sont appliqués de la même manière. Cette même vérité s'applique également aux circuits imprimés courants à deux ou plusieurs couches basés sur du FR4. Les outils d'analyse de circuits imprimés d'aujourd'hui sont applicables à toutes les combinaisons de circuits imprimés rigides, quel que soit le nombre de couches ou leur taille. Cependant, en raison des propriétés uniques des supports flexibles et des supports flexibles et rigides combinés, les conceptions flexibles nécessitent des outils

spécifiques d'analyses, à la fois fonctionnelles et orientées vers la fabrication. L'analyse de l'intégrité telle que l'impédance, le couplage, la diaphonie et le bruit est devenu compliquée par les successions de variables dans les conceptions flexibles. Une même ligne de transmission peut être en *stripline* dans une zone flexible-rigide et en *microstrip* dans une zone flexible. Les types de matériaux et les constantes diélectriques au-dessus ou au-dessous d'une piste traversant un circuit varient également. Bien que les défis liés à l'analyse de l'intégrité du signal pour les conceptions flexibles méritent d'être discutés, cet article se concentrera sur les défis actuels de l'analyse de la conception pour la fabrication des circuits flexibles et flexibles-rigides.

## Comparaison des circuits imprimés rigides avec les circuits flexibles et les circuits flexibles-rigides

Certains concepteurs conçoivent les circuits imprimés souples comme de simples circuits flexibles, mais il existe de grandes différences entre les circuits rigides et les circuits souples.

Les deux technologies assurent une interconnexion électrique, mais sont fabriquées avec de différents types de matériaux et de techniques. Elles ont également des applications différentes. Il n'est pas nécessaire de concevoir un circuit imprimé flexible-rigide pour la carte mère d'un PC de bureau, mais le flexible-rigide est nécessaire pour la plupart des dispositifs médicaux implantés.

Un circuit imprimé rigide typique est composé de substrats en fibre de verre, recouverts de cuivre électrodeposité, et collés ensemble. Bien que les matériaux utilisés pour coller les substrats varient, il s'agit généralement de feuilles de tissu pré-imprégnées d'époxy non durci. Ce matériau de liaison n'est pas conçu pour être flexible. Le cuivre est gravé chimiquement pour créer un tracé de circuit. La dureté des substrats collés nécessite un routage mécanique pour découper les circuits imprimés bruts. Toutes les couches du circuit imprimé sont généralement de taille et de forme identiques, à moins qu'il n'y ait la présence de cavités, de composants intégrés ou d'autres constructions exotiques. L'empilement des couches du circuit imprimé rigide est identique sur toute la surface du circuit imprimé. Le masque de soudure et la sérigraphie sont presque toujours appliqués.

Les circuits imprimés souples sont constitués de cuivre recuit laminé sur des substrats de polyimide souple. Les couches ou noyaux flexibles sont produits avec ou sans adhésifs. Les circuits flexibles sans adhésif sont surtout utilisés dans les applications qui nécessitent des performances élevées, tandis que les circuits flexibles avec adhésif sont souvent utilisés dans les applications comportant un faible nombre de couches. L'utilisation la plus courante est la feuille de cuivre laminée sur un substrat avec un adhésif époxy ou acrylique. Le matériau du substrat et l'adhésif sont conçus pour être pliés afin de minimiser la cassure des pistes. Comme pour les circuits imprimés rigides, un procédé de gravure chimique est utilisé pour créer un schéma de circuit. La nature flexible des matériaux nécessite une découpe ou un détourage plutôt

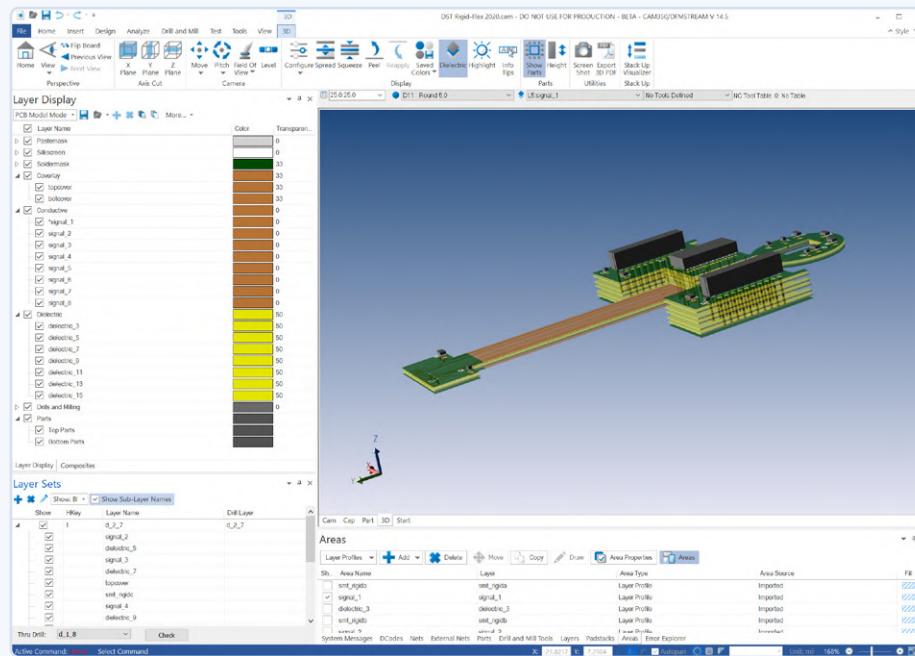


Figure 1. Une conception rigide-flexible en 3D avec des couches séparées pour une meilleure visualisation.

qu'un routage mécanique. Chaque couche d'un élément flexible double-face a une forme identique. Cependant, les matériaux flexibles à couches multiples sont susceptibles de présenter des variations de forme pour chaque couche ou noyau. Les circuits imprimés souples nécessitent un film isolant en couche mince sur les conducteurs, appelé *coverlay*. Contrairement aux masques de soudure pour circuits imprimés rigides, les *coverlays* sont découpés à l'emporte-pièce, tout comme les couches souples qu'ils isolent. La structure d'un circuit imprimé souple multicouche peut varier d'un bout à l'autre de la surface du circuit. C'est particulièrement vrai pour les circuits imprimés flexibles multicouches, où la forme des couches varie parmi l'ensemble des couches ou des noyaux. Une zone de plan de masse ou d'alimentation flexible est généralement hachurée, alors qu'elle est pleine pour les circuits imprimés rigides. Les hachures réduisent le risque de rupture des conducteurs. Les couches flexibles peuvent également être blindées par une feuille de cuivre ou d'argent. Le masquage et le blindage des couches flexibles ne sont pas rares, mais peu courants.

Les circuits imprimés flexibles-rigides sont évidemment une combinaison de matériaux rigides et flexibles. Les circuits imprimés *Rigid-Flex* sont essentiellement une combinaison hybride de matériaux et de procédés issus des circuits imprimés rigides et flexibles. Les deux types de matériaux sont généralement traités séparément et collés ensemble plus tard au cours du processus de fabrication. L'empilement des couches varie généralement beaucoup sur l'ensemble du circuit imprimé (**Figure 1**). Il peut y avoir des zones flexibles-rigides, flexibles uniquement, diverses combinaisons de couches rigides et flexibles, etc... Il y a aussi les circuits flexibles renforcés, où des FR4 vierges ou d'autres matériaux rigides sont collés de manière sélective à des supports flexibles pour leur donner de la rigidité. Le matériau rigide qui sert de raidisseur comporte rarement des conducteurs.

## Les utilisation de circuits rigides par rapport aux circuits flexibles et flexibles-rigides

Les circuits imprimés rigides sont une technologie fondamentale dans les produits électroniques d'aujourd'hui. Les circuits imprimés rigides offrent une intégrité mécanique, une conductivité électrique et une fiabilité, mais sont limités par leur profil en deux dimensions.

Leur planéité limite les concepteurs à deux dimensions, ce qui restreint considérablement la souplesse de la conception, en particulier lorsque la taille des appareils électroniques diminue. Les circuits imprimés flexibles sont pliés pour tirer parti d'un espace tridimensionnel, tout en accueillant des composants. Les circuits imprimés flexibles permettent une utilisation maximale de l'espace pour intégrer des composants électroniques, mais à un coût supérieur à celui des circuits imprimés conventionnels.

Les circuits imprimés rigides et souples sont présents dans de nombreux appareils électroniques. Toutefois, certaines applications bénéficient davantage d'un type particulier de circuit imprimé. Les circuits imprimés rigides conviennent aux produits tels que les téléviseurs, les ordinateurs de bureau, les lecteurs Blu-ray et d'autres produits électroniques de grande taille. Les circuits imprimés flexibles sont présents dans les smartphones, les montres connectées, les tablettes, les appareils photo, les imprimantes et les ordinateurs portables. Ils constituent une exigence fondamentale pour les dispositifs médicaux miniatures implantés tels que les stimulateurs cardiaques, les implants cochléaires et les défibrillateurs implantés. Les assemblages complexes de circuits imprimés multiples interconnectés par des fils ou des câbles sont souvent remaniés, avec des circuits imprimés rigides et flexibles pour améliorer la fiabilité, le poids et réduire l'encombrement. C'est le catalyseur de la conception de nombreux produits militaires et aérospatiaux avec des circuits imprimés souples rigidifiés. Un exemple est une balle intelligente à usage unique qui peut modifier sa trajectoire si la cible visée se déplace.

L'introduction de semi-conducteurs de petite taille ou montés en surface a marqué le début d'une révolution dans le domaine du reconditionnement miniature. Pensez au Walkman de Sony par rapport à un radio-cassette d'autrefois. Pendant des années, les circuits imprimés flexibles ont été cantonnés exclusivement au remplacement des câbles multifilaires. Qui ne se souvient pas de la présence d'un câble plat flexible connecté à la tête d'une imprimante matricielle ou à impact. La tête allait et venait sur le papier tandis que le câble fléchissait dynamiquement et assurait une interconnexion plus fiable entre la tête de l'imprimante et la carte mère. L'introduction du flexible-rigide ne change pas la donne de la même manière que les composants CMS,

en raison de son application quelque peu limitée et de la différence de coût. Il ne faut pas s'attendre à ce qu'une nouvelle collection d'ordinateurs de bureau soit conçue avec des cartes mères rigidifiées pour réduire les coûts. Cependant, les technologies miniaturisées et fiables telles que les pilules avec des caméras, les téléphones cellulaires pliables ou les dispositifs médicaux implantés ne pourraient se passer de la technologie flexibles-rigide.

## Conclusion

Les concepteurs et les fabricants ont assez bien réussi jusqu'à présent avec un accès limité aux outils d'analyse DFM (*Design For Manufacture*) spécifiques aux circuits souples. Aujourd'hui, les circuits flexibles et flexibles-rigides sont devenus plus courants et la technologie sous-jacente ne cesse d'évoluer. Comme c'est souvent le cas avec les nouvelles technologies, les outils de conception et d'analyse des circuits imprimés sont en train de rattraper leur retard. Les outils de CAO pour circuits imprimés ont été mis à jour pour prendre en charge la conception de circuits flexibles et flexibles-rigides, mais nombre d'entre eux ne disposent pas encore du support nécessaire pour transmettre intelligemment les données aux fabricants. Pareillement, la plupart des outils DFM à ce jour sont inadéquats pour analyser correctement les conceptions flexibles et flexibles-rigides afin de détecter les problèmes de fabrication. Chez DownStream, nous avons la chance d'avoir une longue liste d'utilisateurs entièrement impliqués dans des conceptions flexibles, qui se sont associés avec nous pour développer une solution DFM spécifique aux circuits souples. Et nous continuons à travailler avec ces clients pour améliorer nos capacités d'analyse DFM des produits flexibles. En plus du support d'analyse DFM décrit dans ce document, nous prévoyons la possibilité d'analyser d'autres traces de rupture potentielles telles que l'effet de la poutre en I, ainsi qu'une visualisation 3D et une DFM améliorées pour les circuits flexibles et flexibles-rigides dans leur état courbé. Il ne s'agit là que de quelques exemples. Tout comme la technologie sous-jacente, les outils de conception et d'analyse des circuits imprimés doivent également évoluer en permanence pour garantir le succès des clients, et c'est l'un des fondements de l'engagement de Downstream envers notre industrie. 

[www.downstreamtech.com](http://www.downstreamtech.com)

240570-04

# outils open-source

Simulateur d'antennes, gestion des composants, calculatrice, et bien plus

**Tam Hanna (Hongrie)**

Les programmes à code source ouvert sont amusants, et pas seulement parce qu'ils sont gratuits. Pour les personnes qui s'intéressent aux logiciels, ils offrent la possibilité de jeter un coup d'œil « sous le capot » d'un outil utilisé au quotidien. Voici quelques outils qui sont à la fois open-source et utiles.

## Converter NOW : conversion d'unités pratique

Les problèmes liés à l'utilisation des unités correctes font partie intégrante des équipes internationales, alors que le Britannique aime ses unités anglo-saxonnes, l'Européen continental utilise les unités SI. La perte de la sonde spatiale MCO illustre parfaitement le fait que de telles erreurs peuvent entraîner des problèmes graves et coûtant très chers.

**Converter NOW** [1], développé par Damiano Ferrari, apporte une solution, car en principe, il s'agit d'un convertisseur d'unités ordinaire qui fait son travail en douceur, comme le montrent les **figures 1 et 2**. Converter NOW est également intéressant d'un point de vue logiciel : le produit est basé sur l'environnement multi-plateforme Flutter de Google. Toute personne souhaitant s'initier à ce nouveau système serait donc bien avisée d'en étudier le code.

## Calculatrice de poche gratuite

Si votre smartphone Android peut être équipé de nouvelles applications, vous pouvez également installer **Calculator N+** [2]. Il s'agit d'un programme basé sur Symja [3] qui émule une puissante calculatrice scientifique sur votre smartphone (**figure 3**). En ce qui concerne l'utilisation pratique de cette application, on peut bien sûr toujours se demander si une calculatrice classique ne serait pas plus pratique à utiliser, et en fin de compte, c'est une question de goût.

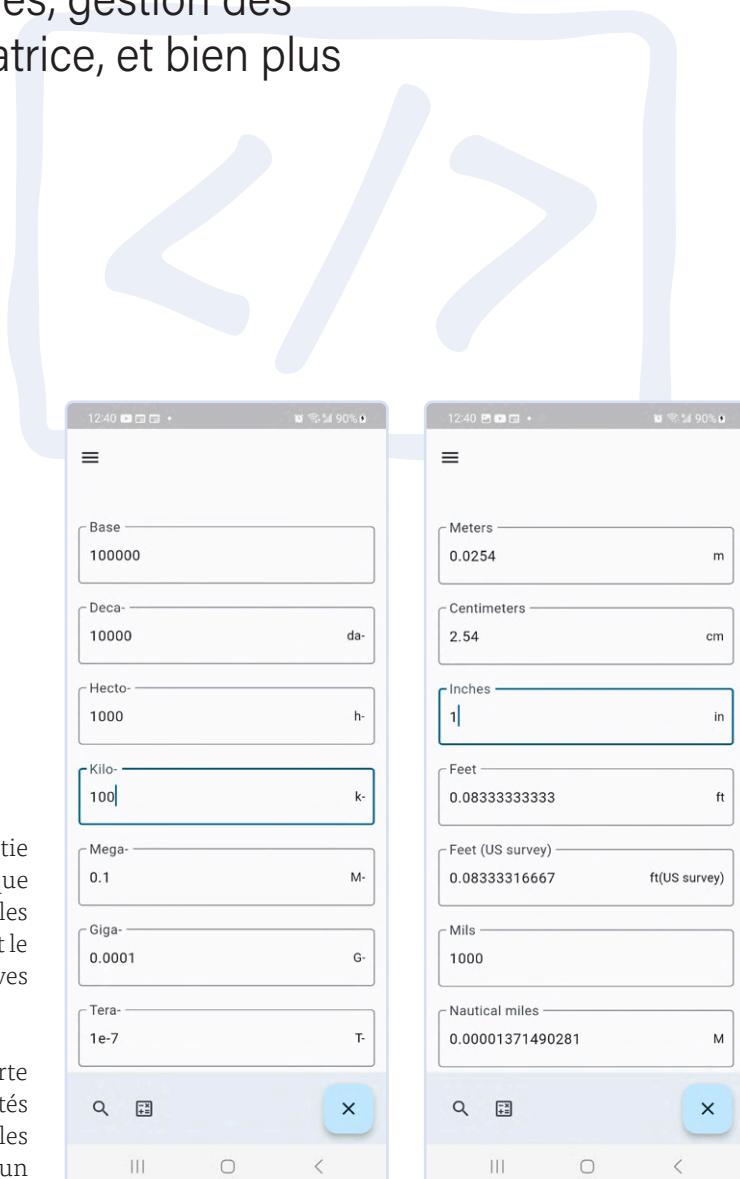


Figure 1. Converter NOW aide les deux parties à surmonter les difficultés liées aux unités SI...

Figure 2. ... ainsi que dans la conversion des longueurs.

## Gestion des composants

Autrefois, il s'agissait d'un travail courant dans de nombreux ateliers de développement : un gestionnaire de composants dédié qui s'occupait de l'inventaire et de l'approvisionnement des composants nécessaires. Ceux qui travaillent seuls contournent souvent ce problème par un usage excessif d'un distributeur : chaque nomenclature est achetée neuve, les composants restants sont stockés, donnés ou jetés à la poubelle.

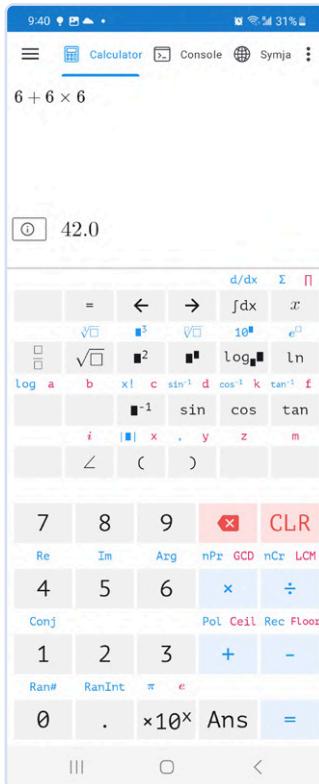


Figure 3. Toute ressemblance avec TI, Casio, etc., est purement fortuite.

Les solutions de gestion des composants sont très répandues dans les logiciels gratuits et payants. **InvenTree** et **PartKeepr** sont tous deux des logiciels libres, ce sont des applications web, ce qui rend leur configuration un peu plus compliquée. Plus précisément, un serveur web est nécessaire, auquel les (divers) clients accèdent ensuite par le biais d'un navigateur web.

Un moyen pratique de contourner ce problème est d'utiliser un Raspberry Pi ou un ordinateur équivalent. Sur ThingiVerse, vous pouvez trouver différents boîtiers qui peuvent être vissés sous un bureau dans le laboratoire. Une fois installé, le Raspberry Pi dispose alors d'un logement discret et peu encombrant (**figure 4**).

La question de savoir si **InvenTree** (**figure 5**) ou **PartKeepr** (**figure 6**) est plus pratique peut être discutée en détail. Je vous recommande d'essayer les versions de démonstration [4][5]. Testez simplement les deux et décidez ensuite quel système correspond le mieux à votre style de travail.

Lors de l'utilisation de l'un ou l'autre système, l'effort investi doit être adapté à la situation actuelle. Par exemple, les deux produits offrent une gestion des nomenclatures, ce qui peut être exagéré, en particulier pour les petites entreprises spécialisées dans le prototypage.

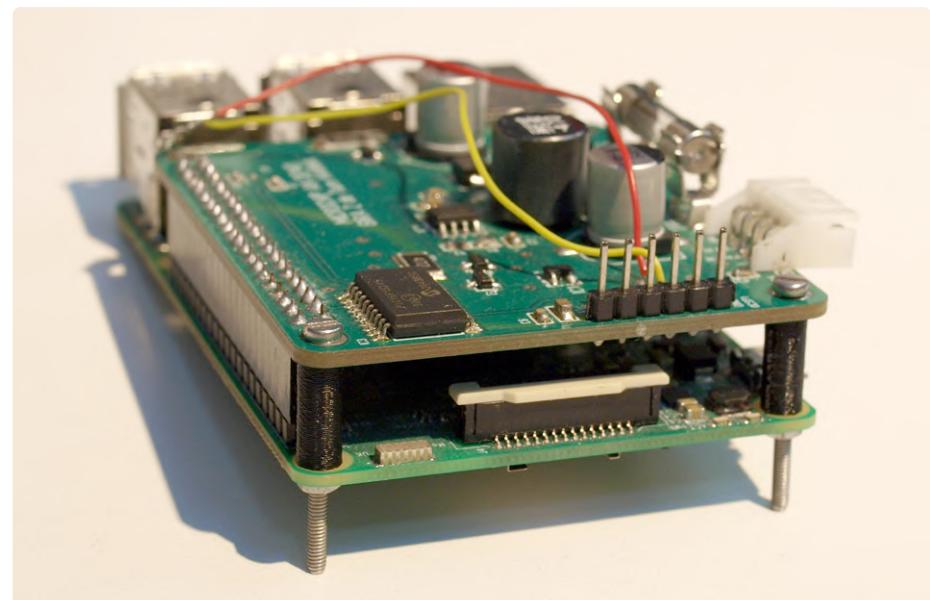


Figure 4. Ce Raspberry Pi obsolète et déclassé fournit divers « services locaux » dans le laboratoire de l'auteur.

Latest Parts						
Part		IPN	Revision	Description	Category	Stock
BB1   Knives	BB1				Rag1	10
Catty   Ba	Catty				Bag1	0
Silicon Wire 10AWG Red				Silicon wire, 10AWG, red	Electronics/Wire	0
Silicon Wire 10AWG White				Silicon wire, 10AWG, white	Electronics/Wire	501
Silicon Wire 10AWG Black				Silicon wire, 10AWG, black	Electronics/Wire	203
Pineheader_1x03x1.27mm				Male pin header connector, 1 rows, 3 positions, 1.27mm pitch, vertical	Electronics/Connectors/Pin Headers	11
Pineheader_1x02x1.27mm				Male pin header connector, 1 rows, 2 positions, 1.27mm pitch, vertical	Electronics/Connectors/Pin Headers	0
Pineheader_1x04x1.27mm				Male pin header connector, 1 rows, 4 positions, 1.27mm pitch, vertical	Electronics/Connectors/Pin Headers	10
Pineheader_1x07x1.27mm				Male pin header connector, 1 rows, 7 positions, 1.27mm pitch, vertical	Electronics/Connectors/Pin Headers	19
Pineheader_1x05x1.27mm				Male pin header connector, 1 rows, 5 positions, 1.27mm pitch, vertical	Electronics/Connectors/Pin Headers	25

Figure 5. Les différences entre les interfaces graphiques d'InvenTree...

Part Manager						
Categories		Parts List				
Root Category		Thumbnail View				
1 Active Components		Add Part				
2 Connectors		Add Meta-Part				
3 Semiconductors		Delete Part				
4 Transistors		Edit Part				
5 LEDs		Edit Meta-Part				
6 ICs		Print Part				
7 Hardware		Print Meta-Part				
8 Tools		Print Category				
9 Vessels		Print Category > Root Category				
10 New VSA		Print Category > Root Category > 1st Level				
11 Active Components		Print Category > Root Category > 2nd Level				
12 Connectors		Print Category > Root Category > 3rd Level				
13 Semiconductors		Print Category > Root Category > 4th Level				
14 Transistors		Print Category > Root Category > 5th Level				
15 LEDs		Print Category > Root Category > 6th Level				
16 ICs		Print Category > Root Category > 7th Level				
17 Hardware		Print Category > Root Category > 8th Level				
18 Tools		Print Category > Root Category > 9th Level				
19 Vessels		Print Category > Root Category > 10th Level				
20 New VSA		Print Category > Root Category > 11th Level				
21 Active Components		Print Category > Root Category > 12th Level				
22 Connectors		Print Category > Root Category > 13th Level				
23 Semiconductors		Print Category > Root Category > 14th Level				
24 Transistors		Print Category > Root Category > 15th Level				
25 LEDs		Print Category > Root Category > 16th Level				
26 ICs		Print Category > Root Category > 17th Level				
27 Hardware		Print Category > Root Category > 18th Level				
28 Tools		Print Category > Root Category > 19th Level				
29 Vessels		Print Category > Root Category > 20th Level				
30 New VSA		Print Category > Root Category > 21st Level				
31 Active Components		Print Category > Root Category > 22nd Level				
32 Connectors		Print Category > Root Category > 23rd Level				
33 Semiconductors		Print Category > Root Category > 24th Level				
34 Transistors		Print Category > Root Category > 25th Level				
35 LEDs		Print Category > Root Category > 26th Level				
36 ICs		Print Category > Root Category > 27th Level				
37 Hardware		Print Category > Root Category > 28th Level				
38 Tools		Print Category > Root Category > 29th Level				
39 Vessels		Print Category > Root Category > 30th Level				
40 New VSA		Print Category > Root Category > 31st Level				
41 Active Components		Print Category > Root Category > 32nd Level				
42 Connectors		Print Category > Root Category > 33rd Level				
43 Semiconductors		Print Category > Root Category > 34th Level				
44 Transistors		Print Category > Root Category > 35th Level				
45 LEDs		Print Category > Root Category > 36th Level				
46 ICs		Print Category > Root Category > 37th Level				
47 Hardware		Print Category > Root Category > 38th Level				
48 Tools		Print Category > Root Category > 39th Level				
49 Vessels		Print Category > Root Category > 40th Level				
50 New VSA		Print Category > Root Category > 41st Level				
51 Active Components		Print Category > Root Category > 42nd Level				
52 Connectors		Print Category > Root Category > 43rd Level				
53 Semiconductors		Print Category > Root Category > 44th Level				
54 Transistors		Print Category > Root Category > 45th Level				
55 LEDs		Print Category > Root Category > 46th Level				
56 ICs		Print Category > Root Category > 47th Level				
57 Hardware		Print Category > Root Category > 48th Level				
58 Tools		Print Category > Root Category > 49th Level				
59 Vessels		Print Category > Root Category > 50th Level				
60 New VSA		Print Category > Root Category > 51st Level				
61 Active Components		Print Category > Root Category > 52nd Level				
62 Connectors		Print Category > Root Category > 53rd Level				
63 Semiconductors		Print Category > Root Category > 54th Level				
64 Transistors		Print Category > Root Category > 55th Level				
65 LEDs		Print Category > Root Category > 56th Level				
66 ICs		Print Category > Root Category > 57th Level				
67 Hardware		Print Category > Root Category > 58th Level				
68 Tools		Print Category > Root Category > 59th Level				
69 Vessels		Print Category > Root Category > 60th Level				
70 New VSA		Print Category > Root Category > 61st Level				
71 Active Components		Print Category > Root Category > 62nd Level				
72 Connectors		Print Category > Root Category > 63rd Level				
73 Semiconductors		Print Category > Root Category > 64th Level				
74 Transistors		Print Category > Root Category > 65th Level				
75 LEDs		Print Category > Root Category > 66th Level				
76 ICs		Print Category > Root Category > 67th Level				
77 Hardware		Print Category > Root Category > 68th Level				
78 Tools		Print Category > Root Category > 69th Level				
79 Vessels		Print Category > Root Category > 70th Level				
80 New VSA		Print Category > Root Category > 71st Level				
81 Active Components		Print Category > Root Category > 72nd Level				
82 Connectors		Print Category > Root Category > 73rd Level				
83 Semiconductors		Print Category > Root Category > 74th Level				
84 Transistors		Print Category > Root Category > 75th Level				
85 LEDs		Print Category > Root Category > 76th Level				
86 ICs		Print Category > Root Category > 77th Level				
87 Hardware		Print Category > Root Category > 78th Level				
88 Tools		Print Category > Root Category > 79th Level				
89 Vessels		Print Category > Root Category > 80th Level				
90 New VSA		Print Category > Root Category > 81st Level				
91 Active Components		Print Category > Root Category > 82nd Level				
92 Connectors		Print Category > Root Category > 83rd Level				
93 Semiconductors		Print Category > Root Category > 84th Level				
94 Transistors		Print Category > Root Category > 85th Level				
95 LEDs		Print Category > Root Category > 86th Level				
96 ICs						

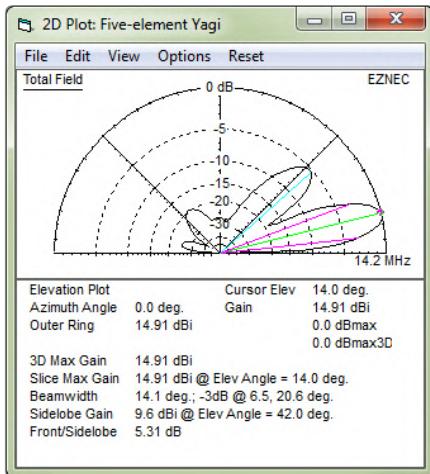


Figure 7. EZNEC facilite le fonctionnement de NEC.

## La simulation permet de gagner du temps

Dans le domaine de la conception d'antennes en particulier, il est vrai que la simulation permet d'éviter les recours aux fabricants de matériel de radiofréquence. En général, les propriétaires des différents algorithmes de simulation sont conscients de cette relation, ce qui explique pourquoi les simulateurs d'antennes sont loin d'être bon marché.

Le simulateur d'antennes open source numéro un est **NEC**. Derrière ce terme ne se cache pas le géant japonais de l'électronique du même nom, mais l'abréviation **Numerical Electromagnetics Code**. Il s'agit d'un produit de simulation d'antennes développé par le Laboratoire national Lawrence Livermore, qui est partiellement open source au moment de la publication de cet article. Plus précisément, la version 2 du produit est open source, tandis que les versions ultérieures doivent être achetées.

Cette popularité est due en partie au fait qu'**EZNEC** [6], une interface utilisateur graphique pour le produit, est disponible gratuitement depuis environ un an (figure 7). L'American Radio Relay League (ARRL) a utilisé ce programme pendant de nombreuses années dans l'*Antenna Book* en tant que « système de démonstration », de sorte que le maniement du langage de script devrait être au moins quelque peu familier à de nombreux techniciens.

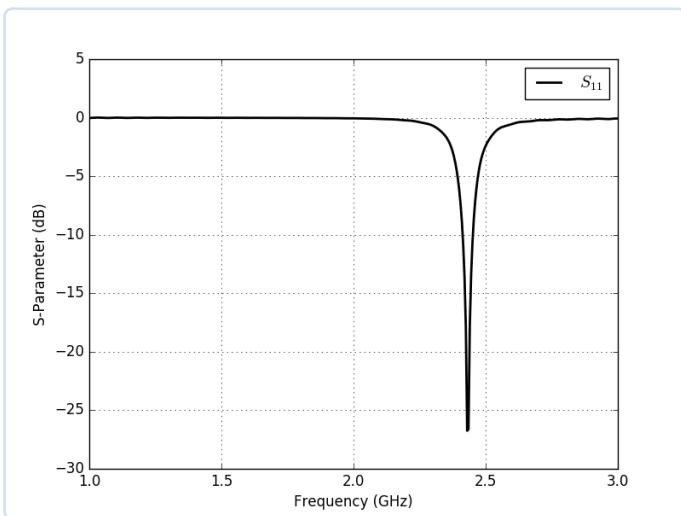


Figure 8. Les résultats graphiques d'Open EMS sont assez impressionnantes. (source : [8]).

Avec **openEMS**, un produit développé au sein de l'Union européenne, un simulateur équivalent est disponible [7]. L'argument le plus important en sa faveur est la possibilité d'assembler les scripts de modélisation avec le langage Python, qui est largement utilisé. La **figure 8**, tirée de la documentation [8], montre une simulation du paramètre S sur une gamme de fréquences.

Enfin, il convient de mentionner brièvement **Elmer** (figure 9). Il s'agit d'un outil abouti [9], qui est optimisé pour la résolution de divers problèmes d'« éléments finis ». Il convient de noter que son utilisation nécessite une formation approfondie.

## Bonus : OpenSCAD !

La conception de boîtiers et de moules techniques dans les programmes de CAO classiques est une tâche que les électroniciens « vétérans », qui ont grandi dans un atelier de fabrication de prototypes, n'apprennent pas facilement au premier coup d'œil. **OpenSCAD** [11] est un système qui utilise une approche « ascendante » pour résoudre ce problème. Plus précisément, il utilise un langage de description rappelant Python et C, et compile les objets à générer à partir de « primitives géométriques » (figures 10 et 11). Le résultat de la compilation est un fichier STL, qui peut être réalisé par exemple avec différentes imprimantes 3D. ↗

VF : Laurent Rauber — 230282-04

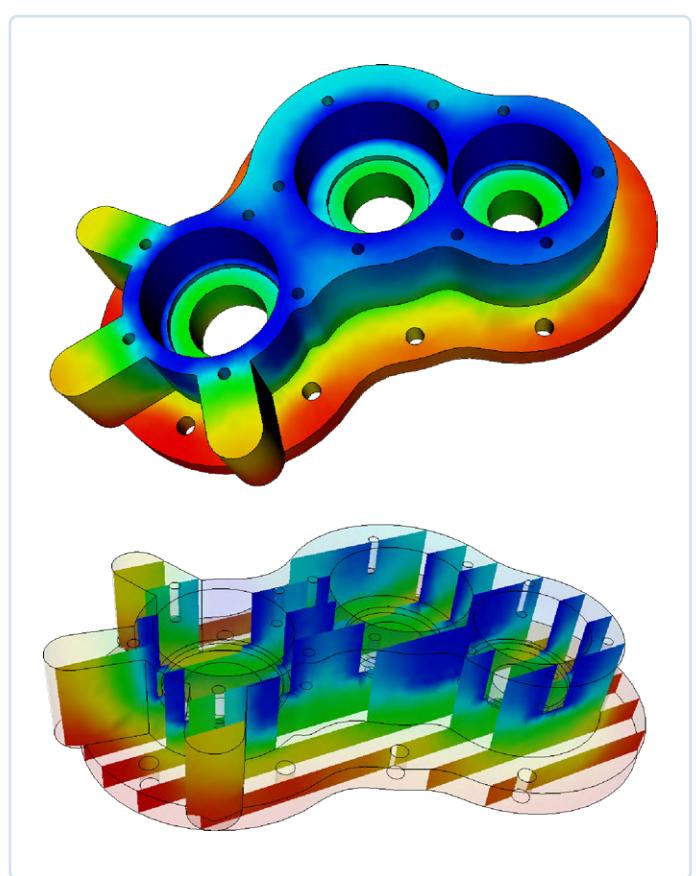


Figure 9. Cet objet n'a pas été conçu avec CATIA, mais avec Elmer. (Source : [10]).

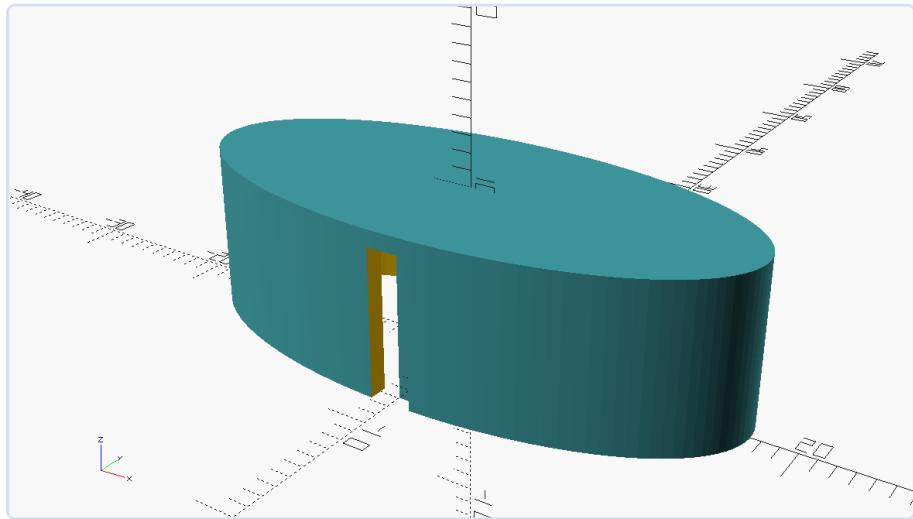


Figure 10. Le bouton de remplacement a l'air décent, tant de l'avant...

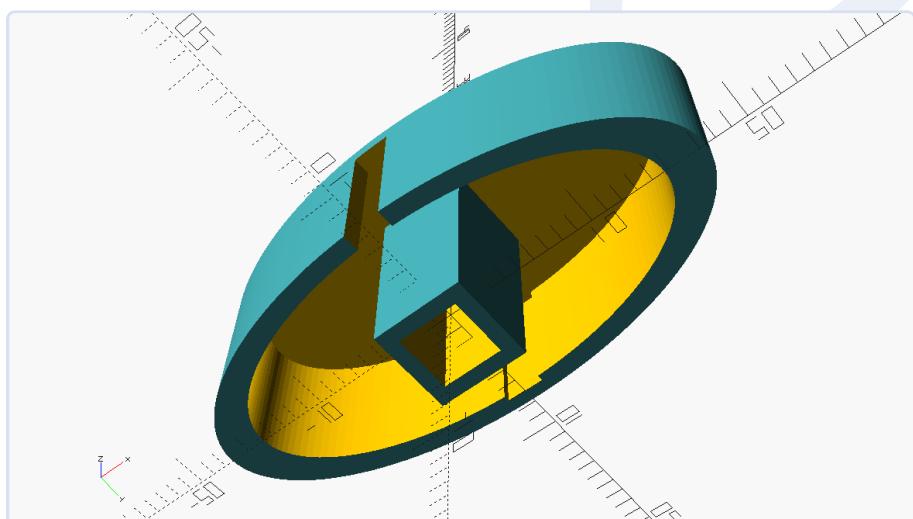


Figure 11. ... que de l'arrière.

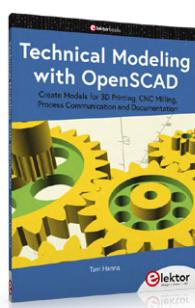
## Questions ou commentaires ?

Contactez Elektor (redaction@elektor.fr).



## Produits

- **T. Hanna, Technical Modeling with OpenSCAD (Elektor 2020)**  
<https://elektor.fr/19418>



## LIENS

- [1] Convertir NOW sur GitHub : <https://github.com/ferraridamiano/ConverterNOW>
- [2] Calculator N+ sur GitHub : <https://github.com/tranleduy2000/ncalc>
- [3] Bibliothèque Symja sur GitHub : [https://github.com/axkr/symja\\_android\\_library](https://github.com/axkr/symja_android_library)
- [4] Démo InvenTree : <https://inventree.org/demo>
- [5] Démo PartKeepr : <https://demo.partkeepr.org>
- [6] Logiciel d'antennes EZNEC : <https://eznec.com>
- [7] openEMS : <https://openems.de>
- [8] openEMS, documentation d'une antenne patch : <https://bit.ly/43W71ak>
- [9] Elmer : <https://csc.fi/web/elmer>
- [10] Exemples d'applications d'Elmer : <https://csc.fi/web/elmer/application-examples>
- [11] OpenSCAD : <https://openscad.org>

# Une évolution fulgurante : les imprimantes 3D industrielles

En 2023, les imprimantes 3D industrielles ont dominé le marché mondial, représentant environ 76 % du revenu total en raison de leur utilisation étendue pour produire des composants complexes et précis dans diverses industries lourdes. Parallèlement, les imprimantes 3D de

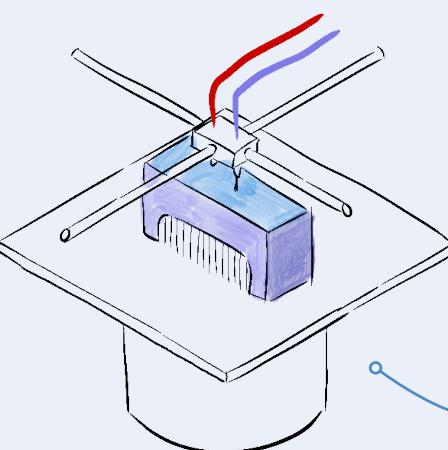
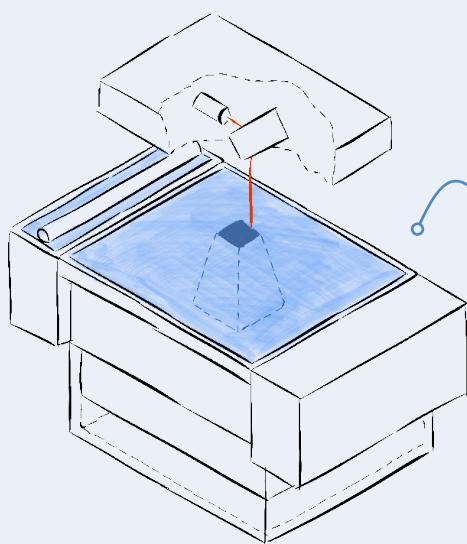
bureau, initialement prisées par les amateurs, ont vu leur popularité s'accroître. Le segment d'entrée de gamme, qui inclut les imprimantes coûtant jusqu'à 2 500 \$, a enregistré une croissance annuelle de 9 % au T3 de 2023 [6]. Des entreprises comme Creality, Anycubic et Bambu Lab

se distinguent dans ce domaine. L'essor des « fabshops » aux États-Unis, qui proposent des services d'impression 3D sur demande, souligne encore la demande croissante d'imprimantes de bureau, parallèlement à la domination continue des imprimantes industrielles.

## Principales méthodes d'impression 3D

Les nouvelles technologies d'impression 3D telles que la stéréolithographie (SLA), le procédé de frittage sélectif par laser (SLS) et le dépôt de fil fondu (FDM) se développent rapidement et offrent des solutions spécialisées. La SLA est réputée pour sa précision dans la création de détails complexes, le SLS est reconnue pour sa capacité à produire des pièces durables et fonctionnelles sans nécessiter de structures de soutien, et la FDM est largement utilisée pour sa polyvalence et sa rentabilité dans le prototypage et la production en petites séries.

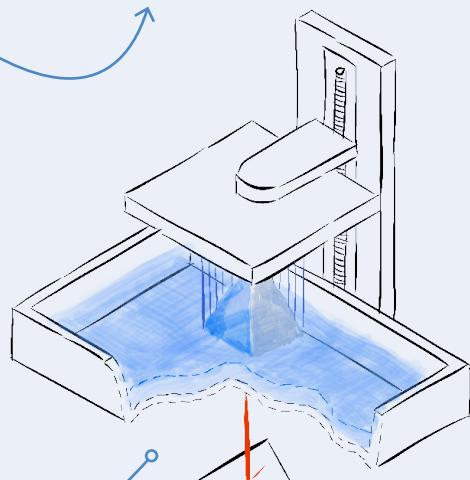
En 2023, la stéréolithographie a dominé le marché avec 10 % du revenu mondial [3], grâce à sa fiabilité et sa facilité d'utilisation. Le FDM représentait une part significative du chiffre d'affaires en 2023 en raison de son adoption étendue dans divers processus 3DP.



**SLA**  
Stereolithography

- > Laser cures photopolymer resin
- > Highly versatile material selection
- > Highest resolution and accuracy, fine details

**BEST FOR:**  
Functional prototyping, patterns, molds and tooling



**SLS**  
Selective Laser Sintering

- > Laser fuses polymer powder
- > Low cost per part, high productivity, and no support structures
- > Excellent mechanical properties resembling injection-molded parts

**BEST FOR:**  
Functional prototyping and end-use production

# Impression 3D : un examen plus approfondi des dernières statistiques

Le domaine de l'impression 3D devient progressivement plus accessible à un public plus large [1], et frontière s'amenuise de plus en plus entre les machines grand public et les machines professionnelles. Grâce à l'émergence d'imprimantes 3D abordables et de haute qualité, un nombre croissant d'entreprises peut désormais intégrer cette technologie dans leurs activités quotidiennes. Cela stimule la croissance du marché [2] et favorise l'innovation au sein des entreprises déjà établies. Cette évolution indique que l'impression 3D sera bientôt aussi répandue et accessible dans les milieux professionnels que les imprimantes de bureau traditionnelles, révolutionnant ainsi les méthodes de fabrication et de conception en entreprise.

**54%**

du chiffre d'affaires mondial en 2023 pour le segment du prototypage sur le marché de l'impression 3D [3].

**23%**

du chiffre d'affaires mondial en 2023 pour le secteur automobile sur le marché de l'impression 3D [3].

Taux de croissance de l'impression 3D. [2]



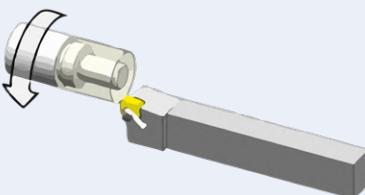
(Source : MarketsandMarkets [2])

## L'usinage CNC : comparaison entre le fraisage et le tournage

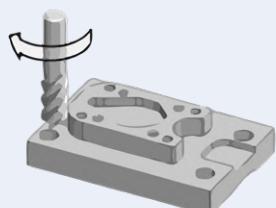
Les procédés de fabrication traditionnels tels que le moulage par injection et l'usinage CNC jouent toujours un rôle important en tant qu'alternatives à l'impression 3D, notamment pour la production en grande série et les applications nécessitant une haute précision.

### Applications

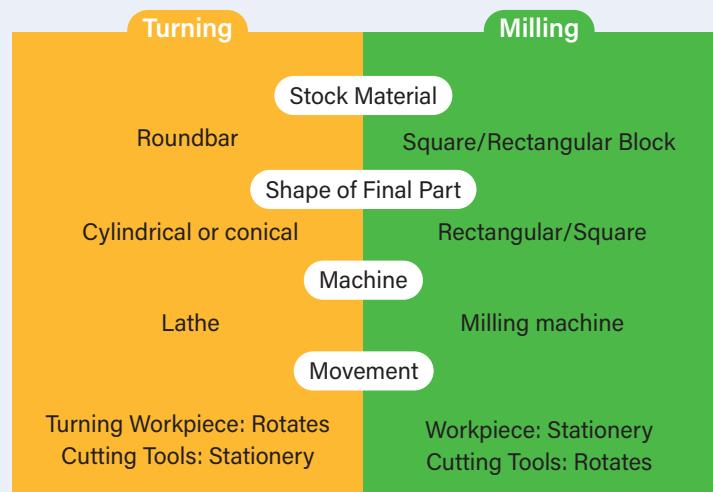
**Fraisage CNC**  
Utilisé pour les formes complexes : engrenages, moules, pièces complexes.



**Tournage CNC**  
Idéal pour les pièces cylindriques : arbres, boulons, composants symétriques.



### Turning Vs Milling Overview



Source : Pioneer Service Inc.

### LIENS

- [1] C. Schwaar, "A 3D Printer On Every Desk? Why Companies Are Buying More 3D Printers," Forbes, May 2024 : <https://tinyurl.com/desktop-3d-printers>
- [2] MarketsandMarkets, "3D Printing Market," 2023 : <https://tinyurl.com/mam-3d-printing>
- [3] GVR, "3D Printing Market Size & Trends," 2023 : <https://tinyurl.com/gvr-3d-printing>
- [4] 3D Printers Perth, "FDM vs SLA vs SLS 3D Printers" : <https://tinyurl.com/fdm-vs-sla-vs-sls>
- [5] Pioneer Service Inc., "Turning Vs. Milling: What's the Difference for Machining?," 2020 : <https://tinyurl.com/turning-vs-milling>
- [6] Kety S., "The "fall and rise" of desktop 3D printing," 3D ADEPT Media, July 2024 : <https://3dadept.com/business-the-fall-and-rise-of-desktop-3d-printing/>

240427-04

# sur le vif

microtechnophobie : c'est grave, docteur ?

Ilse Joostens (Belgique)

Combinez les termes grecs μικρός (mikrós, petit), τέχνη (technē, art, technique) et φόβος (phobos, phobie), et vous obtenez en français savant microtechnophobie, la phobie des petits objets techniques. Cette réaction d'angoisse, qui va de la répulsion à l'évitement, s'observe chez certains électroniciens devant manipuler des CMS.

D'accord, la microtechnophobie n'est pas vraiment reconnue par la médecine. Il n'empêche, la crainte d'avoir à souder des CMS est une réalité : malgré mes années d'expérience, mes milliers de circuits assemblés et l'aide d'une station à air chaud, d'un four à refusion et d'autres outils, je me sens parfois encore empotée face à des CMS. Quelle époque : une sorte d'auto-satisfaction sadique semble motiver les fabricants à concevoir des objets toujours plus petits, doublée de la marotte de nicher toujours plus de soudures par millimètre carré.

## Chat échaudé craint l'eau froide

Les composants montés en surface ont toujours été l'objet d'idées préconçues parmi les électroniciens amateurs : ils ne peuvent pas être soudés manuellement, sont malcommodes pour l'expérimentation, pas adaptés aux prototypes, et gênent les

mesures et les essais. Ces a priori viennent en partie de ce que bon nombre de kits « DIY » reposent encore sur des traversants, et que l'absence de CMS est parfois mise en avant par les vendeurs pour vanter le côté « Adapté aux débutants » de ces kits. Ce qui, bien sûr, ne fait qu'alimenter un peu plus la microtechnophobie.

Les smartphones étant voués à embarquer toujours plus de fonctions, les fabricants de composants se voient à leur tour poussés à toujours plus de miniaturisation. D'où des CMS souvent bien petits, c'est vrai (fig. 1), mais leur soudage à la main n'est pas aussi insurmontable qu'il n'y paraît [1]. Le flux est ici votre allié, surtout si vous l'accompagnez de pannes à souder et de pinces adaptées aux CMS, sans oublier l'indispensable loupe, éclairante ou non. En passant, pensez à détourner la tête dès qu'une narine vous chatouille, l'effet dispersant d'un éternuement sur des CMS peut être étonnant. L'évocation de ce flux d'air me rappelle un de mes vieux fantasmes, celui où, toute de noir vêtue, je pénètre de nuit chez un grossiste en composants, en longe tous les rayonnages avec un aspirateur, puis quitte les lieux en tapinois avec sur le dos un sac (d'aspirateur) rempli de CMS gratuits (gratuits jusqu'à ce que la justice me rappelle le vrai rôle de l'aspirateur). Pour en revenir à la réalité, l'achat d'une station de soudage à air chaud [2] [3] devrait figurer sur votre liste de courses si vous songez à vous mettre sérieusement aux CMS. Elles sont relativement abordables, et peuvent servir à d'autres choses, comme rétrécir des gaines rétractables ou polir et mettre en forme des pièces en acrylique. On peut aussi les utiliser pour dessouder des CMS – cela s'avère même plus facile que de dessouder des traversants placés sur des cartes à

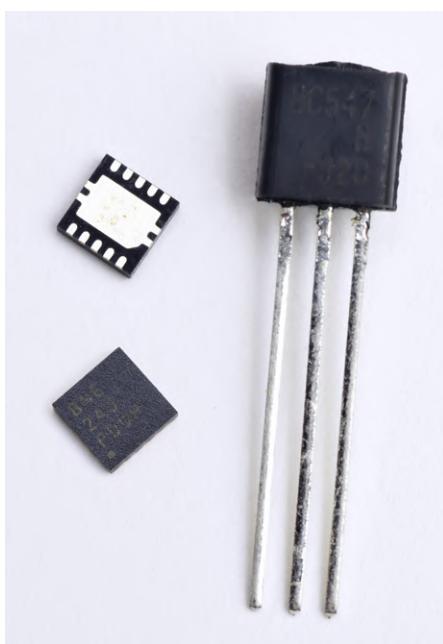
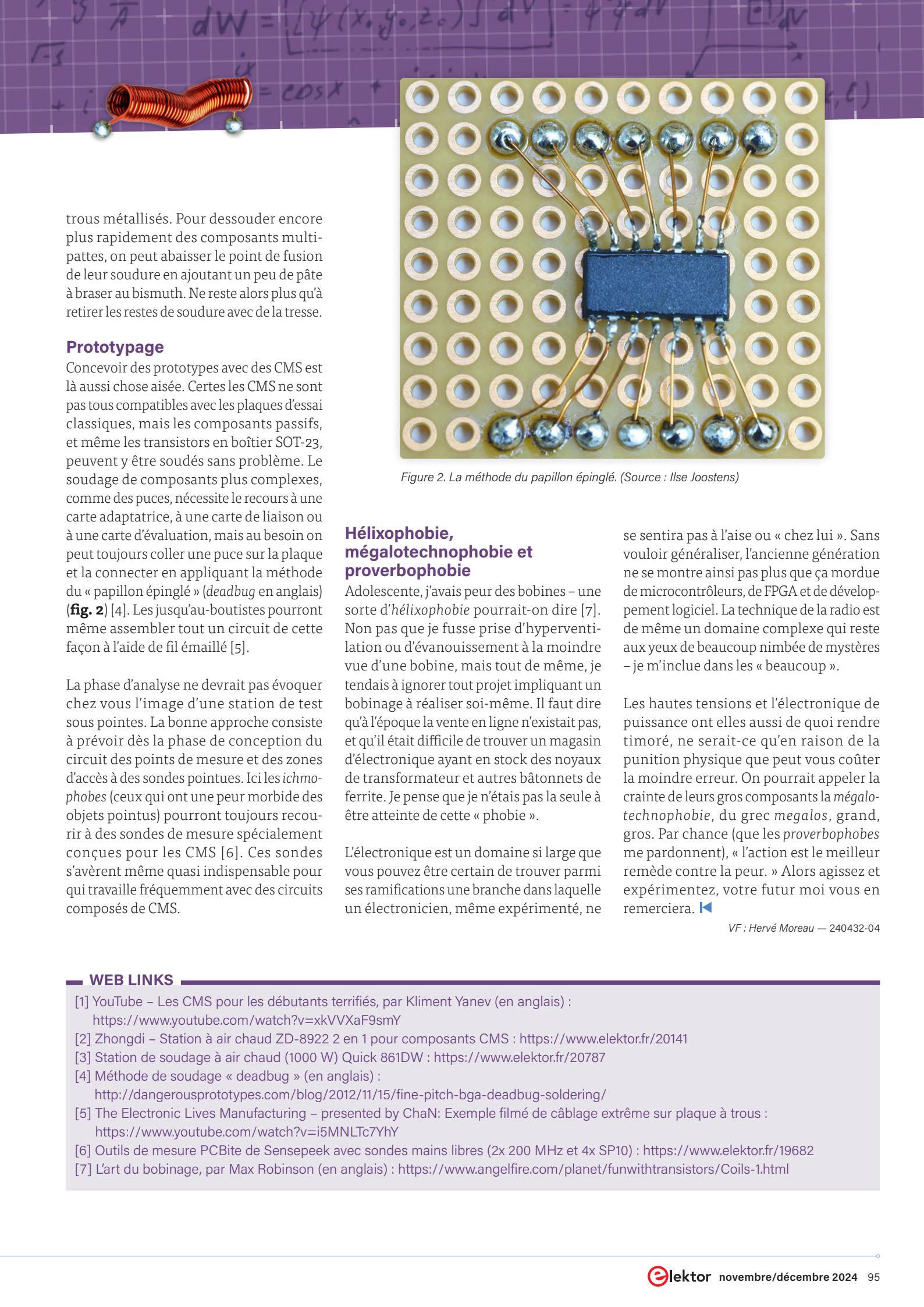


Figure 1. Une petite puce en boîtier CMS comparée à un composant familier de tous, un BC547 traversant. (Source : Ilse Joostens)



trous métallisés. Pour dessouder encore plus rapidement des composants multi-pattes, on peut abaisser le point de fusion de leur soudure en ajoutant un peu de pâte à braser au bismuth. Ne reste alors plus qu'à retirer les restes de soudure avec de la tresse.

## Prototypage

Concevoir des prototypes avec des CMS est là aussi chose aisée. Certes les CMS ne sont pas tous compatibles avec les plaques d'essai classiques, mais les composants passifs, et même les transistors en boîtier SOT-23, peuvent y être soudés sans problème. Le soudage de composants plus complexes, comme des puces, nécessite le recours à une carte adaptatrice, à une carte de liaison ou à une carte d'évaluation, mais au besoin on peut toujours coller une puce sur la plaque et la connecter en appliquant la méthode du « papillon épingle » (deadbug en anglais) (fig. 2) [4]. Les jusqu'au-boutistes pourront même assembler tout un circuit de cette façon à l'aide de fil émaillé [5].

La phase d'analyse ne devrait pas évoquer chez vous l'image d'une station de test sous pointes. La bonne approche consiste à prévoir dès la phase de conception du circuit des points de mesure et des zones d'accès à des sondes pointues. Ici les *ichmophobes* (ceux qui ont une peur morbide des objets pointus) pourront toujours recourir à des sondes de mesure spécialement conçues pour les CMS [6]. Ces sondes s'avèrent même quasi indispensable pour qui travaille fréquemment avec des circuits composés de CMS.

## Hélixophobie, mégatechnophobie et proverbophobie

Adolescente, j'avais peur des bobines – une sorte d'hélixophobie pourrait-on dire [7]. Non pas que je fusse prise d'hyperventilation ou d'évanouissement à la moindre vue d'une bobine, mais tout de même, je tendais à ignorer tout projet impliquant un bobinage à réaliser soi-même. Il faut dire qu'à l'époque la vente en ligne n'existant pas, et qu'il était difficile de trouver un magasin d'électronique ayant en stock des noyaux de transformateur et autres bâtonnets de ferrite. Je pense que je n'étais pas la seule à être atteinte de cette « phobie ».

L'électronique est un domaine si large que vous pouvez être certain de trouver parmi ses ramifications une branche dans laquelle un électronicien, même expérimenté, ne

se sentira pas à l'aise ou « chez lui ». Sans vouloir généraliser, l'ancienne génération ne se montre ainsi pas plus que ça mordue de microcontrôleurs, de FPGA et de développement logiciel. La technique de la radio est de même un domaine complexe qui reste aux yeux de beaucoup nimbée de mystères – je m'inclue dans les « beaucoup ».

Les hautes tensions et l'électronique de puissance ont elles aussi de quoi rendre timoré, ne serait-ce qu'en raison de la punition physique que peut vous coûter la moindre erreur. On pourrait appeler la crainte de leurs gros composants la *mégatechnophobie*, du grec *megalos*, grand, gros. Par chance (que les *proverbophobes* me pardonnent), « l'action est le meilleur remède contre la peur. » Alors agissez et expérimentez, votre futur moi vous en remerciera. ↗

VF : Hervé Moreau — 240432-04

## WEB LINKS

- [1] YouTube – Les CMS pour les débutants terrifiés, par Kliment Yanev (en anglais) : <https://www.youtube.com/watch?v=xkVVXaF9smY>
- [2] Zhongdi – Station à air chaud ZD-8922 2 en 1 pour composants CMS : <https://www.elektor.fr/20141>
- [3] Station de soudage à air chaud (1000 W) Quick 861DW : <https://www.elektor.fr/20787>
- [4] Méthode de soudage « deadbug » (en anglais) : <http://dangerousprototypes.com/blog/2012/11/15/fine-pitch-bga-deadbug-soldering/>
- [5] The Electronic Lives Manufacturing – presented by ChaN: Exemple filmé de câblage extrême sur plaque à trous : <https://www.youtube.com/watch?v=i5MNLTC7YhY>
- [6] Outils de mesure PCBite de Senseapeek avec sondes mains libres (2x 200 MHz et 4x SP10) : <https://www.elektor.fr/19682>
- [7] L'art du bobinage, par Max Robinson (en anglais) : <https://www.angelfire.com/planet/funwithtransistors/Coils-1.html>



# arbre de Noël 3D

circuit imprimé 3D avec un microcontrôleur 32 bits peu coûteux

André Araújo (Brésil)

Les nuits s'allongent et les vitrines étincelantes des centres commerciaux attirent le regard, tout en risquant de creuser votre budget. Pourtant, il est possible de recréer cette magie lumineuse chez soi avec des créations maison. En utilisant des composants électroniques abordables, comme un microcontrôleur à seulement 10 ¢, vous pouvez obtenir un éclat similaire sans vous ruiner. Que pensez-vous de cette approche innovante pour illuminer votre intérieur avant les fêtes de Noël ?

En octobre de l'année dernière, le projet brésilien Franzininho [1], une initiative dédiée au matériel informatique open source, a lancé un défi spécial pour Noël. L'objectif de ce concours était de concevoir des circuits imprimés basés sur un microcontrôleur abordables alimenté par une pile bouton, tout en privilégiant une faible consommation d'énergie. Un projet de base a été conçu et partagé sur le dépôt GitHub de Franzininho [2]. Les critères de base à respecter étaient les suivants :

- Microcontrôleur WCH CH32V003 RISC-V
- Pile CR2032
- Animations LED ou autres sorties graphiques
- En option : boutons, buzzers, etc.
- Circuit imprimé conçu en utilisant KiCad

Les participants étaient invités à s'inspirer du projet et à créer leurs propres versions,

idéalement en fabriquant leurs propres circuits imprimés. Mon idée consistait en un circuit imprimé conçu en forme de sapin de Noël, assemblé de manière transversale pour former une structure 3D. Ce projet peut faire office d'objet de décoration ou d'ornement à accrocher sur un sapin.

## Microcontrôleur

Avec les avancées dans le domaine des semi-conducteurs, les fabricants de microcontrôleurs introduisent désormais des modèles 32 bits, plus récentes et plus abordables, qui rivalisent avec et remplacent souvent les anciens microcontrôleurs 8 bits. Les puces basées sur le cœur ARM Cortex-M0+, telles que la série STM32C0 de STMicroelectronics, les séries LPC800 et MCX C de NXP, ou le Raspberry Pi RP2040, sont emblématiques de cette évolution WCH, un fabricant chinois connu pour

ses émetteurs-récepteurs USB/UART WCH340 [3], a récemment introduit une nouvelle gamme de microcontrôleurs RISC-V, la série CH32V. Ces microcontrôleurs sont extrêmement abordables, certains modèles étant proposés à seulement 10 cents - ce qui leur a valu le nom de « 10-cent MCU ». Plusieurs membres de la communauté s'étaient déjà penchés sur ce nouveau microcontrôleur, faisant du défi de Noël une occasion de rassembler les passionnés autour d'un objectif commun : approfondir leur compréhension de ces puces et échanger leurs connaissances. Un élément crucial du défi était le matériel. Bien que la majorité des personnes impliquées dans la conception de systèmes embarqués se concentrent sur le logiciel, laissant la conception matérielle aux mains de quelques passionnés, l'accès à des logiciels de CAO performants, libres et gratuits, tels que KiCad [4] et EasyEDA [5], et à des services

de fabrication et d'assemblage de circuits imprimés abordables rend ce défi accessible. Il n'est pas nécessaire d'être un expert doté de compétences approfondies ou de moyens financiers conséquents pour y participer.

## Mon projet

Les cartes de mon projet comportent uniquement deux couches de signaux, ce requiert seulement des connaissances de base en matière de conception de circuits imprimés. Pour éviter les collisions de composants lors de l'assemblage final, j'ai utilisé un modèle papier pour vérifier les interférences et visualiser la disposition avant de procéder à la fabrication. Une méthode simple pour ce projet 3D consiste à imprimer les faces avant et arrière du circuit imprimé à l'échelle 1:1, les coller sur un morceau de carton fin, découper les contours et puis assembler les deux parties. Cela garantit l'exactitude des emplacements et du positionnement des composants. J'ai développé le logiciel en C en utilisant la couche d'abstraction matérielle (HAL) fournie par WCH, incluse dans MounRiver Studio [6]. Bien que la documentation relative à cette couche HAL soit peu fournie, l'archive *CH32V003EVT.ZIP* [7], disponible sur le site web de WCH contient des exemples pour les périphériques du microcontrôleur, qui sont suffisants pour comprendre les bases de la couche HAL et du microcontrôleur. La fiche technique du microcontrôleur [8] et le manuel de référence [9] sont également utiles.

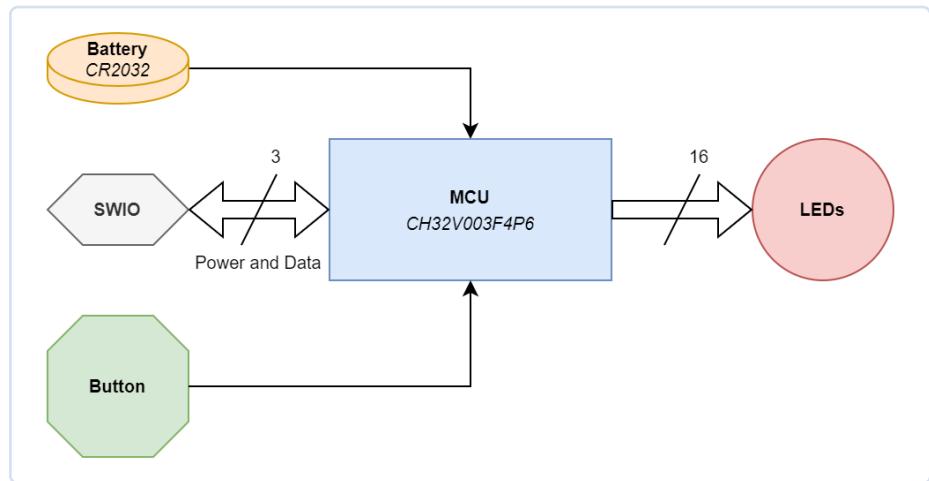


Figure 1. Schéma fonctionnel de l'arbre de Noël

Deux techniques logicielles sont importantes : le mode veille et le fonctionnement des LED avec un PWM logiciel. Ceci est crucial car seules certaines broches prennent en charge la génération PWM matérielle. Ces deux techniques contribuent à minimiser la consommation d'énergie.

## Schéma fonctionnel

Le matériel est divisé en plusieurs parties principales (voir **figure 1**) :

➤ **Microcontrôleur** : Le composant clé est le microcontrôleur CH32V003F4P6 [10] avec une fréquence d'horloge allant jusqu'à 48 MHz, 16 KB de mémoire flash, 2 KO de RAM, 18 lignes E/S, deux temporiseurs 16 bits, un temporiseur chien de garde, un ADC 10 bits à 8 canaux, un USART, un I<sup>2</sup>C et un SPI. L'alimentation est comprise entre 2,7 à 5,5 V. La puce est disponible en boîtier TSSOP20.

➤ **Pile** : Le PCB dispose d'un connecteur pour les piles CR2032 pour fournir 3 V pour l'alimentation.

➤ **Connexions** : Un connecteur à trois pôles permet la connexion de l'alimentation externe et fournit une communication bidirectionnelle pour la programmation et le débogage.

➤ **Interface utilisateur** : Un bouton utilisateur permet de modifier les animations ou de mettre l'appareil en veille.

➤ **Affichage** : 16 LED sont connectées au microcontrôleur, chacune à sa propre broche, permettant de nombreuses animations.

## Matériel

Le montage est simple : chaque LED est connectée à une broche GPIO individuelle via des résistances de limitation de courant. L'alimentation fournie par la pile est directement reliée au microcontrôleur, qui reste en

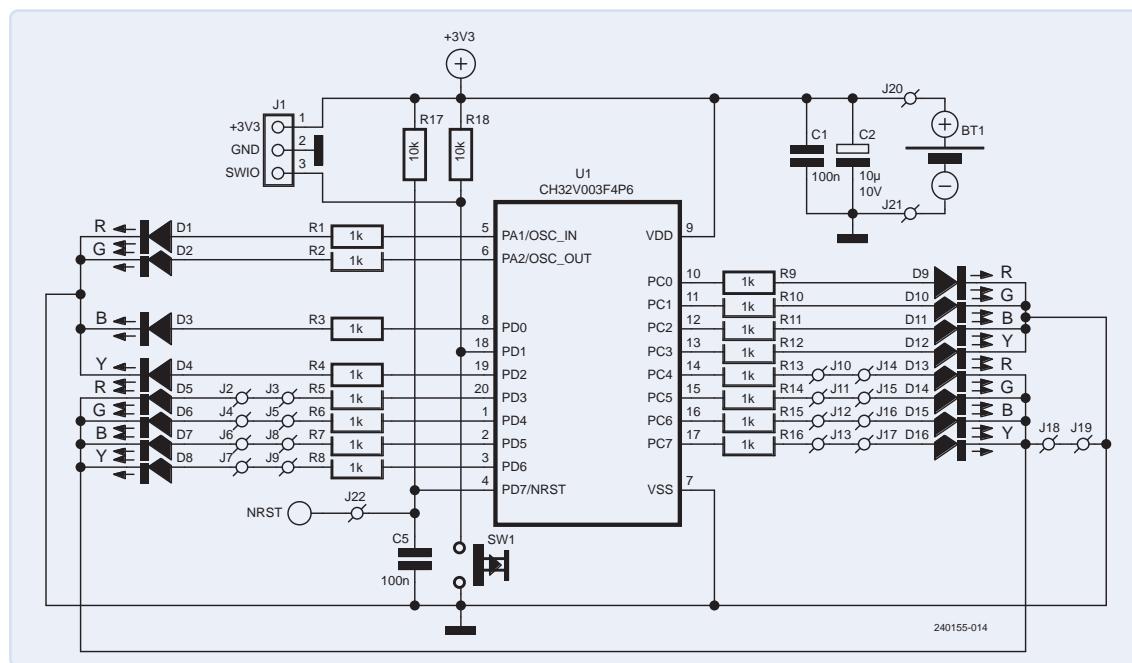


Figure 2. Le schéma relativement simple de l'arbre de Noël.

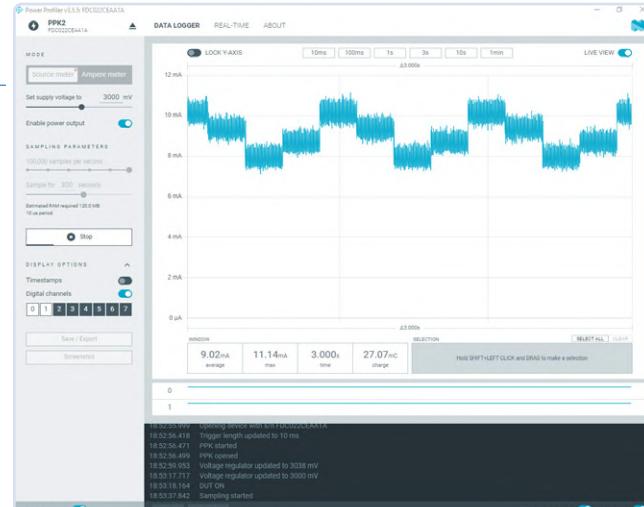




Figure 5. Trois arbres de Noël prêts. L'un d'eux brille déjà.

CMS déjà assemblés - à l'exception du microcontrôleur, en rupture de stock. À réception, j'ai soudé le microcontrôleur et les composants traversants (LED et connecteur à trois pôles) et j'ai finalement assemblé les deux moitiés. La **figure 5** montre trois arbres de Noël entièrement fonctionnels.

Pour évaluer la consommation d'énergie de l'appareil final, j'ai utilisé un Nordic Power Profiler Kit II. Cet outil de test est capable d'alimenter l'appareil avec une tension réglable et également de mesurer le courant consommé par l'appareil. La figure 5 montre également la configuration du test. Les cartes ont été testées avec une alimentation de 3 V fournie par l'outil de test (sans pile durant les tests). L'énergie consommée est principalement due aux LED. La capture d'écran de la **figure 6** montre que l'arbre de Noël consomme en moyenne 9 mA, ce qui signifie qu'une pile CR2032 typique durerait environ 24 heures. Lorsque le microcontrôleur passe en mode veille, toutes les LED s'éteignent et le courant consommé chute à une moyenne d'environ 9  $\mu$ A, rendant inutile un interrupteur d'alimentation puisqu'une pile CR2032 peut durer théoriquement jusqu'à 25 000 heures, soit environ 2,8 ans, en mode veille ! Il serait peut-être judicieux d'utiliser des LED orange au lieu des vertes pour un meilleur contraste avec le circuit imprimé vert.



### Nouveau projet avec cette puce

Quatre modes d'animation ne sont qu'un début. Ce projet a permis à la communauté Franzininho, et maintenant à vous, de se familiariser avec ce nouveau microcontrôleur. Forts de cette première expérience collective avec la série CH32V, les membres de la communauté sont désormais impatients de se lancer dans un nouveau projet utilisant cette puce. Les préparatifs sont en cours et le lancement est prévu pour la fin de l'année ! 

240155-04

Figure 6. Capture d'écran du relevé de puissance fourni par Nordic Power Profiler Kit II.



### À propos de l'auteur

André Araújo a obtenu une maîtrise en ingénierie mécatronique à l'École polytechnique de l'Université de São Paulo et possède près de quinze ans d'expérience dans le développement d'équipements médicaux. Il occupe actuellement le poste de directeur de l'ingénierie chez J.G. Moriya. Par ailleurs, il est mentor pour le cours « Making Embedded Systems », dispensé par Elecia White sur la plateforme Classpert (<https://tinyurl.com/yc7us3ja>). André partage également des projets personnels sur son profil Instagram ([www.instagram.com/mechatronixlab](http://www.instagram.com/mechatronixlab)).



### Produits

- **ZD-8961-A Station de soudage à température contrôlée**  
[www.elektor.fr/20536](http://www.elektor.fr/20536)
- **Whadda WSPXL103 Poly Reindeer XL Soldering & Programming Kit (incl. Arduino Nano Every)**  
[www.elektor.fr/20325](http://www.elektor.fr/20325)

### Questions ou commentaires ?

Contactez l'auteur via LinkedIn ([www.linkedin.com/in/andremdaraujo](http://www.linkedin.com/in/andremdaraujo)) ou contacter Elektor ([redaction@elektor.fr](mailto:redaction@elektor.fr)).

### LIENS

- [1] Le projet Franzininho : <https://franzininho.com.br>
- [2] Page de Franzininho sur GitHub : <https://github.com/Franzininho/Projeto-Natal-2023>
- [3] Émetteurs-récepteurs WCH340 USB/UART : <https://www.wch-ic.com/products/CH340.html>
- [4] KiCad : <https://www.kicad.org>
- [5] EasyEDA : <https://www.easyeda.com>
- [6] MounRiver Studio : <http://www.mounriver.com>
- [7] Archive de CH32V003EVT : <https://tinyurl.com/49sfjzmr>
- [8] Fiche technique du CH32V003 : <https://tinyurl.com/7yzy5jab>
- [9] CH32V003 reference manual: <https://tinyurl.com/bde8tvmk>
- [10] Microcontrôleur CH32V003F4P6 : <https://www.wch-ic.com/products/CH32V003.html>
- [11] WCH-Link : <https://www.wch-ic.com/products/WCH-Link.html>
- [12] Nordic Power Profiler Kit : <https://tinyurl.com/3urhseh5>
- [13] Fichiers du projet sur GitHub : <https://tinyurl.com/54fdyuua>
- [14] Ce projet sur Elektor Labs : <https://www.elektormagazine.fr/labs/3d-christmas-tree-pcb>
- [15] WCH-Link : <https://www.wch-ic.com/products/WCH-Link.html>



# démarrer en électronique...

...on continue avec l'ampli-op !

**Eric Bogers (Elektor)**

Nous avons terminé l'épisode précédent en explorant deux générateurs de signaux basés sur des ampli-op : le générateur de signaux carrés et le générateur de signaux triangulaires. Dans ce dernier volet de l'année de notre série « démarrer en électronique... », nous examinerons, entre autres, le générateur d'ondes sinusoïdales et quelques multivibrateurs.

## Générateur d'ondes sinusoïdales

Une vibration sinusoïdale est souvent considérée la plus « naturelle » de toutes les oscillations. Toutefois dans l'électronique pratique, il est en fait assez difficile de générer une onde sinusoïdale - en particulier lorsqu'il est nécessaire de minimiser la distorsion.

La **figure 1** montre un oscillateur dit à pont de Wien ; il génère une onde sinusoïdale dont la fréquence est donnée par :

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

Le trimpot règle le gain général. Ce réglage est assez critique : si le gain total est inférieur à 1, l'oscillateur ne se déclenchera pas. À l'inverse, si le gain est supérieur à 1, le circuit sera amené à saturation. Il en résulte un écrêtage du signal et, par conséquent, l'introduction d'une distorsion.

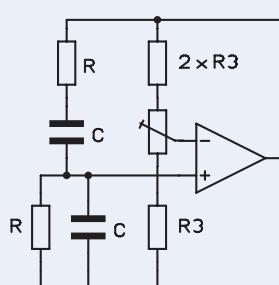


Figure 1. Générateur sinusoïdal.

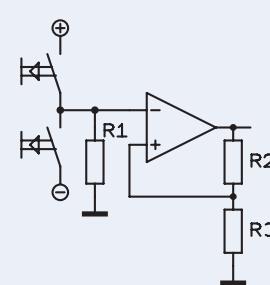


Figure 2. Multivibrateur bistable.

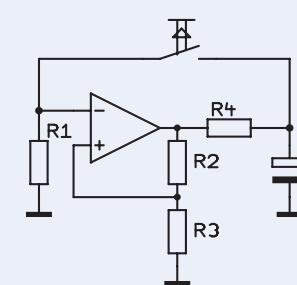


Figure 3. Bascule avec un seul bouton.

Il existe plusieurs méthodes pour stabiliser cet oscillateur, chacune présentant ses propres désavantages. La stabilisation à l'aide d'une résistance CTP (comme une petite lampe à incandescence) ne se révèle pas efficace pour maintenir une amplitude constante. C'est pourquoi nous choisissons de laisser le montage de la figure 1 inchangé et d'accepter une distorsion de 1%.

Lorsque nous avons besoin d'une distorsion plus faible, nous pouvons supprimer les harmoniques à la sortie en utilisant un filtre passe-haut ou passe-bande. Une autre approche consiste à générer l'onde sinusoïdale numériquement, puis à la convertir en analogique en utilisant un convertisseur N/A. La stabilité de la fréquence et de l'amplitude ainsi que le faible niveau de distorsion que l'on peut obtenir de cette manière ne pourront jamais être atteints avec un circuit analogique.

## Multivibrateur bistable

Nous avons précédemment abordé le multivibrateur bistable (ou la bascule), réalisé avec des transistors discrets. Cependant, cette fonction peut également être réalisée avec un ampli-op, comme le montre la **figure 2**.

Les résistances R2 et R3 assurent à l'ampli-op une rétroaction positive similaire à celle utilisée dans le générateur d'ondes carrées présenté dans l'épisode précédent. Le rapport de division de la tension de sortie n'est pas crucial - ce circuit est capable de fonctionner correctement avec presque n'importe quel rapport.

La résistance R1 relie l'entrée inverseuse à la masse. Lorsque l'on appuie sur l'un des deux boutons-poussoirs, l'entrée inverseuse est connectée à la tension d'alimentation positive ou négative et la sortie de l'ampli-op passe au potentiel opposé. Cette nouvelle valeur reste maintenue, même après le relâchement du bouton-poussoir.

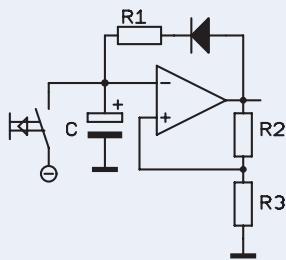


Figure 4. Multivibrateur monostable.

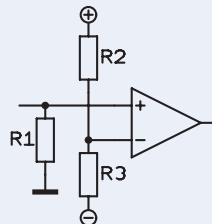


Figure 5. Un comparateur ordinaire.

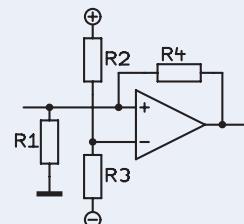


Figure 6. Trigger de Schmitt.

La **figure 3** illustre un multivibrateur bistable qui fonctionne avec un seul bouton-poussoir. Supposons que la sortie soit positive : le condensateur se charge alors via la résistance R4 au même potentiel positif. Lorsque nous appuyons sur le bouton, ce potentiel est alors connecté à l'entrée inverseuse de l'amplificateur, qui devient alors plus élevée que l'entrée non inverseuse. La conséquence est que la sortie de l'amplificateur s'inverse et devient négative - après quoi le condensateur est chargé au potentiel négatif.

Le comportement du circuit lorsque le bouton est maintenu enfoncé peut être réglé avec des diviseurs de tension R2/R3 et R4/R1. Lorsque la tension aux bornes de R1 est inférieure à celle aux bornes de R3, maintenir le bouton pressé n'affectera pas l'état de la sortie, qui restera inchangé. En revanche, si la tension aux bornes de R1 est supérieure, le circuit se comporte comme un multivibrateur astable et la sortie oscille tant que le bouton est maintenu enfoncé.

### Multivibrateur monostable

Il est également possible de construire un multivibrateur monostable (one-shot) en utilisant un ampli-op. Le montage de la **figure 4** est une adaptation du multivibrateur astable (générateur d'ondes carrées). La diode assure que le condensateur ne puisse être chargé que via la sortie et empêche sa décharge. Ceci est réalisé avec un bouton-poussoir.

### Comparateur

Un comparateur est un montage qui compare deux tensions et qui, dans la plupart des cas, devient actif lorsqu'une tension dépasse ou descend sous une valeur seuil fixée. La tension de référence (la valeur seuil) est réglée avec R2 et R3 (voir **figure 5**). Lorsque la tension sur l'entrée non inverseuse est supérieure à la tension de référence, alors la sortie de l'ampli-op est positive - et dans l'autre cas, elle est négative.

Dans les applications « classiques », un comparateur ordinaire suffit souvent. Cependant, il existe des applications où la tension d'entrée est très proche de la tension de référence et où du bruit peut également être présent. Il est alors possible que l'amplificateur configuré comme un simple comparateur continue à osciller entre le positif et le négatif. Il s'agit généralement d'une situation indésirable qui peut être évitée en utilisant ce que l'on appelle un « trigger de Schmitt ».

### Trigger de Schmitt

Le Trigger de Schmitt (**figure 6**) est similaire à un comparateur, mais se distingue par l'ajout d'une résistance de rétroaction positive. Ce montage ne doit pas être piloté par une source à faible impédance ; si c'est le cas, il est nécessaire d'ajouter une résistance en série avec l'entrée.

La résistance de rétroaction positive crée une hystérésis : la tension à laquelle la sortie devient positive est plus élevée que la tension à

laquelle la sortie redevient négative. La valeur de l'hystérésis doit être calculée pour être beaucoup plus élevée que le bruit prévu sur le signal d'entrée.

### Montages de filtrage

L'ensemble de la gamme audio s'étend sur trois décades, soit une plage de fréquences allant de 20 Hz à 20 kHz. Avec un peu d'effort, un haut-parleur peut reproduire assez bien une décade. Ainsi, pour obtenir une qualité audio acceptable, toute la gamme audio doit être divisée en parties distinctes qui sont ensuite reproduites par différents haut-parleurs (spécialisés).

Il est certainement possible de concevoir les filtres cross-over nécessaires en utilisant des montages de filtres passifs, comme ceux que nous avons étudiés dans ce cours d'électronique de base. Toutefois, ces filtres passifs présentent quelques inconvénients : à des ordres plus élevés, les pertes dans les composants ( principalement la résistance du fil d'enroulement en cuivre qui constitue les inductances) deviennent de plus en plus problématiques. L'amortissement des haut-parleurs est nettement réduit, et les « grosses » inductances et condensateurs sont lourds et coûteux. Il est donc préférable de diviser cette gamme de fréquences en différentes plages avant l'amplification ; on parle alors d'un filtre répartiteur actif. Avec les filtres actifs, les pertes des composants peuvent être compensées facilement grâce à un simple étage d'amplification. Généralement, ces circuits ne nécessitent pas l'utilisation d'inductances et sont construits exclusivement à partir de réseaux RC, soit des combinaisons judicieuses de résistances et de condensateurs. Vous êtes curieux d'en apprendre plus ? Il vous faudra patienter jusqu'à la publication de notre numéro de janvier/février 2025, où nous explorerons en détail le monde fascinant des filtres cross-over actifs. ↗

240431-04

*Note de la rédaction : la série d'articles « démarrer en électronique » est basée sur le livre « Basiskurs Elektronik » de Michael Ebner, publié par Elektor.*

### Questions ou commentaires ?

Contactez Elektor (redaction@elektor.fr).



### Produits

➤ Livre « L'électronique pour les débutants », Rémy Mallard  
[www.elektor.fr/15662](http://www.elektor.fr/15662)



# nœud de capteurs autonome (mise à jour du projet #1)

Réduire la consommation électrique en veille avec un RTC externe et un commutateur d'alimentation

Saad Imtiaz (Elektor)

Dans l'article précédent, nous avons exploré le développement d'un nœud de capteurs autonome dédiée à la collecte de données environnementales. Bien que le prototype initial ait été fonctionnel, nous avons constaté que la consommation d'énergie, surtout en mode veille, nécessitait des améliorations significatives. Dans cette mise à jour, nous expliquons comment l'intégration de la RTC du MAX31334, doté d'un commutateur d'alimentation intégré permet d'optimiser la consommation d'énergie et de prolonger la durée de vie de la batterie.

Lors de la conception initiale du nœud de capteur LoRaWAN [1], l'objectif était de développer un système autonome alimenté par l'énergie solaire et capable de transmettre des données via LoRaWAN, pour la surveillance environnementale à distance. Bien que le système ait démontré son efficacité, l'un des principaux défis rencontrés concerne l'optimisation de sa consommation d'énergie, notamment durant les périodes d'inactivité.

Comme mentionné dans notre premier article, la consommation d'énergie du système en mode veille atteignait encore 4,32 mA. Bien que cela représente une amélioration par rapport à la consommation en mode actif, une réduction supplémentaire de la consommation en mode veille prolongerait significativement l'autonomie du système sur une seule charge de batterie sans apport solaire. Cela sera essentiel

pour les déploiements à distance, où la lumière du soleil n'est pas disponible tout au long du mois.

Une méthode pour atteindre cet objectif consiste à intégrer une horloge en temps réel (RTC) externe avec un circuit de verrouillage de l'alimentation. Ceci permet de couper complètement l'alimentation du système lorsqu'il n'est pas en usage. Ainsi, le système consomme de l'énergie uniquement lorsqu'il est nécessaire de prendre des mesures ou de transmettre des données.

Après avoir examiné plusieurs options, l'horloge en temps réel ultrabasse consommation MAX31334 d'Analog Devices [2] s'est distinguée par sa capacité unique à gérer la mesure du temps avec une consommation d'énergie minimale et par son commutateur d'alimentation intégré, qui peut contrôler automatiquement l'état d'alimentation du système.

Dans cette mise à jour du projet, nous nous concentrerons sur les améliorations de l'efficacité énergétique et le développement d'un nouveau module, qui intègre la RTC MAX31334 avec son commutateur d'alimentation et quelques connecteurs.

## Pourquoi avons-nous choisi le MAX31334 ?

Ce choix s'explique par l'efficacité énergétique exceptionnelle du MAX31334 et sa polyvalence, le rendant particulièrement adapté pour les systèmes à faible consommation d'énergie et alimentés par batterie. Voici pourquoi il s'est démarqué :

### Consommation d'énergie ultra-faible

Avec un appel de courant de seulement 70 nA en mode *timekeeping*, le MAX31334 est l'un des RTC les plus économies en énergie disponibles, réduisant significativement l'épuisement de la batterie lors des périodes d'inactivité. Il est donc parfait pour les applications IoT distantes à long terme où les économies d'énergie sont une priorité.

### Commutateur d'alimentation intégré

Le MAX31334 dispose d'un commutateur d'alimentation intégré de 500 mA, qui contrôle l'alimentation de l'ESP32-C3 et des capteurs.

Il permet au système de couper complètement l'alimentation pendant les périodes d'inactivité, réduisant l'utilisation d'énergie à presque zéro et prolongeant davantage l'autonomie de la batterie.

### Chargeur de secours interne

Le chargeur de secours intégré peut charger directement un supercondensateur. Vous trouverez plus d'informations sur ce composant dans l'encadré « **Pourquoi est-il indispensable d'avoir une alimentation de secours pour une RTC ?** ». Cela simplifie le circuit en éliminant le besoin de composants de charge externes. Il est possible d'ajuster les paramètres du chargeur via un registre afin d'assurer une charge sûre et efficace, et de fournir une source d'alimentation de secours fiable.

### Timers programmables

Les alarmes et les timers programmables permettent au MAX31334 de réactiver le système à des intervalles prédefinis. Les deux broches d'interruption (INT1 et INT2) offrent une grande flexibilité pour les événements externes, ce qui rend le module très adaptable à diverses applications.

### Large plage de tension et rentabilité

Le MAX31334 fonctionne sur une large plage de tensions, allant de 1,1 V à 5,5 V, ce qui lui permet de s'adapter à différentes sources d'alimentation. Sa combinaison de fonctions de chronométrage, de contrôle de l'alimentation et de charge dans un seul circuit intégré réduit le nombre de composants et les coûts de conception globaux, ce qui en fait une solution rentable. En combinant efficacement ces fonctions, le MAX31334 non seulement répond aux exigences strictes d'effi-

### Pourquoi est-il indispensable d'avoir une alimentation de secours pour une RTC ?

Un supercondensateur est utilisé comme source d'alimentation de secours pour la RTC MAX31334 pour garantir la continuité de la mesure du temps durant les interruptions de courant ou lorsque la batterie principale se trouve déchargée. Ceci est essentiel pour préserver l'intégrité des événements programmés et pour assurer une traçabilité précise du temps dans des applications de longue durée, telles que les réseaux de capteurs ou les appareils IoT distants. Le supercondensateur fournit une alimentation temporaire à la RTC, prévenant ainsi la perte de données en cas de mise en veille prolongée ou de coupure d'électricité. Grâce à son chargeur intégré, le MAX31334 recharge efficacement le supercondensateur sans nécessiter de composants externes additionnels. En maintenant la RTC fonctionnelle durant ces interruptions, le système peut continuer à opérer sans interruption et reprendre ses activités normales de façon transparente dès le rétablissement de l'alimentation principale.

cité énergétique mais simplifie également le circuit tout en offrant un contrôle robuste de la gestion de l'alimentation.

### Schéma

Le cœur du circuit (figure 1) est le MAX31334 (IC1), qui assure simultanément les fonctions de chronométrage et de gestion de l'alimentation. Le supercondensateur (C2) est connecté directement à la RTC et est chargé via le chargeur interne du MAX31334, fournissant une alimentation de secours. Cette configuration garantit que la RTC reste opérationnelle même en cas de déconnexion de la batterie principale, préservant ainsi l'intégrité du chronométrage et permettant au système de reprendre son activité de manière fluide une fois l'alimentation principale rétablie.

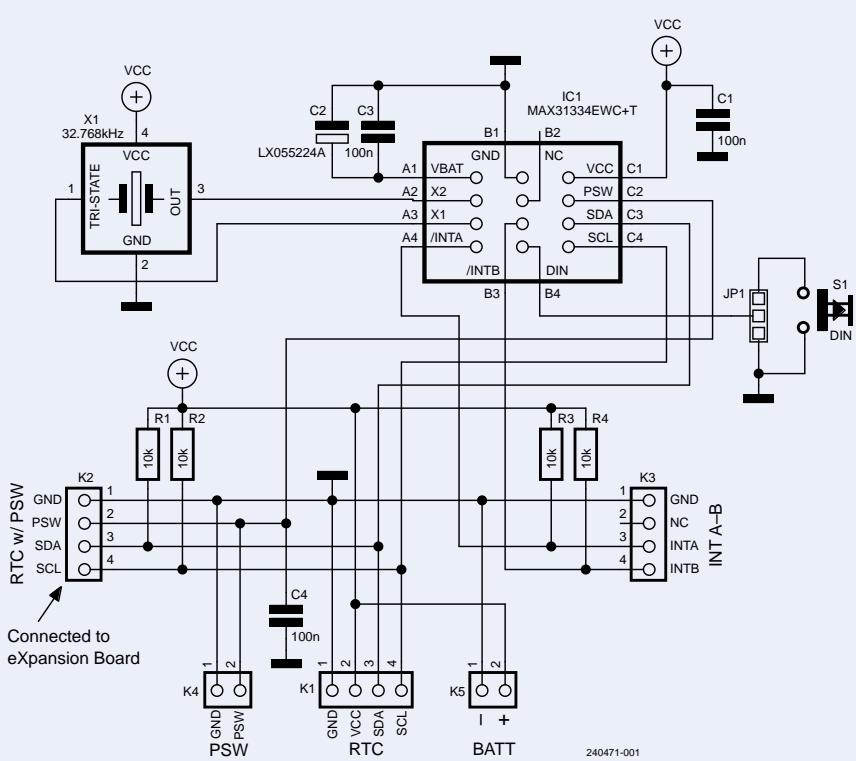


Figure 1.  
Schéma du module

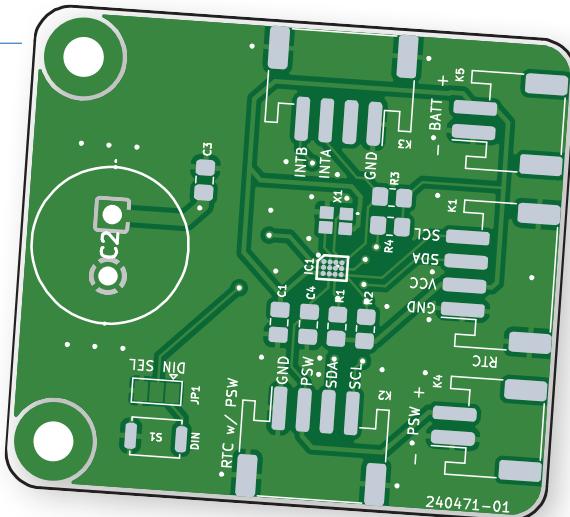


Figure 2. Disposition du circuit imprimé du module.

Le connecteur K5 sert d'entrée pour la batterie principale, alimentant l'ensemble du système, y compris la RTC et les composants alimentés connectés au commutateur d'alimentation. Le connecteur K1 facilite la communication I<sup>2</sup>C entre la RTC et un microcontrôleur principal. Grâce à cette interface, le microcontrôleur peut récupérer les données de chronométrage et contrôler le commutateur d'alimentation (PSW) intégré dans la RTC. Ce commutateur joue un rôle crucial dans la gestion de l'état d'alimentation de l'ensemble du système. Il est important de noter que chaque carte de microcontrôleur connectée ici est alimentée en continu via K1 et K5.

Pour optimiser la consommation d'énergie d'une carte en l'alimentant de manière intermittente, vous devez la brancher aux connecteurs K2 ou K4. Ces connecteurs permettent de contrôler l'alimentation d'une carte fille ou d'un module externe, permettant au MAX31334 d'activer ou désactiver des dispositifs spécifiques selon les exigences du système. Le connecteur K2 donne également accès au bus I<sup>2</sup>C.

Le connecteur K3 donne accès aux deux broches d'interruption (INT1 et INT2), qui sont configurées avec des résistances de tirage vers le haut R4 et R5. Ces interruptions peuvent être utilisées pour réveiller le système à des intervalles prédéterminés ou en réponse à des événements externes, augmentant ainsi la flexibilité opérationnelle du système en termes de gestion de l'alimentation.

De plus, le cavalier JP1 et le bouton S1 permettent de contrôler la broche DIN avec un trigger de Schmitt. Cela vous permet de contrôler manuellement l'état d'alimentation du système. Si cette fonctionnalité n'est pas requise, il est possible de désactiver cette option en connectant à la masse la broche au niveau de JP1.

Globalement, le schéma est conçu pour fournir une gestion efficace de l'alimentation, en tirant parti des fonctionnalités du MAX31334 pour réguler l'alimentation du système et charger le supercondensateur sans nécessiter de composants externes supplémentaires. La simplicité de ce circuit le rend particulièrement adaptable à diverses applications I<sup>o</sup>O et dispositifs basés sur des capteurs.

### Conception du circuit imprimé

Le circuit imprimé du module est une carte 40 mm x 45 mm à deux couches (figure 2), conçue pour assurer la polyvalence et la gestion efficace de l'énergie. La carte comporte des connecteurs Grove pour améliorer la compatibilité avec une large gamme de capteurs, de modules et de microcontrôleurs. Le connecteur K1 assure la communication I<sup>2</sup>C avec le microcontrôleur principal, tandis que les connec-

teurs K2 et K4 permettent de contrôler l'alimentation des cartes filles ou des modules externes. Le connecteur K5 alimente le système, et le supercondensateur (C2) est positionné au centre pour fournir une alimentation de secours. La figure 3 présente le rendu 3D de l'avant et de l'arrière de la carte de circuit imprimé.

Nous avons prévu des trous de montage pour une installation sécurisée du boîtier, ce qui rend le module robuste et adaptable à différents projets. Les connecteurs Grove assurent une intégration rapide et facile avec d'autres cartes de développement, ce qui ajoute à la flexibilité du module.

### Prochaines étapes : essais et validation

Bien que le module ait été conçu et que le schéma et le circuit imprimé soient finalisés, l'étape suivante consiste à effectuer des essais en conditions réelles. Une fois le matériel assemblé, nous effectuerons des tests approfondis de consommation d'énergie avec le Joulescope JS200 pour vérifier si le module répond aux objectifs de conception, notamment la réduction de la consommation d'énergie en mode veille à des niveaux proches de zéro. De plus, la fiabilité du système sera testée sur de longues périodes afin de s'assurer que la batterie de secours et le commutateur d'alimentation fonctionnent comme prévu. ↗

240471-04

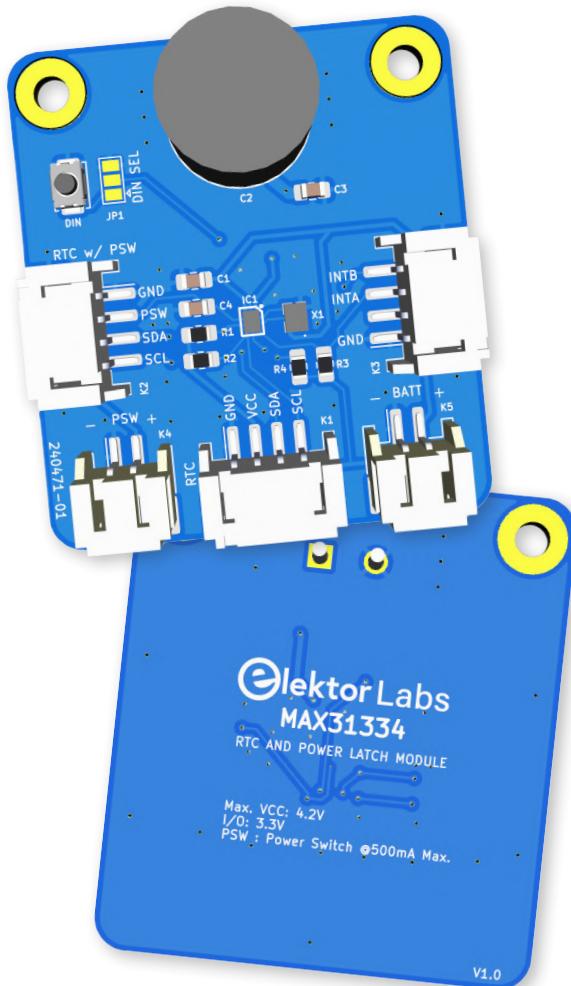


Figure 3. Rendu 3D du circuit imprimé.



## À propos de l'auteur

Saad Imtiaz, ingénieur senior chez Elektor, est spécialisé en mécatronique et bénéficie d'une expertise approfondie dans les systèmes embarqués et le développement de produits. Tout au long de sa carrière, il a collaboré avec une diversité d'entreprises, allant des startups innovantes aux multinationales renommées, en menant des projets de prototypage et de développement tournés vers l'avenir. Fort d'une riche expérience acquise dans l'industrie aéronautique et en tant que dirigeant d'une startup technologique Saad apporte à Elektor un mélange unique d'expertise technique et d'esprit d'entreprise. Il contribue au développement de projets dans les domaines du logiciel et du matériel.

## Questions ou commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur (saad.imtiaz@elektor.com), ou contactez Elektor (redaction@elektor.fr).



## Produits

- **Seeed Studio XIAO ESP32C3**  
[www.elektor.fr/20265](http://www.elektor.fr/20265)
- **Seeed Studio Grove SCD30 CO<sub>2</sub>**  
[www.elektor.fr/20012](http://www.elektor.fr/20012)
- **Seeed Studio LoRa-E5 STM32WLE5JC**  
[www.elektor.fr/19956](http://www.elektor.fr/19956)
- **Seeed Studio Panneau solaire (3 W)**  
[www.elektor.fr/19131](http://www.elektor.fr/19131)
- **Waveshare Module de gestion d'alimentation solaire**  
[www.elektor.fr/20488](http://www.elektor.fr/20488)
- **Dragino LoRa/LoRaWAN Kit IoT Kit (EU868)**  
[www.elektor.fr/20775](http://www.elektor.fr/20775)

## LIENS

[1] «Un nœud de capteurs autonome», Saad Imtiaz, Elektor 9-10/2024 : <https://elektormagazine.fr/240354-04>

[2] MAX31334 Ultra-Low-Power Real Time Clock with Integrated Power Switch : <https://www.analog.com/en/products/max31334.html>

**PCBWay**

## PCBWay – PCB Flexibles & Rrigides-Flex à des prix imbattables

Obtenez des PCB flexibles et rigides-flex de haute qualité à partir de seulement **46.74 \$**

- 1-16 couches
- 100% test électrique
- Très personnalisable

Rendez-nous visite au salon electronica 2024, Stand **A1.163**

wwwpcbway.com

service@pcbway.com

PCBWay booth at electronica 2024.

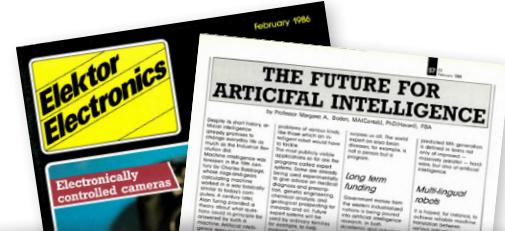


# 2024 l'odyssée de l'IA

Un regard sur l'avenir

Brian Tristam Williams (Elektor)

En moins de deux ans, l'IA a pris d'assaut le monde de l'électronique et du codage. Des outils avancés de conception de circuits imprimés à l'automatisation des micrologiciels pilotée par l'IA, l'industrie a connu des changements rapides. Les ingénieurs et les amateurs ont désormais accès à des systèmes plus intelligents et plus efficaces qui réduisent le temps de développement et améliorent les performances. Le rôle de l'IA dans les systèmes embarqués, le traitement en temps réel à la périphérie et même la conception de puces façonne l'avenir de l'électronique d'une manière que peu de gens auraient pu prédire il y a seulement un an.



Un article paru en février 1986 dans *Elektor Electronics* commençait ainsi :

« Malgré sa courte histoire, l'intelligence artificielle promet déjà de changer la vie quotidienne autant que l'a fait la révolution industrielle. L'intelligence artificielle a été prévue au XIXe siècle par Charles Babbage, dont la machine à calculer à engrenages fonctionnait d'une manière fondamentalement similaire aux ordinateurs d'aujourd'hui. Un siècle plus tard, Alan Turing a élaboré une théorie sur les questions auxquelles une telle machine pourrait en principe répondre. L'intelligence artificielle est née des travaux sur les ordinateurs numériques pendant la Seconde Guerre mondiale et a reçu son nom officiel en 1956. Depuis les premiers efforts déployés au milieu des années 1950, elle a connu quelques succès notables. Les ordinateurs d'aujourd'hui sont capables d'effectuer certaines tâches qui ne sont normalement accomplies que par notre esprit, mais seulement dans une mesure très limitée. Par exemple, certains programmes peuvent répondre de manière sensée à des requêtes ou à des déclarations exprimées dans des langues naturelles telles que l'allemand ou l'anglais, ce qui signifie que les gens ordinaires n'ont pas besoin d'apprendre un langage de programmation spécial avant de pouvoir interagir avec eux ». [1]

36 ans plus tard, un véritable bouleversement s'est produit lorsque OpenAI a lancé le modèle de chat génératif qui a attiré l'attention, GPT-3.5 (figure 1), en novembre 2022.

Cela a choqué beaucoup de gens et suscité des inquiétudes, certains dirigeants de l'industrie et du secteur public appelant même à un moratoire de six mois sur la poursuite du développement de l'IA. Cela n'a jamais été le cas et, en grande partie, les conséquences négatives ont été exagérées.

Cependant, des personnes, des secteurs et des industries ont été touchés, pour le meilleur ou pour le pire. Elle a eu des répercussions sur l'emploi, a nui à certains, et a donné à d'autres l'occasion d'accroître leur productivité et de libérer des ressources pour une production plus créative.

Avant de jeter un coup d'œil sur le monde en général, examinons l'impact sur nos industries préférées.

### L'IA dans l'électronique et le codage

L'intelligence artificielle a révolutionné l'électronique et le développement de logiciels, permettant aux ingénieurs et aux développeurs de créer plus facilement des systèmes plus avancés et plus efficaces. L'IA est utilisée dans divers aspects de l'électronique, de la conception de circuits au développement de micrologiciels jusqu'à l'automatisation.

#### Conception électronique pilotée par l'IA

Dans le domaine de la conception électronique, des outils d'IA tels que SnapMagic [2] de Natasha Baker contribuent à rationaliser les processus en automatisant des tâches telles que le routage des circuits imprimés et la sélection des composants. SnapMagic est un outil créé pour optimiser le processus de conception des circuits imprimés, en le rendant plus rapide et plus efficace, en particulier pour les amateurs et les petits développeurs. En analysant les circuits existants et en fournissant des suggestions intelligentes, il réduit le temps consacré aux ajustements manuels, ce qui permet aux ingénieurs de se concentrer sur des défis de conception plus complexes.

En outre, la capacité de l'IA à prédire les défauts de conception potentiels à un stade précoce du processus de développement s'est avérée inestimable dans les secteurs où la précision et la fiabilité sont essentielles. Les outils pilotés par l'IA peuvent simuler les performances des circuits dans différentes conditions, ce qui permet d'éviter les erreurs coûteuses qui pourraient résulter d'une négligence manuelle [3].

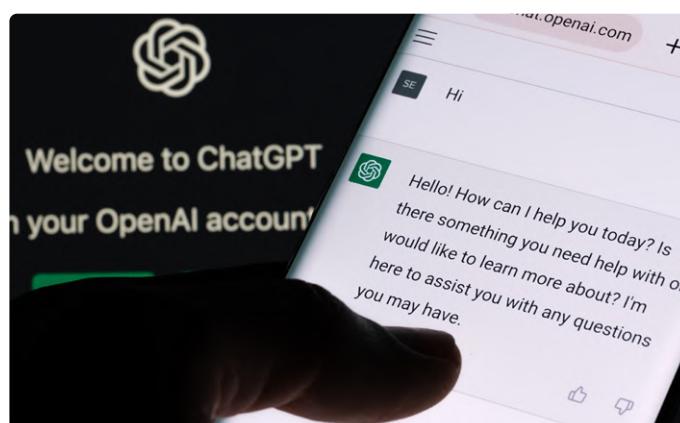


Figure 1. Le GPT-3.5 de ChatGPT a été le premier produit d'IA à susciter l'imagination populaire. Source: Ascannio / stock.adobe.com



Figure 2. BeagleBoard, Raspberry Pi 5 et Raspberry Pi Pico 2 bénéficiant tous de l'IA en périphérie.

#### Systèmes embarqués et IA en périphérie

Les systèmes embarqués, en particulier sur des plateformes telles que BeagleBoard, Raspberry Pi et même Raspberry Pi Pico (figure 2), bénéficient de plus en plus des améliorations apportées par l'IA. L'IA en périphérie permet à ces appareils d'effectuer un traitement en temps réel des données, rendant les applications telles que la vision artificielle et la reconnaissance vocale plus accessibles aux amateurs comme aux professionnels [4].

Les modèles d'IA peuvent désormais être intégrés directement dans le matériel pour gérer la fusion des capteurs, la maintenance prédictive et même la gestion adaptative de l'énergie. Ces solutions d'IA en périphérie sont essentielles pour les appareils IoT et les systèmes domotiques intelligents, où le traitement local en temps réel est préféré aux alternatives basées sur le cloud en raison des problèmes de latence et de confidentialité.

#### L'IA dans le développement logiciel et l'automatisation

L'IA a également eu un impact profond sur la manière dont les développeurs développent les micrologiciels. Des outils tels que GitHub Copilot [5] et Codex d'OpenAI [6] sont utilisés pour automatiser les tâches de codage répétitives, aider au débogage et même générer du code standard à partir d'instructions en langage naturel. Les développeurs peuvent ainsi se concentrer sur des aspects plus complexes de leurs projets, ce qui permet de raccourcir les cycles de développement et d'augmenter la productivité [7].

Par exemple, lorsqu'ils travaillent sur un micrologiciel pour un système embarqué, les développeurs peuvent utiliser l'IA pour générer un code optimisé pour les pilotes de périphériques, améliorant ainsi les performances et réduisant les risques de bogues lors de l'intégration du matériel. Les outils de codage assistés par l'IA sont particulièrement utiles dans les environnements à ressources limitées comme les micro-contrôleurs, où un code efficace est essentiel pour les performances et l'autonomie de la batterie.

#### Conception de puces assistée par l'IA

L'utilisation de l'IA dans la conception des puces électroniques marque une véritable révolution. Des entreprises telles que Google et Apple utilisent l'IA pour automatiser l'agencement et le routage des transistors sur les tranches de silicium, ce qui optimise les performances et l'efficacité énergétique. Grâce à la conception assistée par IA, Google a réussi à développer ses Tensor Processing Units (TPU) de manière plus efficace et rapide que les méthodes traditionnelles.

De même, des ASIC (circuits intégrés propres à une application) personnalisés axés sur l'IA sont en cours de développement pour accélérer les tâches d'IA dans l'électronique grand public, tels que les smartphones et les appareils domotiques intelligents. Ces puces sont optimisées pour des tâches telles que la reconnaissance faciale, le traitement du langage naturel et le traitement des images, facilitant ainsi l'exécution d'applications d'IA en temps réel, indépendamment du cloud.

## Transformer l'avenir de l'électronique et du codage

L'intégration de l'IA dans l'électronique et le codage ouvre la voie au développement de systèmes plus intelligents et plus efficaces. Des outils tels que SnapMagic qui facilitent la conception des circuits imprimés, aux plateformes de codage et à la conception de puces améliorées par l'IA, l'IA redéfinit les méthodes de travail des ingénieurs et des amateurs. Au fur et à mesure de son évolution, l'IA deviendra sans aucun doute un élément central du développement électronique, propulsant des avancées dans les systèmes embarqués, l'IoT, et au-delà.

## L'IA générative dans divers secteurs

L'IA générative a remodelé les industries au-delà du monde de la technologie. En 2023, l'augmentation significative du financement dans l'IA générative a été motivée par les entreprises en quête d'automatisation dans la création de contenu, le marketing, la conception de produits et la gestion de la relation client. Les outils de création de contenu assistés par l'IA, par exemple, ont permis aux entreprises de développer des stratégies de marketing personnalisées à grande échelle, en réduisant considérablement le temps nécessaire pour générer du contenu écrit et visuel. Même l'industrie du divertissement a également adopté l'IA, en utilisant des modèles tels que Lyria [8] de Google DeepMind pour générer de la musique et des effets visuels, ouvrant ainsi une nouvelle ère de créativité pilotée par l'IA.

Dans le secteur du service clientèle, les chatbots d'IA tels que ChatGPT d'OpenAI [9] et Gemini de Google (anciennement Bard) [10] sont devenus plus sophistiqués, capables de gérer une gamme plus étendue de requêtes des utilisateurs, de fournir des expériences personnalisées et même de contribuer à des tâches complexes telles que le codage et les diagnostics médicaux. Alors que ces outils sont de plus en plus largement adoptés, les entreprises explorent de plus en plus l'IA pour produire des rapports, rédiger des documents juridiques et même apporter un soutien en santé mentale.

## L'IA et les bouleversements du marché du travail

L'intégration de l'IA dans la main-d'œuvre a engendré d'importants gains de productivité, tout en soulevant des débats sur les bouleversements du marché du travail. Une étude de 2023 a illustré comment l'IA peut combler le fossé de compétences entre les travailleurs hautement et faiblement qualifiés en offrant des outils qui aident les employés à accomplir des tâches plus rapidement et avec une meilleure qualité. Toutefois, l'impact de l'IA sur l'emploi a suscité une polarisation et des craintes quant au potentiel de l'automatisation à remplacer des emplois dans des secteurs tels que le commerce de détail, les transports et même les domaines professionnels comme le droit et la médecine. D'un autre côté, l'IA a ouvert la voie à de nouveaux postes dans des domaines tels que la science de données, l'ingénierie de l'apprentissage automatique et l'éthique de l'IA. Les entreprises embauchent des spécialistes pour gérer, interpréter et développer les systèmes d'IA. Elles investissent dans la formation et le développement de leurs employés afin de les préparer à travailler avec l'IA, atténuant ainsi les inquiétudes liées à la perte d'emplois.

## Le rôle de l'IA dans le changement climatique et le développement durable

L'IA joue un rôle de plus en plus dans l'adressage de défis mondiaux tels que le changement climatique. Des modèles tels que DeepMind de Google ont été utilisés pour optimiser la consommation d'énergie

dans les centres de données, réduisant significativement leur impact environnemental. D'autres initiatives basées sur l'IA se sont concentrées sur l'analyse prédictive pour la modélisation climatique, permettant aux scientifiques de prédire les tendances météorologiques avec une plus grande précision, d'anticiper les catastrophes naturelles et d'optimiser l'utilisation des énergies renouvelables.

Les startups ont également commencé à exploiter l'IA pour développer des solutions en faveur du développement durable. Par exemple, l'IA est utilisée pour optimiser les chaînes d'approvisionnement, réduire les déchets et améliorer la gestion des ressources. La capacité de l'IA à traiter de grandes quantités de données a permis des avancées notables dans des domaines tels que l'agriculture, où les techniques d'agriculture de précision alimentées par l'IA ont contribué à réduire la consommation d'eau et l'usage de pesticides, favorisant ainsi des pratiques agricoles plus durables.

## L'IA dans l'éducation : une épée à double tranchant

Le rôle de l'IA dans l'éducation s'est révélé à la fois transformateur et source de controverses. Des outils tels que ChatGPT ont été largement adoptés par les étudiants pour les aider à faire leurs devoirs, leurs recherches et même leurs dissertations. Cette évolution soulève des questions sur l'intégrité académique, les enseignants se tournant de plus en plus vers des outils de détection de l'IA tels que DetectGPT [11] pour déterminer si les étudiants soumettent des travaux générés par l'IA. Toutefois, ces outils de détection ont fait preuve de partialité, en particulier à l'égard des personnes dont l'anglais n'est pas la langue maternelle, en classant souvent à tort leurs travaux comme étant générés par l'IA en raison de différences dans le style d'écriture. Cependant, ces outils exigent également que les enseignants soient informés de leur nécessité. Ils doivent être en avance sur les étudiants, ce qui n'est pas toujours le cas - j'ai vu des élèves d'école primaire soumettre des travaux d'IA paresseux à des enseignants qui n'avaient jamais entendu parler de l'IA et qui pensaient encore qu'il suffisait de googler quelques phrases pour détecter le plagiat. Le duel évolutif se poursuit.

Du côté positif, l'IA est utilisée pour créer des expériences d'apprentissage personnalisées. Les tuteurs IA peuvent désormais évaluer les points faibles des élèves dans des matières telles que les mathématiques et adapter les exercices en conséquence. Ce niveau de personnalisation permet de combler les lacunes d'apprentissage et donne aux élèves la possibilité d'apprendre à leur propre rythme. Pour les enseignants qui maîtrisent ces outils, l'IA est également utilisée pour corriger les devoirs et les examens de manière plus efficace, ce qui permet aux enseignants de se concentrer sur l'engagement des élèves et sur l'enseignement.

## Éthique et IA : naviguer en terrain miné

À mesure que l'IA se généralise, les préoccupations éthiques s'intensifient. L'un des principaux débats actuels porte sur la transparence des modèles d'IA. Avec l'essor des modèles de base tels que GPT-4 et Gemini, les chercheurs ont souligné qu'il est de plus en plus difficile de comprendre comment ces modèles parviennent à leurs conclusions. Cette opacité, connue sous le nom de « problème de la boîte noire », a conduit à des appels en faveur d'une plus grande transparence dans le développement des modèles d'IA.

Les questions d'éthique liées aux préjugés dans l'IA constituent une préoccupation majeure. Les modèles d'IA, entraînés avec des données historiques, reflètent souvent les préjugés de la société, ce qui entraîne



## FEATURED TOPIC

Visit our [Embedded & AI page](#)  
for articles, projects, news, and  
videos.

[www.elektormagazine.com/  
embedded-ai](http://www.elektormagazine.com/embedded-ai)



des discriminations dans des domaines tels que l'embauche, l'application de la loi et les services financiers. L'introduction de l'indice de transparence des modèles de la Fondation en 2023, qui évalue les modèles d'IA sur 100 aspects de la transparence, a permis de répondre à ces préoccupations. Cependant, à l'instar des outils de détection de l'IA, les systèmes d'IA peuvent par inadvertance renforcer les préjugés, d'où les appels à une meilleure surveillance.

Une autre question éthique émergente est le potentiel de l'IA à générer des « deepfakes » et à propager de la désinformation, en particulier dans le domaine politique. À l'approche des élections dans plusieurs pays, l'utilisation de l'IA pour créer des récits persuasifs - mais faux - a suscité des inquiétudes quant à son potentiel à saper la démocratie. Les organes législatifs du monde entier, y compris les États-Unis et l'Union européenne, ont commencé à élaborer des réglementations pour relever ces défis, mais les progrès ont été lents et fragmentés.

### L'IA et les soins de santé : défis et opportunités

L'intégration de l'IA dans les soins de santé a été à la fois prometteuse et problématique. D'une part, des modèles d'IA tels que Gemini Pro ont été utilisés pour aider les médecins à diagnostiquer des pathologies et à fournir des recommandations de traitement. Une étude réalisée en 2023 a révélé que l'IA pouvait générer des recommandations cliniques sûres dans 91 à 93 % des cas. Cependant, la même étude a révélé que les modèles d'IA fournissent souvent des citations incorrectes et recommandent parfois des traitements dangereux en raison de données « hallucinées », ce qui soulève des inquiétudes quant à leur fiabilité dans des contextes médicaux critiques. [4].

De plus, l'IA a montré son potentiel dans le domaine de l'imagerie médicale, permettant des diagnostics plus rapides et plus précis de maladies telles que le cancer. Des modèles d'IA ont également été développés pour prédire les épidémies et améliorer les soins aux patients grâce à des plans de traitement personnalisés. Pourtant, l'intégration de l'IA dans les soins de santé a été lente en raison des barrières réglementaires, de préoccupations en matière de protection de la vie privée et de la nécessité d'une surveillance humaine dans la prise de décisions critiques.

Dans la sphère des consommateurs, des outils tels que ChatGPT, par excès de prudence, systématiquement de consulter un médecin pour toute préoccupation médicale, même mineure. Je commençais à en avoir assez de cette répétition et j'ai dû modifier le GPT en y ajoutant des instructions personnalisées.

### La prochaine frontière de l'IA

L'IA a fait d'énormes progrès au cours de l'année écoulée, avec des avancées dans les modèles génératifs, la recherche scientifique et les soins de santé, ainsi qu'une augmentation des investissements et une adoption plus large dans divers secteurs. Cependant, l'évolution rapide de l'IA pose des défis considérables en termes d'éthique, de réglementation et de perception publique. À mesure que l'IA s'intègre dans la vie quotidienne, il sera essentiel de maintenir un équilibre entre innovation et responsabilité pour garantir que l'IA serve l'intérêt de la société. Avec l'évolution constante de la législation, des cadres éthiques et de la technologie, l'avenir de l'IA reste à la fois excitant et incertain. 

230181-J-04

### À propos de l'auteur

Brian Tristam Williams est passionné par les ordinateurs et l'électronique depuis l'acquisition de son premier micro-ordinateur à l'âge de dix ans. Son périple avec le magazine Elektor a débuté lorsqu'il a acheté son premier numéro à seize ans. Depuis lors, il se consacre à l'étude continue de l'électronique et de l'informatique, toujours avide de nouvelles connaissances. Il a commencé à travailler pour Elektor en 2010 et il consacre désormais son expertise à l'analyse des avancées technologiques les plus récentes, avec un intérêt particulier pour l'intelligence artificielle et les ordinateurs monocartes, comme le Raspberry Pi.

### Questions ou commentaires ?

Nous aimerions savoir comment vous utilisez l'IA et comment elle vous a affecté au cours des deux dernières années. Si vous avez des questions ou des commentaires, n'hésitez pas à m'envoyer un courriel ([brian.williams@elektor.com](mailto:brian.williams@elektor.com)). Vous pouvez également me retrouver chaque mois dans l'émission *Elektor Engineering Insights* sur YouTube, et vous pouvez me suivre sur X @briantw.

### LIENS

- [1] Prof. M. Boden, «Artificial Intelligence», Elektor - février 1986 : <https://elektormagazine.com/magazine/elektor-198602/46891>
- [2] Elektor TV, «Innovation with AI: Interview with Natasha Baker of SnapMagic» : <https://youtu.be/iWnPgEctO8Q>
- [3] Google Research, "2023: A year of groundbreaking advances in AI and computing" : <https://tinyurl.com/googleresearch2023>
- [4] Stanford University Human-Centered Artificial Intelligence, "13 Biggest AI Stories of 2023": <https://tinyurl.com/stanford13aistories>
- [5] GitHub Copilot : <https://github.com/features/copilot>
- [6] OpenAI Codex : <https://openai.com/index/openai-codex>
- [7] Forbes Australia, "The 2024 AI Index is out. Here are the Top 10 takeaways" : <https://tinyurl.com/forbesai2024index>
- [8] Lyria de Google DeepMind : <https://deepmind.google/discover/blog/transforming-the-future-of-music-creation>
- [9] ChatGPT d'OpenAI : <https://chat.openai.com>
- [10] Gemini de Google : <https://gemini.google.com>
- [11] DetectGPT : <https://detectgpt.com>

# e-choppe Elektor

## des produits et des prix surprenants

L'e-choppe Elektor a évolué. D'abord simple commerce de proximité pour nos productions (livres, magazines, kits et modules), c'est désormais une boutique en ligne bien rodée

qui propose des produits surprenants à des prix très étudiés. Ce sont les produits que nous aimons et testons nous-mêmes. Si vous avez une suggestion, n'hésitez pas : [sale@elektor.fr](mailto:sale@elektor.fr).

### PTS200 Fer à souder intelligent (avec 4 pointes de soudure + alimentation de 100 W)



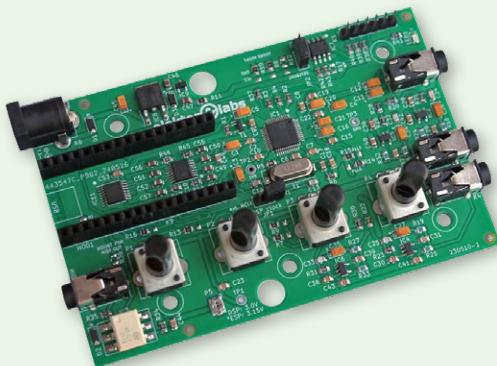
Le PTS200 est un puissant fer à souder intelligent portable piloté par ESP32, dont la puissance de sortie est réglable de 18 à 100 W. Associé à une alimentation de 100 W et à une panne de 4 Ω, ce fer à souder élimine le besoin d'une station de soudage traditionnelle et répond parfaitement aux exigences des différentes tâches de soudage. Il dispose de 4 tensions de fonctionnement réglables, lui permettant d'être configuré pour différentes sources d'alimentation.

Prix : ~~124,95 €~~

**Prix spécial : 99,95 €**

 [www.elektor.fr/20940](http://www.elektor.fr/20940)

### Elektor Audio DSP FX Processor



Le Elektor Audio DSP FX Processor combine un microcontrôleur Espressif ESP32 et un DSP Audio ADAU1701 d'Analog Devices. Outre un noyau DSP programmable par l'utilisateur, l'ADAU1701 intègre des convertisseurs analogique-numérique et numérique-analogique de haute qualité et dispose d'un port I<sup>2</sup>S. Cela le rend approprié comme interface audio de haute qualité pour l'ESP32.

Prix : ~~99,95 €~~

**Prix spécial : 79,95 €**

 [www.elektor.fr/20895](http://www.elektor.fr/20895)



## Raspberry Pi caméra AI



Prix : 79,95 €

[www.elektor.fr/20953](http://www.elektor.fr/20953)

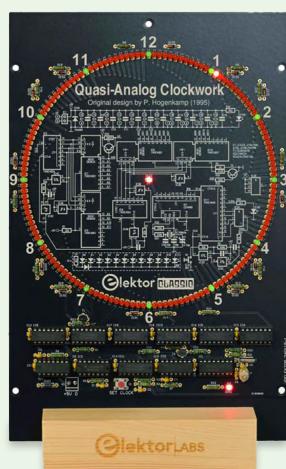
## Raspberry Pi Zero 2 WH (avec connecteur)



Prix : 22,95 €

[www.elektor.fr/20952](http://www.elektor.fr/20952)

## Kit d'horloge quasi-analogique Elektor

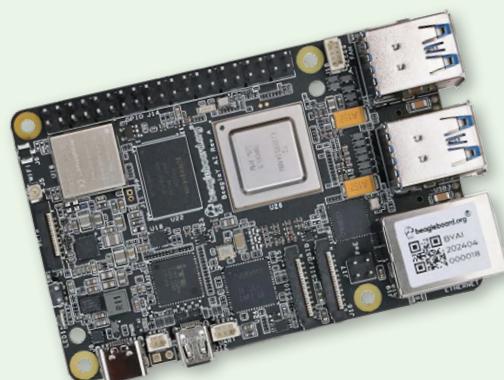


Prix : 79,95 €

Prix spécial : 64,95 €

[www.elektor.fr/20944](http://www.elektor.fr/20944)

## BeagleY-AI SBC avec GPU, DSP et accélérateurs d'IA



Prix : 89,95 €

[www.elektor.fr/20991](http://www.elektor.fr/20991)

# afficheurs LED

## avec le MAX7219

une puce excellente

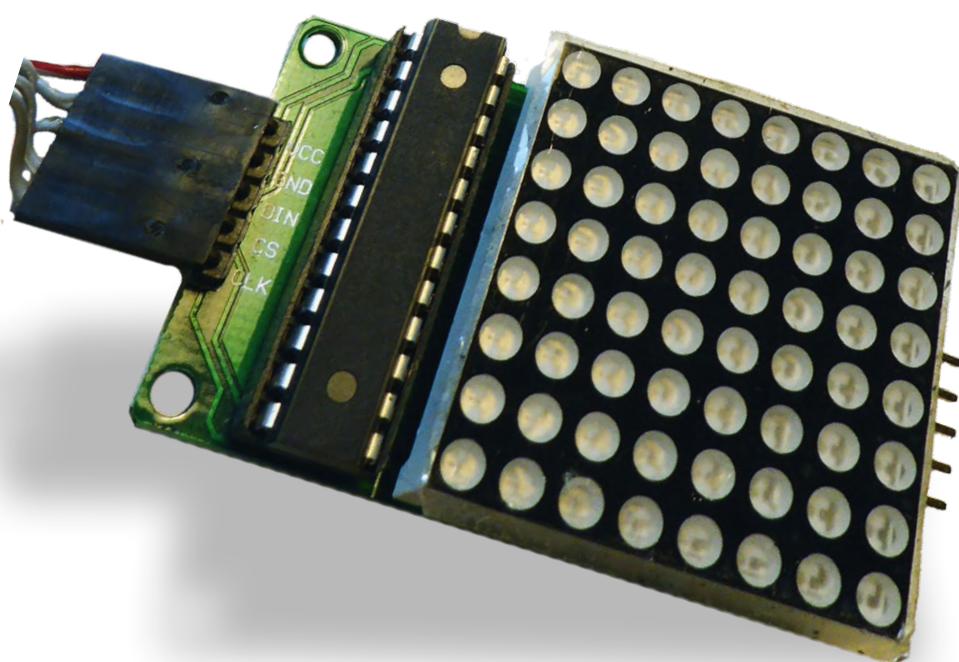


Figure 1. Un module MAX7219 peu coûteux.

Jonathan Hare (Royaume-Uni)

Le MAX7219 est un driver d'affichage utile et polyvalent, capable de contrôler jusqu'à 64 LED indépendamment. Bien qu'il soit largement reconnu, la majorité des tutoriels disponibles se contentent d'exploiter des bibliothèques prêtes à l'emploi. À l'opposé, je vous offre une approche plus fondamentale qui consiste à manipuler directement les registres du composant. Cette méthode enrichit votre compréhension et vous fournit des connaissances essentielles pour réussir vos projets avec cette puce utile, économique et amusante.

Le MAX7219 de Maxim Integrated [1], dans son boîtier de 24 broches, peut contrôler indépendamment jusqu'à huit rangées de huit LED, ou alternativement jusqu'à huit afficheurs à sept segments. Ceci le rend idéal pour des projets nécessitant un affichage visuel à base de LED. J'ai récemment utilisé huit de ces puces pour piloter un cube à 512 LED dans un jeu interactif destiné à enseigner les mathématiques des matrices et des tenseurs [2]. Bien que l'internet regorge de projets intéressants utilisant le MAX7219 que vous pouvez simplement reproduire, ils s'avèrent limités pour ceux désirant innover. Je vous propose donc une approche différente et de travailler directement avec les registres.

### Modules MAX7219

Vous pouvez acheter la puce nue en boîtier DIP ou SMD. Toutefois, il est généralement plus simple et économique d'opter pour un module prêt à l'emploi disponible sur eBay ou d'autres sites similaires. Ces modules intègrent une matrice de 8 x 8 LED sur le circuit imprimé (**figure 1**). Une carte de développement typique comprend cinq connexions : VCC = 5 V, GND = 0 V, DIN = SPI entrée de données, CS = chip select et CLK = SPI entrée d'horloge. Notez la présence

de deux connecteurs à cinq broches ; le connecteur le plus proche de la puce, à gauche, est utilisé pour la communication avec la carte, tandis que celui à droite permet de connecter plusieurs modules en chaîne créant ainsi un affichage de plus grande dimension.

## Schéma

Le schéma du module est illustré dans la **figure 2**. Il est très simple : la puce est alimentée via sa broche 19 (VCC, 5 V) et ses broches 4 et 9 (masse). Par ailleurs, les broches 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10 et 11 sont connectées aux cathodes des LED. Elles sont désignées par Dig 0 à Dig 7 sur la fiche technique, car il est également possible de les utiliser pour contrôler des afficheurs à sept segments. Les broches 14, 15, 16, 17, 20, 21, 22 et 23 sont connectées aux anodes des LED. Elles sont désignées par SEG A à SEG DP sur la fiche technique pour la même raison. La broche 18 est utilisée pour ajuster la luminosité maximale de toutes les LED, en y connectant une résistance (habituellement de 10 kΩ) à la source de tension positive. Les broches 1, 12 et 13 servent d'entrées pour l'interface SPI. Si vous réalisez vous-même un circuit, placez les condensateurs C1 et C2 aussi proche que possible des broches d'alimentation de la puce.

## À propos des registres

La plupart des pilotes d'affichage comme le MAX7219 n'affichent rien sur leur sortie à la mise sous tension. Une communication est nécessaire pour configurer ces puces et leur transmettre des données. L'utilisation d'un microcontrôleur ou d'un ordinateur via un port série est courante pour cette tâche. Ces puces sont pilotées par des registres plutôt que par des commandes ; elles sont configurées et contrôlées par le chargement de données dans leurs registres. Il existe 13 registres accessibles via un bus série. Cela peut sembler complexe, mais devient simple avec l'utilisation de Python ou d'un autre langage de programmation de haut niveau. Une fois ces registres initialisés, il n'est pas nécessaire de les reconfigurer tous à chaque modification de l'état des LED ou de l'affichage. En pratique, vous pouvez créer une routine de configuration à exécuter au début de votre programme, puis vous envoyez des données uniquement au(x) registre(s) à modifier.

## Communications en série avec des puces et des capteurs

Bien que certains circuits intégrés puissent recevoir des données sur un bus parallèle (en utilisant plusieurs lignes de données à la fois,

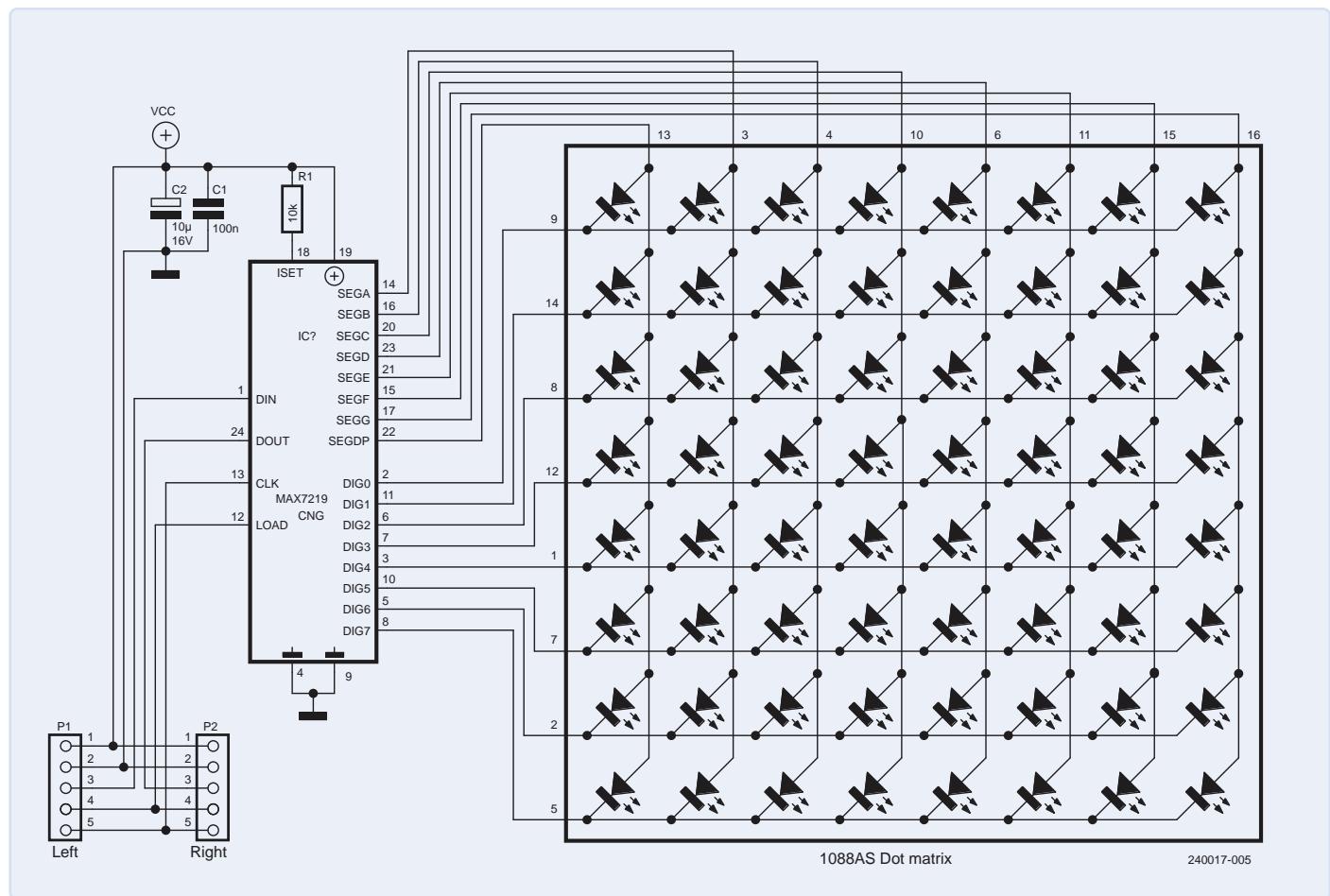


Figure 2. Schéma du module.

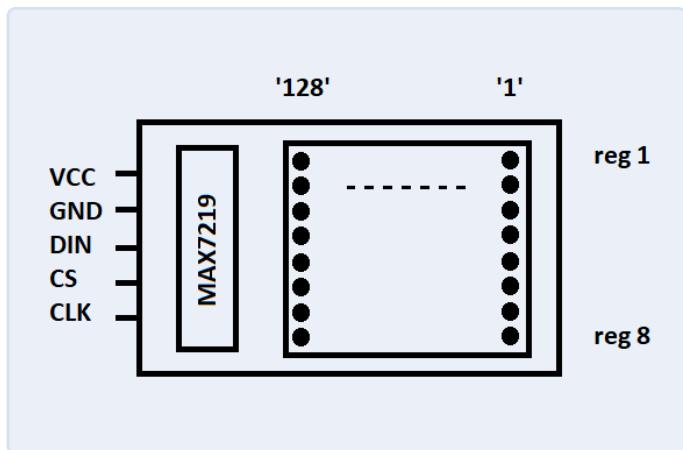


Figure 3. Orientation et adressage des LED.

par exemple huit), la communication série est plus répandue. Dans le domaine des systèmes embarqués, les trois principales interfaces série sont UART [3], I<sup>2</sup>C [4] et SPI [5]. Le MAX7219 utilise l'interface SPI, qui est relativement simple une fois que l'on a pris le coup de main. La consultation de la fiche technique de la puce s'avère cruciale pour adapter correctement votre application. À la différence de l'UART, le SPI ne requiert pas de configuration de vitesse de transmission (baud rate), bien qu'il puisse être nécessaire de ralentir le bus par rapport à ses paramètres par défaut, par exemple si vous avez de longues liaisons entre le PIC principal et la puce MAX7219.

Outre la connexion de masse commune (GND, broche 4), SPI utilise deux fils pour envoyer des données vers et depuis la puce : une ligne de données (DATA IN/DIN, broche 1) et une ligne d'horloge (CLK, broche 13). Une troisième ligne appelée Chip Select (CS/LOAD, broche 12) est utilisée pour charger les données reçues dans l'appareil. Les données SPI nécessaires pour piloter la puce MAX7219 sont assez simples. La communication avec le MAX7219 via SPI implique l'envoi de 16 bits de données et l'activation temporaire de la broche CS pour charger ces données dans la puce. Lorsque vous utilisez le MAX7219, il suffit d'envoyer des données sans nécessité de recevoir des informations en retour.

## Logique 5 V ou 3.3 V

En général, il est crucial de vérifier la compatibilité des tensions de fonctionnement des appareils en communication. Les niveaux de 5 V et 3,3 V sont les plus répandus. La fiche technique du MAX7219 indique une tension de fonctionnement nominale de 5 V (4 V à 5,5 V). Pour les microcontrôleurs fonctionnant à une tension différente, comme 3,3 V, un circuit de décalage de tension pourrait s'avérer nécessaire. La fiche technique indique que la tension minimale pour un niveau logique haut ( $V_{IH}$ ) est de 3,5 V. Ainsi, un niveau « haut » de 3,3 V fourni par un microcontrôleur alimenté en 3,3 V n'est pas assez élevé. En pratique, j'ai constaté que les modules MAX7219 fonctionnaient correctement avec des microcontrôleurs 3,3 V, tels que les PIC de Microchip ou le Raspberry Pi Pico, sans nécessiter de décalage de niveau, même si c'est en dehors des spécifications de la fiche technique.

## Registres du MAX7219

Le MAX7219 est contrôlé par treize registres. Chaque registre a 8 bits de données et une adresse de 8 bits.

- le registre 1 définit l'état (activé ou désactivé) de la première rangée de DEL. Son adresse est 00000001 en binaire.

- les registres suivants 2 à 8, dont les adresses sont respectivement 00000010 et 00001000, définissent les autres rangées de LEDs de la 2ème à la 8ème.
- le registre 9 (adresse : 00001001) définit le mode de décodage des données destinées aux afficheurs à 7 segments.
- registre 10 (adresse : 00001010) règle la luminosité
- registre 11 (adresse : 00001011) règle la limite de balayage
- le registre 12 (adresse : 00001100) définit le mode d'arrêt/de démarrage
- le registre 13 (notez que son adresse est 00001111 et non 00001101) est utilisé pour tester l'affichage.

Il est important de noter que le registre à l'adresse 00000000 est inactif (no-op) lorsqu'un seul module MAX7219 est utilisé. Il est possible d'utiliser ce registre lors de la mise en cascade de plusieurs modules MAX7219 (aspect que j'aborderai plus en détail ultérieurement). Pour plus de détails sur tous ces registres, referez-vous à la fiche technique et aux encadrés «**Plus de détails sur les registres 9 à 13**» et «**Mise en cascade de plusieurs modules MAX7219**».

## Mise en cascade de plusieurs modules MAX7219

Le MAX7219 est doté d'une fonction intelligente intégrée qui peut être utilisée pour piloter plusieurs puces afin de créer de plus grands réseaux de LED. Grâce à cette fonction, vous pouvez relier des cartes entre elles pour créer un grand affichage à LED, utilisé typiquement dans les écrans déroulants visibles sur les bus et les panneaux d'information des gares. Pour ce faire, il faut connecter la broche Data Out du premier module à la broche Data In du module suivant, et ainsi de suite. Chaque puce transmet les données reçues à la puce suivante après seize cycles d'horloge. Par exemple, si vous avez deux modules MAX7219 connectés comme décrit, les données sont envoyées sous forme de deux mots de 16 bits. Les données sont transmises d'une puce à l'autre, un bit à la fois. Ensuite, vous envoyez une impulsion à la broche CS pour verrouiller les données. La première puce (la plus proche du microcontrôleur) stocke donc les 16 derniers bits qui ont été envoyés, tandis que la seconde puce stocke les 16 premiers bits.

Pour adresser uniquement la deuxième puce sans affecter la première, on utilise le registre no-op (adresse 00000000). Il suffit de lui envoyer le mot de 16 bits souhaité, suivi d'une commande no-op (seize zéros). Ainsi, la deuxième puce reçoit les données et la première puce ne change rien. Ceci peut être étendu à n'importe quel nombre de MAX7219, le seul facteur limitant étant qu'il peut devenir peu pratique de manipuler des nombres avec un grand nombre de bits. Bien que cette méthode rende le câblage très simple, elle rend le codage un peu plus complexe. Pour mon cube LED éducatif 8 x 8 x 8, comme le Raspberry Pi Pico a beaucoup de ports de sortie, j'ai choisi de câbler toutes les lignes de données SPI ensemble, de sorte que toutes les puces reçoivent les données en même temps, mais ne sélectionnent que les broches de sélection de puce (LOAD) sur les tableaux 8 x 8 que je souhaite contrôler à chaque instant.

**Tableau 1. Broches et connexions.**

Numéro de broche Pi Pico	Numéro du Pi Pico Portpin	Connexion à la carte MAX7219
pin 4	GP2	CLK
pin 5	GP3	DIN (DATA)
pin 21	GP16	CS (LOAD)
pin 40	VBUS	VCC (+5 V)
pin 38	GND	GND (0 V)

## Orientation du module

Lorsque vous utilisez le module décrit dans cet article, assurez-vous de le maintenir dans l'orientation indiquée, avec la puce à gauche (**figure 3**). Le registre 1 correspond à la rangée supérieure de LED. Pour les huit bits de données envoyés à ce registre, la LED correspondant au bit de poids faible se trouve à l'extrême droite, la plus éloignée du MAX7219.

## Utilisation des registres

La transmission des données au MAX7219 se fait par paquets de 16 bits via le bus SPI. L'adresse du registre doit être envoyée en premier, suivie des données que vous souhaitez stocker dans le registre. Le bit de poids fort (MSB) doit être transmis en premier. Ceci est facile à implémenter dans le code. Par exemple, si vous souhaitez allumer une LED sur deux dans la troisième rangée de LED, vous devez envoyer les données suivantes sur le bus SPI : 00000011 10101010. Le 00000011 est l'adresse du 3<sup>e</sup> registre, tandis que le 10101010 allumera une LED sur deux.

## Le bit de poids fort en premier et la configuration SPI

L'obligation d'envoyer le bit de poids fort en premier peut prêter à confusion. Le périphérique SPI du microcontrôleur que vous utilisez possède d'autres paramètres qui doivent parfois être définis, par exemple si les données sont capturées sur le front descendant ou descendant des impulsions. Dans la plupart des cas, les langages de haut niveau que vous utilisez peuvent gérer cela pour vous. Il est recommandé de consulter la documentation de votre microcontrôleur pour utiliser les réglages par défaut.

## Exemple en PIC BASIC

Je trouve le compilateur PIC BASIC de Crownhill [6] très agréable à utiliser. Il est parfaitement compatible avec les microcontrôleurs PIC16F877 qui, bien qu'anciens, restent extrêmement utiles pour le prototypage rapide. Voici un exemple de ligne de code en PIC BASIC pour envoyer le code SPI du PIC au MAX7219, en utilisant le Port B.2, MSB en premier du PIC au MAX7219 :

```
SHOut PORTB.2, PORTB.0, MsbFirst, [%0000001011111111]
```

Cette commande envoie un flux de 16 bits, avec l'adresse en premier (00000101, qui correspond à 5) et ensuite les données (tous les bits à 1). Cela permet d'allumer toutes les LED de la ligne 5.

## Exemple en MicroPython avec le Raspberry Pi Pico

Bien que certaines versions de MicroPython incluent des modules pré-écrits pour le MAX7219, permettant de dessiner des formes ou des caractères, je préfère aborder la programmation des registres directement pour un contrôle plus précis. Pour ce faire, connectez les broches 4 (CLK), 5 (DATA) et 21 (CS) aux broches correspondantes du module MAX7219, comme décrit dans le **tableau 1**. MicroPython



## Listage 1. A setup Module.

```
from machine import Pin, SPI
import utime
import urandom
spi_sck = Pin(2)
spi_tx = Pin(3)
spi_rx = Pin(0)
spi = SPI(0, sck=spi_sck, mosi=spi_tx, bits=8,
miso=spi_rx, baudrate=100000, firstbit=SPI.MSB)
cs = Pin(16, Pin.OUT)
cs.value(0)

# chip select 'pulse'
def cs_ping_set():
    cs.value(1)
    utime.sleep(.001)
    cs.value(0)

def setup_max7219():
    for i in range (1,9):
        # Note: zero = nop
        # clear led rows 1 to 8
        # in registers 1 to 8
        buff = [0,0]
        buff[0] = i
        buff[1] = 0b00000000
        spi.write(bytarray(buff))
        cs_ping_set()

    # set shutdown to start
    # register 9
    buff = [0,0]
    buff[0] = 0b00001100
    buff[1] = 0b00000001
    spi.write(bytarray(buff))
    cs_ping_set()
    # adjust brightness
    # register 10
    buff = [0,0]
    buff[0] = 0b00001010
    buff[1] = 0b00001111
    spi.write(bytarray(buff))
    cs_ping_set()
    # scan limit register -set all rows and col.s
    # register 11
    buff = [0,0]
    buff[0] = 0b00001011
    buff[1] = 0b00000111
    spi.write(bytarray(buff))
    cs_ping_set()
    # set decode mode
    # register 12
    buff = [0,0]
    buff[0] = 0b00001001
    buff[1] = 0b00000000
    spi.write(bytarray(buff))
    cs_ping_set()
    # set test mode off
    # register 13 but Note address 15
    buff = [0,0]
    buff[0] = 0b00001111
    buff[1] = 0b00000000
    spi.write(bytarray(buff))
    cs_ping_set()
```

nécessite que vous importiez du code pour gérer la fonction SPI. Cela se fait en ajoutant `from machine import Pin, SPI` au début de votre programme. Le code Python que vous devez utiliser pour envoyer les mêmes données SPI de l'exemple précédent au MAX7219 est :

```
from machine import Pin, SPI
buff = [0,0]
buff[0] = 0b00000101
buff[1] = 0b11111111
spi.write(bytarray(buff))
```

### Autres exemples

Les lignes de code ci-dessus sont un extrait qui illustre les parties les plus importantes. Vous pouvez consulter les programmes complets sur mon site web [7]. Dans les deux exemples, vous devez immédiatement fournir une impulsion positive sur la broche Chip Select (CS ou LOAD) pour charger les données dans le registre. Pour ce faire, il suffit d'écrire :

```
cs.value(1)
utime.sleep(0.001)
cs.value(0)
```

### Écrire des programmes

Avant de commencer à adresser les LED de votre afficheur, vous devez créer un sous-programme d'installation pour la configuration. Exécutez ce sous-programme au début de votre programme. Par la suite, vous pouvez simplement adresser les LED de chaque ligne, en réécrivant le registre correspondant, sans ordre particulier. Le **listage 1** présente la fonction `setup_max7219()` que j'ai développée, disponible également sur mon site web. Cette fonction commence par une boucle qui envoie zéro aux registres 1 à 8, ce qui éteint toutes les LED. Ensuite, le registre 9 est défini (mode de décodage) à 0 pour une utilisation avec des LED individuelles (et non des afficheurs à sept segments), puis le registre 10 (luminosité) est défini à 15 (1111), le registre 11 (limite



Figure 4. Cube à LED.



### Listage 2. Lights Flashing Across the Display.

```
# display set-up
setup_max7219()
while True:
    # sweep rows
    for j in range(1,9):
        buff = [0,0]
        buff[0] = j    # register no.
        buff[1] = 255 # value (all ON)
        spi.write(bytarray(buff))
        cs_ping_set()
        utime.sleep(.2)

    setup_max7219() # clear screen
    # sweep columns
    for k in range(0,8):
        for l in range(1,9):
            buff = [0,0]
            buff[0] = l    # register no.
            buff[1] = 2**k # value 2^k
            spi.write(bytarray(buff))
            cs_ping_set()
            utime.sleep(.2)

    setup_max7219() # clear screen
```

de balayage) à 7 (pour utiliser toutes les lignes de LED), le registre 12 (arrêt) à 0, et enfin le registre 13 (mode test) à 0.

### Effacer l'afficheur

Une autre fonction essentielle est de pouvoir effacer tout l'afficheur en une seule fois sans modifier les autres réglages. Cela peut être réalisé en envoyant des «0» aux huit premiers registres, éteignant ainsi toutes les LED simultanément. Grâce à la rapidité du SPI, cette opération ne prend que quelques millisecondes, rendant l'effacement de l'afficheur instantané et imperceptible pour l'œil humain.

### Exemples de Light Chaser

Pour créer un effet visuel où une rangée de LED allumées se déplace à travers l'afficheur, commencez par effacer l'afficheur. Envoyez ensuite 1111111 (toutes les LED allumées) au registre 1. Après une courte pause, effacez à nouveau l'afficheur et envoyez les mêmes données au registre 2, et ainsi de suite. Une boucle permet de répéter cette opération pour les huit registres, créant ainsi un effet de balayage des LED sur l'afficheur. Si vous ne réinitialisez pas l'afficheur après chaque étape, vous obtiendrez un effet de rideau de lumière croissant. Le délai déterminera la vitesse à laquelle les lumières clignotent. Ceci est illustré dans le **Listage 2**. Ici, pour simplifier le code, j'ai utilisé à nouveau la fonction `setup_max7219()` pour réinitialiser l'affichage. Cela fonctionne bien ;

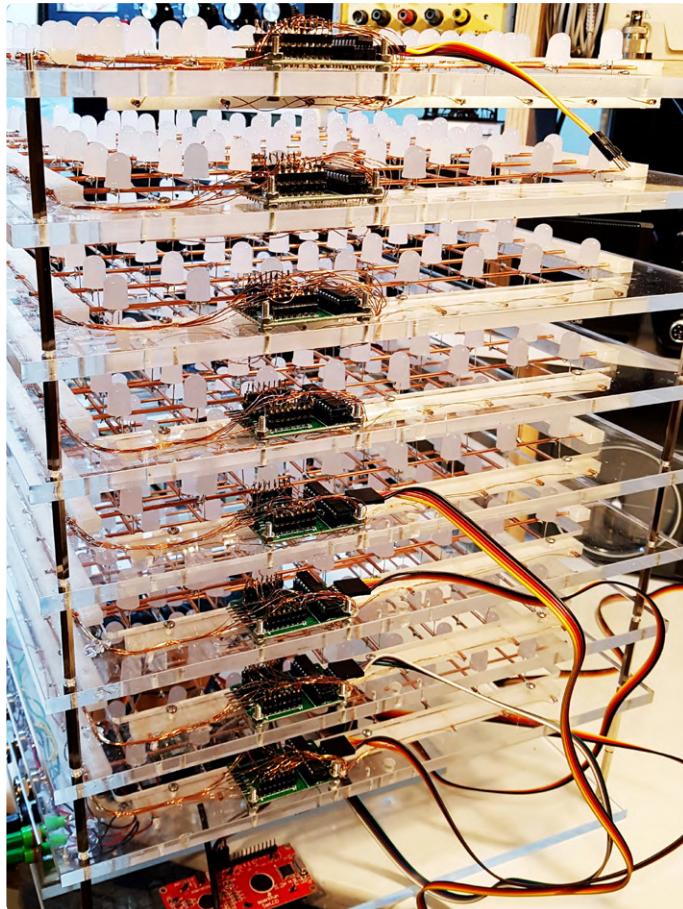


Figure 5. Vue latérale montrant huit modules MAX7219.

bien que les registres 9 à 13 soient écrits inutilement à chaque fois, cela n'est pas visible à l'œil humain. Une alternative serait d'écrire une fonction `clear_screen()` dédiée.

Si vous voulez faire clignoter les LED en colonnes plutôt qu'en lignes (c'est-à-dire pivoter l'effet à 90 degrés), vous devez envoyer 00000001 à tous les registres en utilisant une boucle. Cela permet d'allumer la première LED de chaque colonne, créant ainsi une colonne de LED. Utilisez la boucle suivante pour envoyer 000000010 à tous les registres, puis 00000100, etc. Vous pourriez utiliser le décalage par bit pour cela, mais dans l'exemple montré, j'ai juste utilisé des puissances croissantes de deux pour le même but, comme  $2^1 = 2 = 0b00000010$ ,  $2^2 = 4 = 0b00000100$ , etc. Il n'est pas nécessaire de réinitialiser l'afficheur à chaque fois, puisque les registres sont modifiés progressivement. Là encore, le délai détermine la vitesse à laquelle les lumières clignotent. En jouant avec les valeurs des bits que vous envoyez aux huit registres 1 à 8, vous pouvez créer toutes sortes de motifs captivants, de flashes, de voiles lumineux, etc. Vous pouvez également utiliser la fonction aléatoire de Python pour créer de jolis effets visuels. Jetez un coup d'œil aux autres exemples qui incluent des simulations de vagues, d'éclairs, de flammes, de marches aléatoires et même quelques projets basés sur les mathématiques sur mon site web [7].

### Plus de détails sur les registres 9 à 13

- Le registre 9 définit le mode de décodage. Vous pouvez configurer la puce MAX7219 pour contrôler soit des rangées de LED, soit des afficheurs à 7 segments. Le réglage par défaut est pour une seule rangée de LED (voir registre 11 ci-dessous). En mode décodage, vous pouvez contrôler directement les afficheurs à 7 segments, ce qui facilite la programmation : par exemple, envoyer « 00000000 » comme donnée, qui est un zéro en décimal, activera 6 des sorties pour contrôler les segments A à F de l'afficheur à 7 segments afin de créer un zéro ; même chose pour les autres chiffres décimaux 1 à 9 et quelques autres symboles (voir la fiche technique).
- Le registre 10 définit la luminosité des LED. La puce utilise la modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour contrôler la luminosité des LED. 32 niveaux sont disponibles, le nibble inférieur contrôlant la luminosité : 0000 est le moins lumineux (1:32 PWM), et 1111 est presque entièrement allumé (31:32 PWM). Vous pouvez utiliser le réglage le moins lumineux comme mode nuit, par exemple, mais n'oubliez pas de le remettre à pleine luminosité plus tard.
- Le registre 11 définit le nombre de rangées de LED à utiliser. Lorsqu'elle est mise sous tension, la puce est réglée pour faire fonctionner une seule ligne de 8 LED. Si vous voulez piloter une seule rangée de 8 LED (ou un seul afficheur à 7 segments), réglez ce registre à 00000000. Pour utiliser les huit rangées (64 LED), réglez ce registre sur 00000111, et ainsi de suite.
- Les registres 12 et 13 peuvent être utilisés pour éteindre l'écran (par exemple, pour économiser de l'énergie) et pour lancer un mode de test, utile pour vérifier que toutes les LED fonctionnent correctement. Notez que la plupart des registres ont une adresse en binaire qui correspond à leur numéro de registre en décimal, mais pas celui-ci : son adresse est 00001111, c'est-à-dire 15, et non 13.

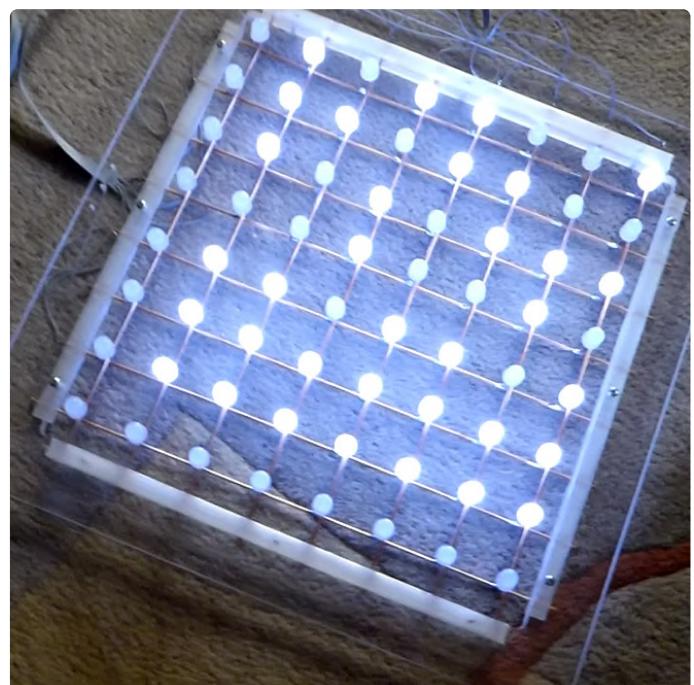


Figure 6. Une des huit couches.

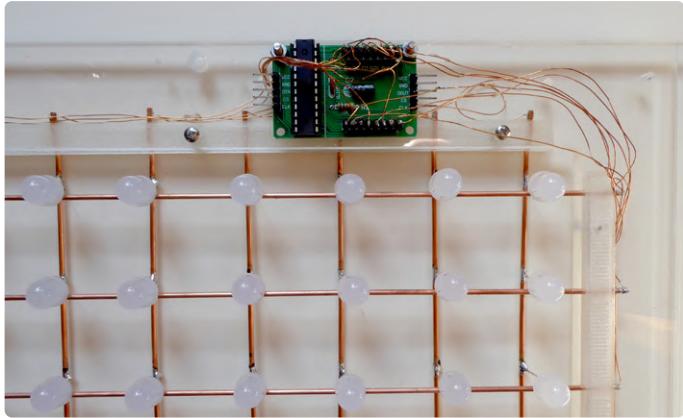


Figure 7. Connexions aux lignes et aux colonnes.

### Enseigner les scalaires, les vecteurs, les matrices et les tenseurs de manière intelligente

J'ai récemment collaboré avec l'université de Sussex (Royaume-Uni) pour développer un jeu éducatif destiné à enseigner les vecteurs, les matrices et les tenseurs aux élèves et aux étudiants. Le jeu, qui peut également être utilisé en « mode démo » pour démontrer d'autres principes mathématiques. Le dispositif (figure 4) consiste en un cube composé de huit modules MAX7219 (figure 5), chacun pilotant 64 LED blanches de 10 mm, soit  $8 \times 8 \times 8 = 512$  LED au total ! Les données représentées par les LED, allumées ou éteintes, forment des tableaux binaires. Conçu pour captiver un public de 10 à 16 ans, le jeu a également séduit un large éventail d'âges lors d'événements familiaux STEM. La structure de chaque couche (figure 6) est composée de feuilles d'acrylique transparent et de tubes de cuivre, le tout piloté par un Raspberry Pi Pico programmé en MicroPython.

Bien que l'utilisation de LED RGB programmables et adressables en série aurait également été une option, je n'ai pas trouvé de versions traversants de 10 mm nécessaires pour le projet. Le jeu comprend quatre rangées de 8 interrupteurs ; trois d'entre eux sont utilisés par les participants pour entrer les données x, y et z pour jouer. La quatrième est utilisée pour la sélection du menu du jeu. Plus de détails sur mon site web et sur ma chaîne YouTube [8]. Je tiens à remercier l'équipe du professeur Hazel Cox à l'université du Sussex (Royaume-Uni), notamment le professeur Michael Melgaard et le docteur Yevgen Petrov, Brice Kammegne et Tom Baird-Taylor. Merci également au festival STEM de Lewes. Ce projet a été soutenu par un prix d'engagement public APEX de la Royal Society.

### Fabriquer un afficheur plus grand

Si vous envisagez de fabriquer votre propre afficheur à LED  $8 \times 8$ , comme je l'ai fait pour le cube à LED éducatif  $8 \times 8$ , il est toujours intéressant d'utiliser un module MAX7219 prêt à l'emploi. Il suffit de retirer l'afficheur LED embarqué et de souder les connexions pour votre afficheur (figure 7). Vous aurez besoin de faire une matrice de LED avec toutes les anodes câblées à huit rails communs (Note : vous n'avez pas besoin de résistances de limitation de courant) et les cathodes câblées à huit rails communs. J'ai utilisé des tubes de cuivre de 2 mm (plutôt que des tiges ou des fils qui sont beaucoup plus faciles à souder), qui ont été soutenus sur un morceau d'acrylique transpa-

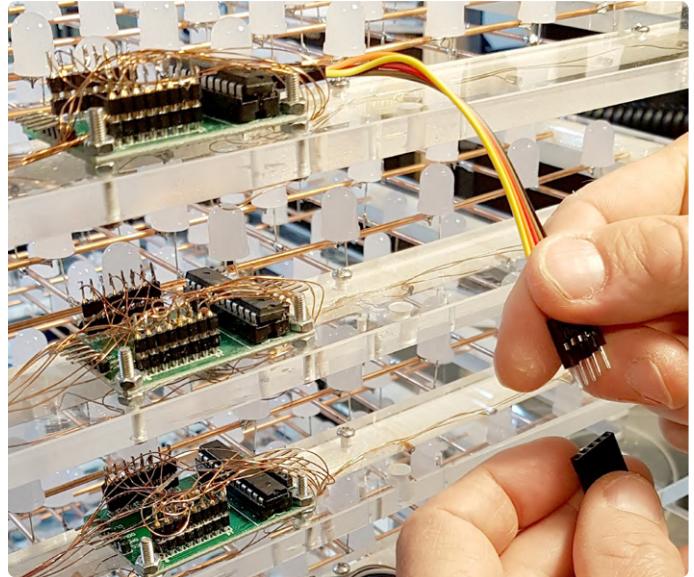


Figure 8. Branchement des modules entre eux.

rent à l'aide de supports imprimés en 3D. Les huit rails d'anode et les huit rails de cathode peuvent être connectés aux broches correspondantes du module avec un fil plus fin. Une fois les 64 LED connectées, connectez les lignes SPI et les connexions d'alimentation (figure 8) et le tour est joué. J'espère que cet article vous incitera à prendre un module MAX7219, à commencer à expérimenter et à vous amuser !

240017-04

### Questions ou commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur (jphcreativescience@gmail.com), ou contactez Elektor (redaction@elektor.fr).

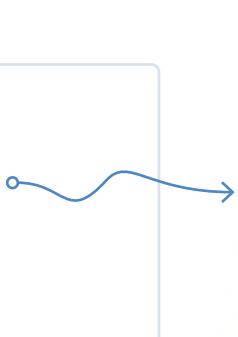


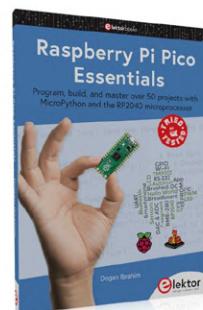
### À propos de l'auteur

Jonathan Hare est un scientifique indépendant et un communicateur scientifique. Lors de son doctorat avec Sir Harry Kroto, il a mis au point une méthode de synthèse de molécules de buckminsterfullerène (C<sub>60</sub>), souvent appelé « football molecule » en raison de sa forme caractéristique. Actuellement, il est chercheur invité au département de chimie de l'université du Sussex, où il est responsable de la sensibilisation et de l'engagement du public. Jonathan a également contribué à plusieurs émissions de la BBC, notamment Rough Science, Coast et Horizon. Passionné de bricolage, il s'adonne aussi au jonglage, à la randonnée, à la radio amateur, à la peinture et, bien sûr, à l'électronique. Pour plus d'informations, vous pouvez consulter son site web [9].



## Produits

- **Dogan Ibrahim, *Raspberry Pi Pico Essentials***  (Elektor, 2021)  
[www.elektor.fr/19673](http://www.elektor.fr/19673)
- **MAX7219 Dot Matrix Module (Set of 8)**  
[www.elektor.fr/18422](http://www.elektor.fr/18422)



## LIENS

- [1] Fiche technique du MAX7219 : <https://tinyurl.com/5n6nbyv6>
- [2] Tensor Game demo : <https://www.youtube.com/watch?v=VaoEBamceXg>
- [3] UART (Wikipedia) : [https://en.wikipedia.org/wiki/Universal\\_asynchronous\\_receiver-transmitter](https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_asynchronous_receiver-transmitter)
- [4] I<sup>2</sup>C (Wikipedia) : <https://en.wikipedia.org/wiki/I%C2%BCC>
- [5] SPI (Wikipedia) : [https://en.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface](https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface)
- [6] Compilateur PIC BASIC : [https://www.crownhill.co.uk/pic\\_basic](https://www.crownhill.co.uk/pic_basic)
- [7] Exemples en Python sur le site de l'auteur : <http://www.creative-science.org.uk/max7219.html>
- [8] Chaîne YouTube de l'auteur : <https://www.youtube.com/@jonathanhare6644>
- [9] Site web de l'auteur : <https://www.zoomscience.co.uk>



**EURO CIRCUITS**

**Rapide et facile pour les services PCB et PCBA d'une seule source**

- Prix immédiat en ligne
- vérification rapide des données
- Commande en ligne avec suivi en temps réel
- livraison rapide

Scanner pour PLUS D'INFOS

# projet 2.0

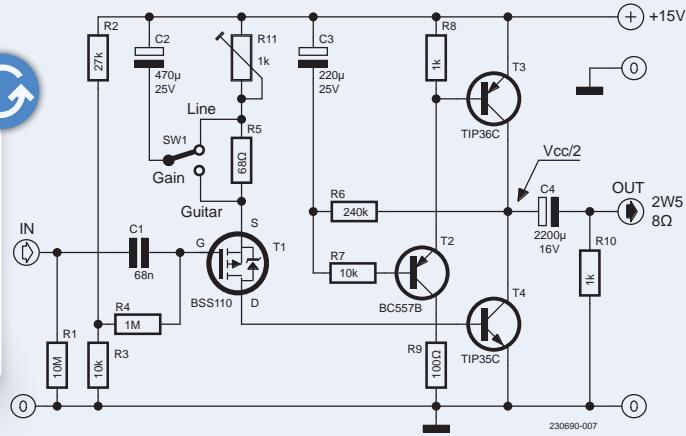
Corrections, mises à jour et courrier des lecteurs

Compilé par Jean-François Simon (Elektor)

## Mini-ampli audio de classe A

**Elektor Circuit Special 2024, p. 32 (230690)**

Sur le schéma, bien que le MOSFET T1 ait été dessiné correctement, les lettres indiquant son drain et sa source ont été accidentellement inversées. Voici le schéma corrigé ci-contre.

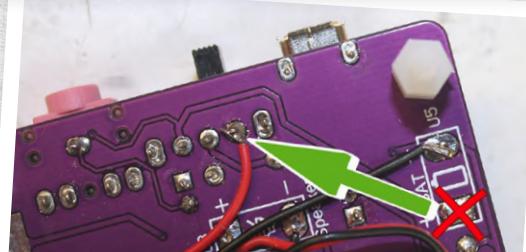


## Une alarme GSM

**Elektor 7-8/2024, p. 34 (230650)**

Voici une mise à jour sur un sujet que j'ai oublié de mentionner dans l'article. Dans de nombreux pays, le réseau 2G/3G est en train de disparaître. En France, l'opérateur Orange a annoncé l'arrêt du service en 2025. SFR et Bouygues ont pour leur part annoncé l'arrêt du service en 2026. Free ne dispose pas de sa propre infrastructure 2G et utilise le réseau Orange en itinérance. Pourtant, certains utilisateurs de Free n'ont déjà plus accès au service 2G. En ce qui me concerne, mon alarme fonctionne toujours. L'option la plus durable est bien sûr de mettre à jour le matériel. J'ai fait quelques recherches sur le modem GLo9 et j'ai trouvé une nouvelle version 4G ([www.google.com/search?q=GLo9+4G](http://www.google.com/search?q=GLo9+4G)). Je ne l'ai pas essayé, mais le nouveau module semble être entièrement compatible avec l'ancien. Une recherche sur les sites chinois habituels devrait permettre d'obtenir un prix plus compétitif.

Pascal Rondane (Auteur de l'article)



## Amélioration d'un kit radio FM

**Elektor Reverse Project E-zine Exclusive #1, June 2024, p. 4 (240196)**

Comme indiqué dans l'article, le kit radio ne protège pas les piles en cas d'utilisation simultanée d'une alimentation USB. Il faut donc retirer les piles lorsque l'on utilise une alimentation USB afin d'éviter de les détruire. Une solution simple mais efficace consiste à connecter le fil plus (rouge) du logement des piles à la broche non utilisée de l'interrupteur d'alimentation (au lieu du connecteur U5, voir la photo ci-jointe). L'inconvénient de cette solution est qu'il n'est pas possible d'éteindre la radio lorsque les deux alimentations sont connectées, mais les piles n'explorseront plus.

E. G. (pays-Bas)

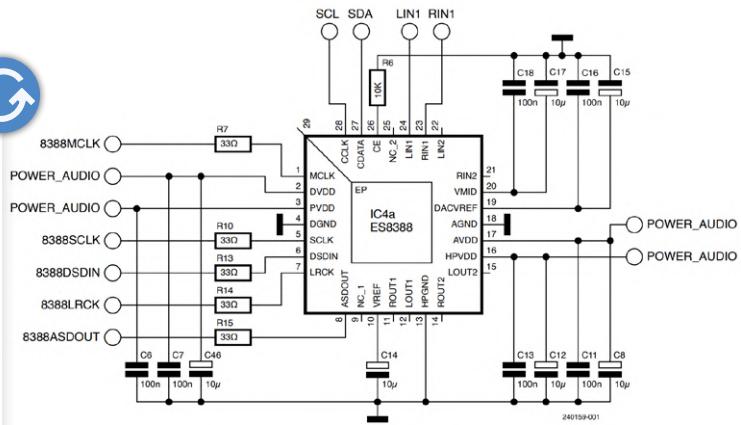
Merci pour cette suggestion sécuritaire !  
Clemens Valens (Elektor)



## Codec audio stéréo pour ESP32 et Cie.

**Elektor Circuit Special 2024, p. 32 (230690)**

Une erreur s'est discrètement glissée dans le schéma et est passée inaperçue, veuillez nous en excuser ! Tous les condensateurs électrolytiques polarisés de la figure 1 ont été dessinés à l'envers. La polarité correcte est indiquée ci-contre. De plus, leur tension nominale de ces condensateurs n'était pas spécifiée dans l'article. Comme le ES8388 est un composant dont la tension nominale est de 3,3 V (au maximum), des condensateurs de 6,3 V ou de 10 V peuvent être utilisés.



## Projet 2.0 - enregistreur universel de données de jardinage / capteurs de station météo

**Elektor 9-10/2024, p. 109 (240397)**

J'ai de nombreuses années d'expérience avec les capteurs météorologiques et je voudrais faire un commentaire. D'après mon expérience, aucun de ces capteurs n'est adapté à la mesure de la quantité de pluie. Ni la détermination du poids de l'eau, ni le comptage des gouttes, ne fonctionnent avec un capteur d'humidité ne fonctionnent bien.

Le capteur d'humidité avec un circuit en forme de peigne est idéal pour détecter le brouillard, l'humidité, la neige et le début de la pluie. Cependant, un chauffage doit être installé sur la face inférieure pour sécher à nouveau le capteur. De petites résistances, qui sont alimentées pendant un certain temps lorsqu'une précipitation est détectée, suffisent largement.

Un capteur à godet basculant est la méthode de choix pour mesurer les précipitations. Lorsqu'un côté est rempli, il bascule, émettant une impulsion, et l'autre côté peut se remplir via l'entonnoir. Cela permet également de ne pas perdre de pluie. En hiver, l'entonnoir avec le mécanisme de basculement doit bien sûr être chauffé pour que la neige fonde, et pour éviter au mécanisme de geler. Des films

chauffants, comme ceux que l'on trouve pour les rétroviseurs des voitures, conviennent parfaitement pour cela. Par ailleurs, ces détecteurs à godets basculants sont également disponibles auprès de différents revendeurs dans le monde entier.

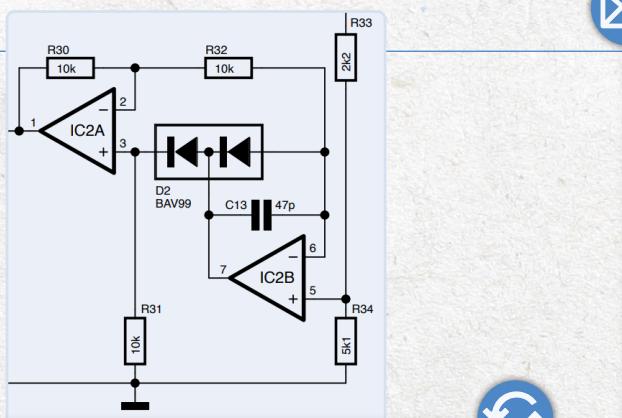
Helmut Bayerlein (Allemagne)

Merci beaucoup pour vos commentaires. Vos idées concernant le chauffage des capteurs en hiver seront utiles à de nombreux lecteurs. Personnellement, je n'ai jamais utilisé de capteurs de pluie de type « godet basculant » : vos commentaires sur leur efficacité sont évidemment bienvenus ! Je pense que le capteur mentionné par Wim Sanders dans le dernier numéro, illustré ci-contre dans le boîtier en plastique gris clair, utilise aussi un godet basculant en interne. Des photos de ses éléments internes sont disponibles sur Internet.

Jean-François Simon (Elektor)



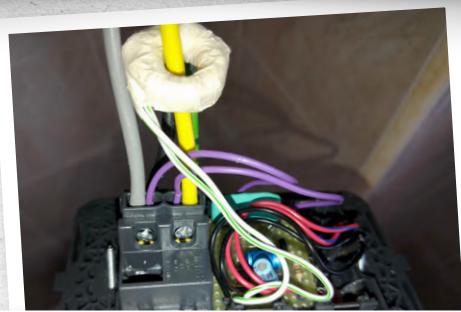
Avez-vous des idées ou des commentaires ?  
Vous avez une idée brillante ou un retour d'information précieux pour Elektor ?  
Contactez-nous à l'adresse  
redaction@elektor.fr. Nous sommes heureux d'avoir de vos nouvelles !



## Un générateur analogique 1 kHz

**Elektor 7-8/2024, p. 89 (230704)**

Une erreur est apparue en redessinant les schémas. La connexion à droite de R32 est reliée à l'entrée inverseuse de IC2B. Voir l'extrait du schéma corrigé ci-dessus. Le schéma Eagle et l'implantation de la carte sont corrects et ne nécessitent aucune modification.



## Contrôle à distance du chauffe-eau

**Elektor Circuit Special 2024, p. 50 (240039)**

Selon le schéma, le fil de phase passe au travers de la bobine de mesure du courant. Dans la figure 4, on peut voir un fil vert/jaune (conducteur de protection) être utilisé. Si la réglementation électrique italienne autorise ceci, il convient de l'indiquer dans le texte.

Dieter Becker (Allemagne)

Je vous remercie pour votre courriel. J'ai revérifié la photo en question (voir ci-contre) et j'ai remarqué une situation inhabituelle : un fil jaune (uniquement) apparaît devant un autre fil vert/jaune situé derrière lui. Si vous zoomez sur l'image, vous remarquerez clairement les deux fils séparés qui n'apparaissent pas aussi bien sur l'édition imprimée du magazine. Le fil vert/jaune est relié à un connecteur de terre isolé situé derrière l'interrupteur.

Pour des utilisations exceptionnelles ou des fonctions de signalisation, l'utilisation de la couleur jaune (parmi d'autres couleurs) pour la phase est autorisée en Italie. Comme vous l'avez correctement indiqué, l'utilisation d'un fil jaune/vert (conducteur de terre) pour transporter la phase est, bien entendu, interdite. J'espère que cela vous aidera !

Roberto Armani (Elektor)



## Antenne magnétique à large bande pour les grandes ondes

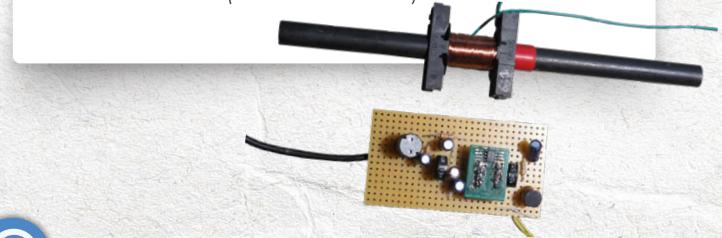
**Elektor 9-10/2024, p. 28 (220073)**

Je ne pense pas que 20 tours de fil suffisent pour réaliser une antenne ferrite en grandes ondes. En fait, sur l'image (Figure 6), il semble que ce soit beaucoup plus (200 tours ?) Pourriez-vous fournir une confirmation ou un rectificatif ?

Yves Georges (France)

Dans une antenne ferrite ordinaire, la tension augmente avec le nombre de spires, et c'est la tension qui est le paramètre intéressant. Souvent un circuit résonnant LC est utilisé avec un amplificateur à haute impédance d'entrée. Dans mon antenne, la bobine alimente un amplificateur à transimpédance. Cela signifie que la bobine de l'antenne est effectivement court-circuitée et que le courant est le paramètre important. Si vous augmentez le nombre de spires, l'impédance L augmente et le courant diminue. Il n'est donc pas utile d'augmenter le nombre de tours. J'ai expérimenté, et j'ai trouvé qu'un nombre de 20 à 30 était le nombre optimal. Il semble qu'il y ait plus de tours sur la photo puisque j'ai utilisé du fil de Litz (30 brins de 0,1 mm en parallèle).

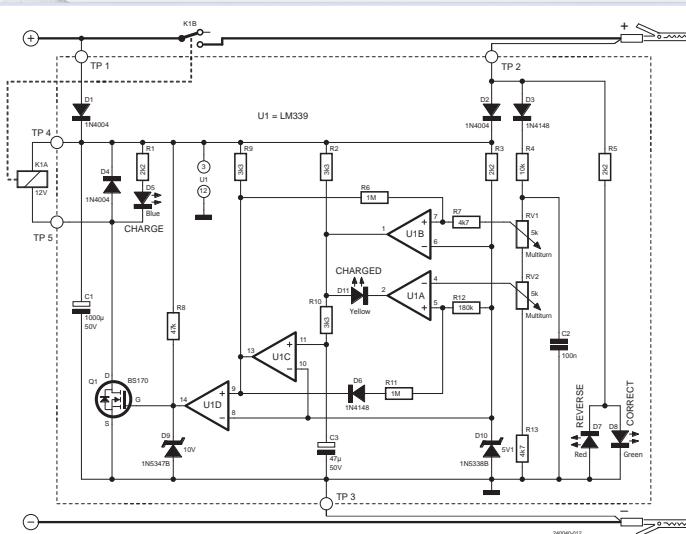
Martin Ossmann (Auteur de l'article)



## Cure de jouvence pour votre vieux chargeur (Partie 2)

**Elektor Circuit Special 2024, p. 83 (240040-B)**

Dans le schéma de la Figure 1, nous avons oublié d'annoncer les points de test TP1 à TP5 mentionnés dans le texte. Nos excuses pour cette omission, et nous remercions les lecteurs qui nous l'ont signalée. Les points de test ont été ajoutés au schéma ci-dessous.



VF : Laurent Rauber — 240475-04

# REJOIGNEZ NOTRE COMMUNAUTÉ

TELECHARGEZ GRATUITEMENT



Abonnez-vous maintenant à [elektormagazine.fr/ezine-24](https://elektormagazine.fr/ezine-24)





# gants vibro-tactiles

une avancée pour les patients de Parkinson

Hans Van Essen (Pays-Bas)

Ce projet est né suite au triomphe de Hans van Essen lors concours Elektor Labs 2024 Project Contest [1], où ses gants VibroTactile pour les patients de Parkinson ont impressionné le jury par leur approche innovante de l'amélioration des troubles motrices grâce à la technologie de stimulation vibro-tactile. Conçus spécifiquement pour les patients atteints de la maladie de Parkinson, ces gants utilisent améliorer efficacement la motricité. En agissant sur les bout des doigts, ces gants offrent un soulagement, révolutionnant la gestion des difficultés motrices associée à la maladie de Parkinson.

Après qu'un proche a été diagnostiqué avec la maladie de Parkinson, je me suis engagé dans le développement d'un ensemble de gants vibrotactiles, inspiré par les recherches par Peter A. Tass [2]. Il est établi que chez les patients de Parkinson, les cellules du cerveau présentent une sorte de synchronisme. Lorsque certains neurones sont activés, par exemple durant des actions comme la marche, les neurones adjacents s'activent également, entraînant des mouvements involontaires. Cette synchronisation peut gravement altérer la fonction motrice, rendant même la marche impossible pour certains patients.

## Solution

La recherche a démontré que la stimulation de ces zones cérébrales selon un schéma précis peut « désynchroniser » les neurones, leur permettant ainsi de fonctionner de manière indépendante et d'améliorer notamment la motricité des patients. Bien que certains choisissent des implants cérébraux invasifs pour obtenir cette stimulation, les recherches évoquées révèlent que la stimulation des extrémités sensibles des doigts peut produire des effets bénéfiques similaires. Des séances pouvant durer jusqu'à quatre heures par jour ont permis d'obtenir des améliorations significatives, comme le rapporte un article de NBC Today [3].



Figure 1. Un des doigtiers.

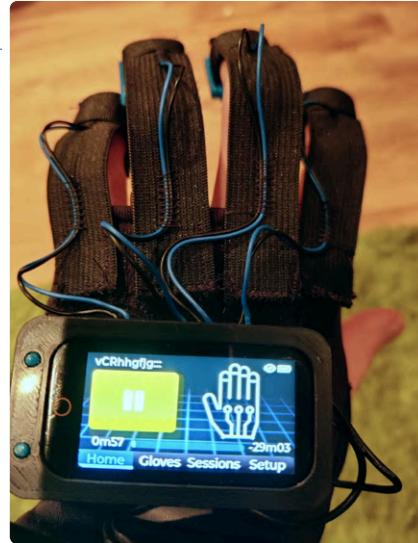


Figure 2. L'interface tactile avec les deux boutons matériels également visibles à gauche.

Comme le démontre la vidéo de mon prototype [4], les gants émettent des impulsions aléatoires via des pads spéciaux (**figure 1**) placés sur les bouts des doigts durant le traitement. Ces impulsions sont générées de manière aléatoire pour chaque doigt avec une gigue aléatoire, toutefois, il est crucial de maintenir une synchronisation entre les deux mains. Les deux mains et leurs doigts correspondants doivent recevoir le même rythme aléatoire synchronisé.

## Mon projet

Le matériel utilisé au cours de la recherche comprenait un contrôleur externe encombrant avec des bandoulières et de nombreux câbles menant aux mains, ce qui nuisait considérablement à la qualité de vie, comme illustré dans la vidéo de NBC. En revanche, les gants que j'ai développés présentent de nombreux avantages :

- Ils sont sans fil. Des piles situées au poignet assurent une autonomie de quatre jours au moins avec une recharge via USB-C.
- Un écran tactile placé sur le dos de la main (**figure 2**) permet de contrôler toutes les fonctions – démarrage/arrêt, paramètres et suivi de l'utilisation.
- La synchronisation est précise, car, bien que la stimulation soit aléatoire, elle est coordonnée entre les mains. Les gants maintiennent une synchronisation à 320 µs près grâce au protocole sans fil ESP-NOW et à une version adaptée de NTP (Network Time Protocol).
- Ils sont compatibles BLE (Bluetooth Low Energy), ce qui permet aux utilisateurs de suivre les paramètres, les niveaux de piles et les sessions d'utilisation via une application pour smartphone.

Ce projet a rassemblé plusieurs disciplines, notamment la CAO, l'impression 3D, la conception de circuits, la conception de circuits imprimés, l'utilisation d'une carte ESP32, et un développement approfondi du micrologiciel en C++ pour l'ESP, y compris le contrôle des pilotes d'affichage (et même l'intégration dans Home Assistant). L'objectif initial était de concevoir des gants que mon proche puisse porter lors d'activités quotidiennes telles que promener le chien ou cuisiner, sans les désagréments liés aux câbles et à un contrôleur encombrant lui permettant ainsi de mener une vie plus « normale ». Le projet respecte également l'objectif 3 des objectifs de développement durable [5], à savoir « la santé et le bien-être ».

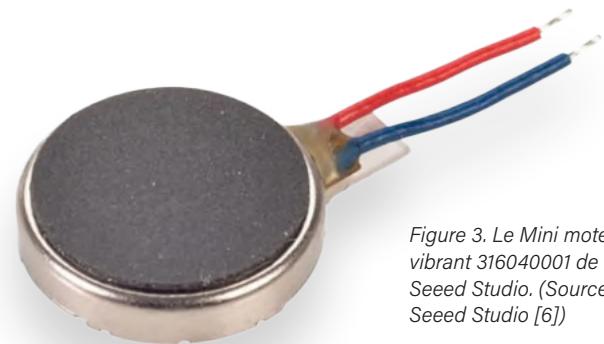


Figure 3. Le Mini moteur vibrant 316040001 de Seeed Studio. (Source : Seeed Studio [6])



**Attention : Consultez toujours un neurologue avant de mettre en œuvre celle conception. Ni l'auteur ni Elektor ne sauraient être tenus responsables des éventuels dommages ou blessures résultant de l'utilisation de ce dispositif.**

## Fonctionnement interne

La théorie qui sous-tend ces gants est qu'en stimulant le bout des doigts par de faibles vibrations, ces stimuli atteindront le cerveau via le système nerveux, induisant une désynchronisation des neurones « bloqués ». Créer des vibrations sur les bouts des doigts semble assez simple. Pour ce faire, j'ai utilisé un moteur vibrant pour chaque doigt, en particulier le 316040001 Mini Vibration Motor de Seeed Studio (**figure 3**) [6]. Ces moteurs sont des moteurs pour circuit imprimé, fonctionnent grâce à un petit contrepoids qui, en tournant, génère des vibrations. Le principe est simple : dès que le moteur est alimenté en tension, il se met à vibrer.

## Au cœur du gant

Le cœur de ces gants consiste en deux cartes Lilygo T-Display-S3 [7], visibles le prototype finalisé (**figure 4**). Ces cartes intègrent un écran TFT couleur de 1,9 pouce avec un capteur tactile capacitif. Le Lilygo est animé par un ESP32-S3, ce qui offre une grande puissance de traitement et de la mémoire pour notre application - nous devons juste surveiller la consommation énergétique. L'ESP32 est doté du Wifi et BLE, ce qui permet de se connecter à des smartphones ou à des réseaux Wifi. L'utilisation de l'interface Wi-Fi joue



Figure 4. Le prototype terminé.

un rôle crucial dans notre système, que je détaillerai ultérieurement. Un autre élément intéressant de la carte Lilygo est le chargeur de pile LiPo intégré, essentiel pour maintenir la portabilité et l'autonomie des gants. Le chargeur utilise le connecteur USB-C intégré pour recharger le LiPo, rendant le processus de recharge aussi simple que celui d'un smartphone.

### Construction : les bouts des doigts

Nous avons en main tous les composants essentiels : microprocesseur, écran tactile, chargeur USB, piles LiPo, moteurs vibrants... Quels pourraient être les obstacles ? En réalité, ils sont nombreux. Tout commence au bout des doigts. Lors des premières étapes du développement, mon objectif était de rendre les gants aussi confortables que possible. J'ai choisi des gants de course du commerce et j'ai essayé d'intégrer mes petits moteurs. L'enjeu était de fixer ces petits moteurs aux gants de sorte qu'ils demeurent précisément au même endroit sur chaque doigt.

J'ai découpé des ouvertures dans les doigts des gants pour y insérer les moteurs et j'ai essayé de les fixer par couture. Cette méthode échouait - en enfantant les gants, la pression exercée déplaçait les moteurs, endommageant les fils de connexions délicats.

Je me suis ensuite tourné vers une solution apparemment fiable - la colle chaude. J'ai collé les moteurs sur des morceaux de bande Velcro, que j'ai ensuite enroulées autour des doigts. Cela semblait être une bonne solution. Mais, les vibrations des moteurs continuaient à rompre les fils, provoquant régulièrement des pannes de moteur, le meilleur ne survivant que trente minutes. Nous voilà donc confrontés à un problème récurrent : comment assurer la durabilité des moteurs face à l'intensité des vibrations ?

Retour à la planche à dessin. Je devais trouver un moyen de fixer ces petits fils fragiles. C'est là que l'idée de créer des doigtiers personnalisés imprimés en 3D a émergé. Cela a permis de résoudre trois problèmes à la fois :

- En incorporant une petite cavité dans le design des embouts des doigts et en encastrant les moteurs au ras de la cavité, nous avons considérablement amélioré le confort.
- Les fils du moteur sont désormais complètement protégés, cheminant à travers des canaux prévus à l'intérieur du doigtier (**figure 5**), se connectant aux fils d'extension en silicium plus grands. À l'intérieur du doigtier se trouve un espace où ces fils sont soudés ensemble. Cette cavité est ensuite remplie de colle. Cette approche garantit que les moteurs et leurs fils fragiles sont

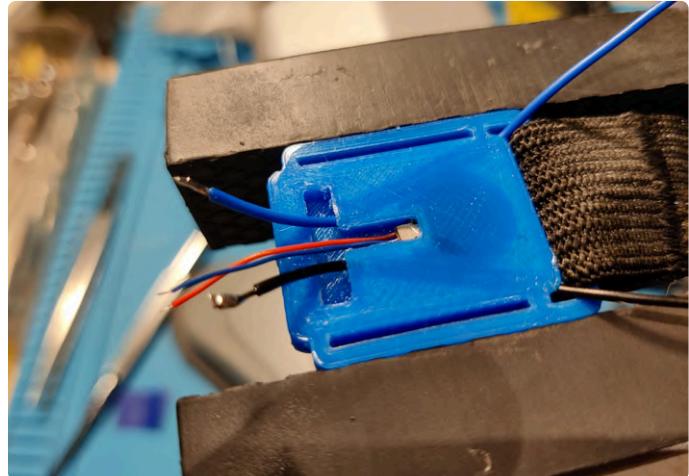


Figure 5. L'intérieur d'un doigtier.

entièrement encapsulés dans la colle, formant ainsi un seul bloc solide et durable. Les vibrations ne causeront plus la rupture des fils.

- Pour adapter le doigtier à la taille du doigt du porteur, nous avons utilisé du ruban Velcro enroulé autour de poignées spécialement conçues sur le doigtier (également visibles sur la figure 5), assurant une bonne tenue pour les différentes parties des gants.

### Construction : les piles

Les gants utilisés sont des modèles de course ordinaires. Ils ne sont pas très épais et sont confortables à porter. J'ai découpé les doigts et conservé la partie de la main (**figure 6**). J'ai opté pour un design où le contrôleur est placé sur le dos de la main, et la pile sur le poignet. Cela permet d'intégrer deux piles LiPo 18650 en parallèle. J'ai utilisé des cellules placées dans un porte-pile plutôt que dans une pochette LiPo, de sorte que vous pouvez remplacer les cellules par des cellules nouvellement chargées en cas d'indisponibilité de recharge.



Figure 6. Vue du côté de la paume.

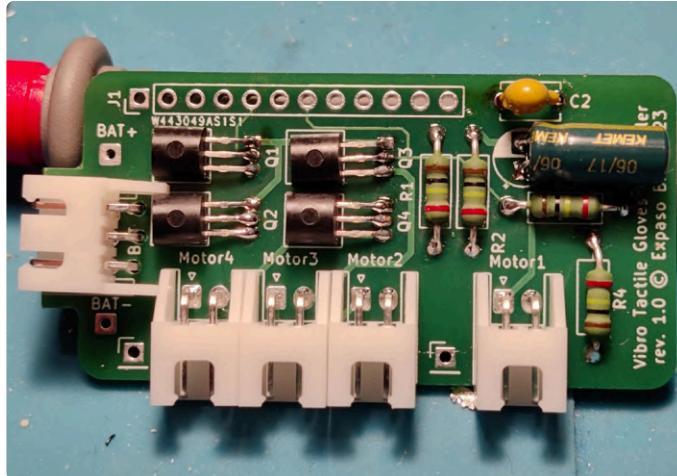


Figure 7. Le circuit imprimé personnalisé que j'ai conçu et fait fabriquer par PCBWay.

Le porte-pile est « plié » dans la manche du gant pour éviter les bords tranchants. Vous pouvez également utiliser une seule pile 18650, réduisant de moitié le poids de la pile et rendant l'ensemble moins encombrant.

L'autonomie des gants dépend de la capacité des piles. Avec des cellules de grande capacité, les gants peuvent fonctionner jusqu'à 16 heures consécutives avec une seule pile par gant, permettant jusqu'à quatre jours d'utilisation si utilisés quatre heures par jour. L'utilisation de deux de ces piles par gant double cette durée, atteignant huit jours d'autonomie.

En observant le circuit imprimé personnalisé du contrôleur (voir **figure 7**), vous pouvez voir le connecteur de pile JST sur le côté gauche. Cela vous permet de déconnecter complètement la pile lorsque les gants sont stockés pendant de longues périodes, évitant ainsi que le contrôleur ne décharge lentement les piles. Le contrôleur de charge de la Lilygo n'empêchera pas cela. L'utilisation de piles protégées est conseillée. Consultez une sélection de types de piles au lien [8]. Le fait de porter ces piles près du corps souligne l'importance d'utiliser des piles protégées pour se prémunir contre tout risque de surchauffe.

### Construction : le contrôleur

Le cœur de ce projet se trouve le Lilygo T-Display-S3, équipé d'un écran tactile. L'écran dispose de plusieurs broches de connexion sur l'écran. J'ai conçu un petit circuit imprimé qui s'adapte parfaitement à ces broches, formant un ensemble compact (**figure 8**). Ce circuit imprimé comprend les connecteurs JST pour la pile, les moteurs sur les bouts des doigts, et quelques circuits de tamponnage.

Notre carte électronique peut sembler ordinaire. Si vous observez les schémas (**figure 9**), vous verrez deux condensateurs (C1 et C2). Parce que nous utilisons des moteurs à impulsions, le bruit sur les lignes d'alimentation est élevé, en particulier lorsque les piles sont faibles. C2 filtre les fréquences élevées, tandis que C1 est utilisé pour atténuer les courants de démarrage élevé lors de l'activation d'un moteur, stabilisant ainsi la tension du contrôleur. Bien que le Lilygo dispose d'un petit condensateur à côté du processeur pour stabiliser son alimentation, le découplage de ces parties du circuit est essentiel.

La prochaine étape est la mise en mémoire tampon des signaux de sortie vers les moteurs. Alimenter directement les moteurs à partir des broches de sortie du processeur serait imprudent en raison des courants impliqués. Nous utilisons donc des MOSFET externes. Q1 à Q4 sont des MOSFET 2N7000, intègrent une diode de corps qui court-circuitera la FEM arrière provenant des moteurs. La CEM inverse est générée lorsqu'un moteur est déconnecté de son alimentation.

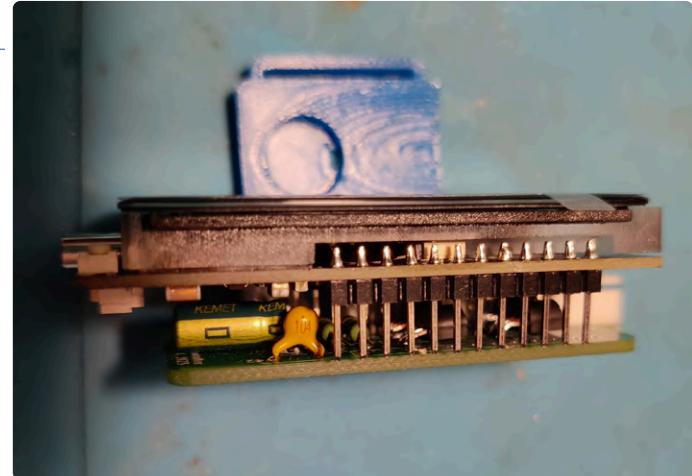


Figure 8. Comment ma carte personnalisée et le Lilygo sont assemblés.

Le champ magnétique existant autour des bobines s'effondre soudainement, générant une tension opposée à la tension d'alimentation. Cette tension négative pourrait potentiellement endommager les broches du microcontrôleur ou du MOSFET, d'où l'importance de cette diode pour court-circuiter cette tension négative à des niveaux sécurisés. Comme la plupart des diodes de corps ne sont pas conçues pour cette tâche, l'ajout d'une diode Schottky rapide séparée en tant que diode flyback parallèle au moteur serait encore plus sécurisant.

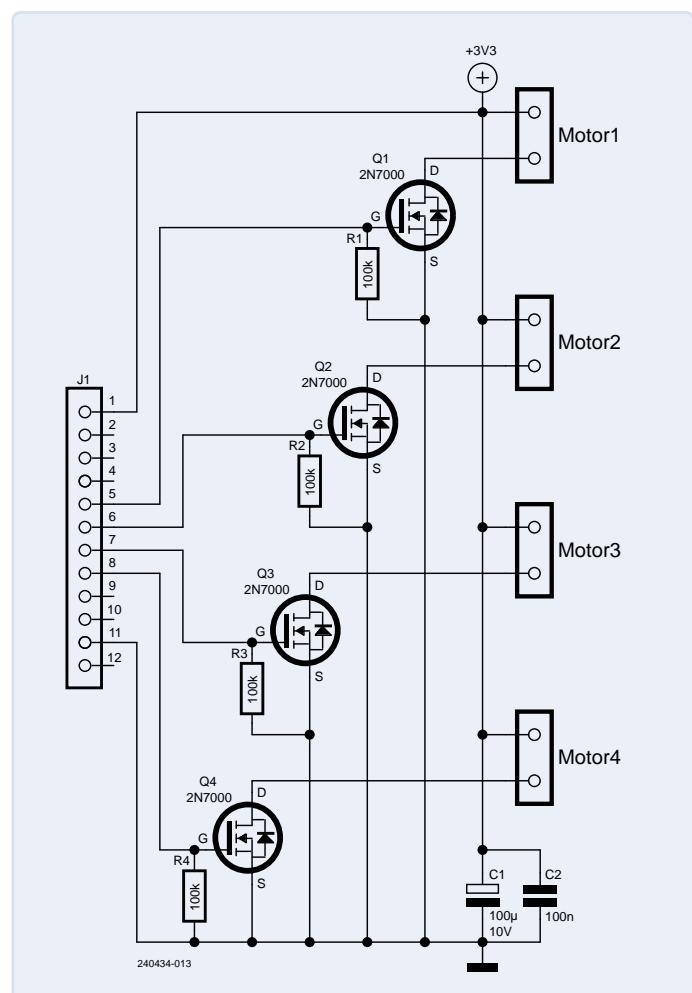


Figure 9. Les condensateurs C1 et C2 lissent la puissance.

Nous avons ajouté une résistance pull-down de  $100\text{ k}\Omega$  entre la grille et la masse de chaque MOSFET. Ces résistances tirent les grilles des MOSFET vers le bas, garantissant qu'aucun moteur ne s'active par erreur si le microcontrôleur n'envoie pas de commande. Il ne s'agit pas d'une précaution, mais d'une nécessité. Lors du démarrage du processeur, la plupart de ses broches sont dans un état de haute impédance, laissant la grille des MOSFET flottante, activant les moteurs de manière aléatoire.

Lorsque les gants sont inutilisés, le processeur entre en mode basse consommation. Cet état désactive la plupart des composants du processeur et interrompt la commande de ses broches. Une simple résistance permet d'obtenir un état OFF fixe lorsqu'aucune broche n'est active.

La valeur de  $100\text{ k}\Omega$  semble élevée, mais ce choix vise à trouver un équilibre entre la consommation de la pile et le rôle de la résistance (tirage vers le bas). Lorsqu'une résistance pull-down est utilisée, il faut fournir davantage de courant, pour la tirer vers le haut en cas de besoin, ce qui crée un appel de courant plus important.

Le reste du circuit est utilisé pour positionner tous les connecteurs JST aux bons emplacements. J'aurais pu utiliser des CMS pour minimiser l'épaisseur, mais les composants traversants rendent le montage plus accessible et donnent du corps au circuit. Les fichiers du circuit imprimé sont disponibles sur la page de ce projet sur Elektor Labs [9], mais vous pouvez le concevoir vous-même.

J'ai commandé une série de dix circuits imprimés personnalisés à PCBWay. Le résultat est excellent et les cartes sont impressionnantes. Puisque nous commutons des charges DC, il est judicieux de torsader les fils reliant la carte de contrôle aux moteurs. Ceci permet de réduire le bruit émis par ces derniers. Pour éviter les problèmes d'interférence électromagnétique, vous pouvez également utiliser de petites billes de ferrite.

## Construction : le logiciel

Voici maintenant le clou du spectacle ! En tant que développeur de logiciels passionné, cette phase du projet où je pouvais enfin coder était particulièrement exaltante pour moi.

L'objectif principal de la conception était : pas de fils encombrants. Cela signifie que vous avez deux gants, tous deux contenant un matériel identique. Selon l'étude de Peter A. Tass, la génération d'impulsions était gérée de la manière suivante :

*Des séquences de stimuli vibratoires (avec une fréquence de vibration de 250 Hz et une durée de 100 ms) ont été délivrées à un rythme de 1,5 Hz, correspondant à un cycle de 667 ms (Tass, 2017 ; Syrkin-Nikolau et al., 2018 ; Pfeifer et al., 2021). Au cours d'une séquence, chaque bout de doigt des doigts un à quatre était stimulé exactement une fois, où les deux mains étaient stimulées en miroir. L'ordre des séquences variait de manière aléatoire. Les intervalles inter-stimulus étaient constants (pour un vCR [vibrotactile coordinated reset] régulier) ou sujets à une gigue modérée (pour un vCR bruyant) »*

En pratique cela signifie que nous avons des cycles de 667 millisecondes, dans lesquels chaque doigt (à l'exception du pouce) est stimulé par une vibration pendant 100 ms. Il reste donc  $667 - (4 \times 100) = 267$  ms d'intervalle entre les stimulations, un temps non uniformément distribué mais modulé pour créer une variation, ou «jigue» Cette gigue est

ensuite appliquée aléatoirement à chaque séquence. De plus, l'ordre de stimulation des doigts varie aléatoirement par séquence, mais tout en maintenant une symétrie parfaite entre les deux mains. De plus, nous avons également dû utiliser un signal PWM pour varier l'intensité de vibrations des moteurs.

Gérer les comportements imprévisibles des gants présente un véritable défi. Ils doivent fonctionner de manière synchronisée et coordonnée. Cela est quasiment impossible sans un moyen de communication entre les deux gants.

Initialement, j'envisageais de connecter les gants à une application pour smartphone via Bluetooth Low Energy (BLE). L'application aurait préparé et envoyé toutes les séquences nécessaires pour une session, déclenchant simultanément le bouton de lecture. Le problème est que le stockage de milliers de séquences nécessaires pour une session de quatre heures exige une mémoire élevée, et le risque de désynchronisation à cause de la dérive était trop élevé.

J'ai donc finalement opté pour une connexion directe entre les gants en utilisant ESP-NOW. Ce protocole de communication sans fil personnalisé est développé par Espressif [10] et pris en charge par la plupart de leurs contrôleurs. Le protocole ressemble au Wifi et utilise le même matériel, mais il est beaucoup plus simple et déterministe. Le plus grand avantage est qu'il ne nécessite pas de point d'accès Wifi - la communication est basée sur les adresses MAC, facilitant ainsi la communication. Lorsque les gants fonctionnent, chaque séquence qu'ils doivent « jouer » sur les moteurs est calculée en amont et envoyée à l'autre gant de manière primaire/secondaire. Les deux gants jouent la séquence et, pendant ce temps, le gant primaire calcule et envoie la séquence suivante juste à temps au gant secondaire, avec une heure de démarrage précise.

Une fois la séquence en cours terminée, les deux gants sont au courant de la séquence suivante et son temps de début exacte. Ils attendent tous deux cet « horodatage » et commencent simultanément à exécuter la nouvelle séquence tout en préparant la séquence suivante. C'est ainsi que les gants gèrent les séquences de manière aléatoire, tout en restant parfaitement synchronisés l'un avec l'autre.

Le gant secondaire calcule également de nouvelles séquences, mais ne les utilise pas s'il ne reçoit pas à temps la nouvelle séquence à exécuter du gant primaire. Cela peut se produire lorsque la communication sur la bande de 2,4 GHz est perturbée par des micro-ondes ou des interférences similaires - une situation courante si vous vous déplacez dans votre cuisine en portant ces gants. En cas d'interférence, les deux gants seront à nouveau synchronisés dans un délai de 700 ms. Quant à la synchronisation des temps de début pour chaque séquence, j'ai envisagé de connecter une horloge en temps réel (RTC) ou un quartz au contrôleur pour créer une source de temps fiable et permanente. Cependant, cela augmenterait le nombre de composants et ne conviendrait pas à ce projet. (Cela pourrait cependant être réalisé en choisissant des CMS au lieu de traversants).

J'ai donc opté pour une solution intermédiaire : les gants n'ont pas besoin de connaître l'heure, mais seulement de se mettre d'accord sur « un » moment, par exemple le nombre de microsecondes écoulées depuis la mise sous tension. C'est cette valeur qui est transmise toutes les secondes par le gant principal au gant secondaire, avec une mesure du temps d'aller-retour (RTT) entre les gants. Le gant secondaire reçoit les données du temps et ajoute la moitié du RTT à ce temps, calibrant ainsi sa propre horloge.



Figure 10. Utilisation de SquareLine pour concevoir l'interface utilisateur.

Après de nombreuses modifications et mises au point, cette méthode (qui est une adaptation du protocole NTP) garantit que les horloges internes des gants sont synchronisées à 320  $\mu$ s près ! Soit une précision de moins d'un tiers de milliseconde, ce qui est suffisante pour atteindre notre objectif.

Nous avons surmonté la plupart des défis techniques. Il ne reste plus qu'à finaliser l'interface utilisateur. Je ne détaillerai pas ici les complexités rencontrées pour développer un nouveau pilote d'affichage et de tactile, mais je souligne que la documentation disponible était insuffisante. Les exemples de code disponibles étaient souvent incomplets ou basés sur des versions obsolètes de frameworks.

Après des semaines de travail intensif sur du code C++ de bas niveau, impliquant un décalage constant de bits et un comptage d'octets, j'ai ressenti le besoin de me donner une pause mentale. Pour l'interface utilisateur, je voulais quelque chose de plus facile, et j'ai donc choisi d'utiliser LVGL (Light and Versatile Embedded Graphics Library) [11], une bibliothèque graphique embarquée complète, idéale pour créer des interfaces tactiles intuitives.

Pour simplifier encore le développement, je me suis tourné vers SquareLine Studio [12], un éditeur WYSIWYG (*what-you-see-is-what-you-get*) qui génère le code de l'interface utilisateur. Vous pouvez voir mon design SquareLine en cours dans la **figure 10**.

Grâce à ces outils, le développement d'une « application logicielle » ressemblait davantage à la création d'un logiciel de bureau. J'ai pu définir tous les aspects techniques, créer des scénarios d'utilisation pour l'interface utilisateur et implémenter différents menus, boutons, écrans et paramètres. Tous ces éléments sont synchronisés entre les gants via le protocole de communication ESP-NOW utilisé.

Le Bluetooth est ainsi disponible, prêt à être utilisé pour connecter les gants à votre smartphone ! Bien que j'aie commencé à développer une application de base, je n'ai pas encore intégré de nombreuses fonctionnalités, car je ne savais pas à ce moment-là si les gants fonctionneraient comme prévu. L'excitation du projet m'a certes emporté.

## Construction : alimentation par piles

C'était une première pour moi d'utiliser des piles pour alimenter l'ESP32. L'ESP32 peut être très gourmand en énergie, j'avais donc besoin de réduire cette consommation. Afin de préserver les piles pendant la période où les gants ne sont pas utilisés, je voulais activer un mode de sommeil prolongé. Pour y parvenir, j'ai pris ces mesures :

- Éteindre le rétroéclairage.
- Éteindre le contrôleur d'écran.
- Régler la puce de l'écran tactile sur un mode de consommation plus faible.
- Mettre le processeur en veille.

Heureusement, en étudiant les schémas du contrôleur Lilygo, j'ai remarqué que les concepteurs avaient optimisé le design pour minimiser le courant de fuite.

L'architecture du contrôleur limite l'utilisation des résistances de tirage (pull-ups et pull-downs). Celles utilisées sont de valeurs élevées, telles que 100 k $\Omega$ . Même le circuit de détection de la tension de la pile, qui utilise un diviseur de tension à résistance, est lié à une broche IO qui peut être désactivée, permettant ainsi de « débrancher » la résistance supérieure du diviseur de tension pour minimiser les fuites à travers ce diviseur. Cela démontre une approche très réfléchie !

L'ESP32 vous permet de mettre hors tension un grand nombre de ce que l'on appelle les « domaines de puissance », ou composants discrets de la puce. Cela permet de réduire encore davantage la consommation d'énergie. Il dispose même d'un coprocesseur ultra-basse consommation (ULP) spécial, permettant d'éteindre complètement le processeur normal, y compris sa mémoire et tous ses composants associés, tout en continuant à détecter les signaux sur certaines broches d'E/S. Grâce à ces astuces, j'ai réussi à réduire la consommation de courant en mode sommeil prolongé à seulement 390  $\mu$ A. Cette faible valeur signifie que les piles pourraient durer des années sans se vider totalement.

Néanmoins, une simple appui sur l'un des boutons suffit pour activer le contrôleur et les gants - ce qui est idéal pour répondre à nos exigences. Les gants surveillent en permanence la tension de la pile. Si cette consommation tombe en dessous d'un certain seuil, les piles sont considérées comme déchargées, et le contrôleur procède à l'arrêt de toutes les fonctionnalités possibles pour économiser l'énergie. La pile peut être rechargée via USB-C.

## Utilisation

L'utilisation des gants est assez simple. Il suffit de les enfiler et d'appuyer soit sur le grand bouton *Play* de l'interface utilisateur, soit sur le bouton matériel supérieur (voir figure 2).

La navigation dans l'interface utilisateur se fait facilement en glissant vers la gauche ou la droite, permettant ainsi d'accéder aux divers éléments tels que les informations sur la session en cours, le temps restant, les sessions précédentes, le niveau de la batterie, la connectivité entre les gants, ainsi que divers prérglages et options disponibles. Pour optimiser la durée de vie de la pile, le rétroéclairage s'éteint automatiquement après 30 secondes, même lorsque les gants sont encore en fonctionnement. Un simple tapotement sur l'écran permet de rallumer le rétroéclairage.

Une fois le minuteur de la session écoulé, les gants s'arrêtent automatiquement, en fonction du prérglage. Ils entrent également en veille profonde automatiquement après cinq minutes d'inactivité, c'est-à-dire lorsqu'ils ne détectent aucune pression sur les boutons. Vous pouvez également forcer cette mise en veille en appuyant sur le bouton matériel inférieur et en le maintenant enfoncé. Les gants s'éteignent alors. Pour les réactiver, il suffit d'appuyer sur le bouton matériel inférieur. Des icônes sur l'écran indiquent le niveau de la pile. Lorsqu'il est temps de recharger, il suffit de brancher un câble de chargeur USB-C sur le côté du dispositif. Le chargement s'interrompt automatiquement une fois la pile pleine.

Si le contrôleur détecte une tension de piles trop faible, il s'éteindra automatiquement et passe en mode de veille pour préserver l'autonomie restante des piles.



Pendant la charge, les gants restent fonctionnels, ce qui permet de les utiliser, durant cette période, par exemple en lisant un livre. Ce port USB-C est également utilisé pour charger un nouveau micrologiciel.

## Regarder vers l'avenir

Ce projet a été une incroyable aventure, et j'ai trouvé chaque étape passionnante et enrichissante.

Envoyer des signaux aléatoires directement dans le cerveau n'est pas une pratique à prendre à la légère. Il faudra encore plusieurs années de recherche pour confirmer la sécurité de cette méthode. Comme ces gants sont basés sur des recherches préliminaires, je n'ai pas le droit de dire s'ils fonctionnent ou non, ou s'ils peuvent être utilisés en toute sécurité. Par conséquent, utilisez ces gants à vos risques et périls et consultez toujours votre neurologue. Ne commencez ou n'arrêtez jamais une forme de médicament ou une autre intervention sans consulter votre médecin ou votre neurologue.

Mais, au moins, ce projet ouvre des perspectives prometteuses. J'espère que ces gants seront disponibles et pourront aider ma tante si son état se détériore.

En outre, il serait formidable que les travaux de Peter A. Tass contribuent à terme à améliorer la qualité de vie des personnes souffrant de la maladie de Parkinson.

Je suis reconnaissant d'avoir pu contribuer, même modestement, à offrir une aide concrète plutôt que de rester impuissant face aux effets dévastateurs de cette maladie. 

240434-04

## À propos de l'auteur

Depuis l'âge de cinq ans, Hans van Essen se passionne pour l'électronique, une vocation inspirée par son grand-père qui lui enseignait les subtilités des tubes à vide, des transistors et des premiers circuits intégrés. À la fin des années 1980, il s'est intéressé à la technologie informatique et au développement de logiciels, ce qui a nourri son intérêt pour le domaine numérique. À 25 ans, Hans a cofondé une société internationale de logiciels prospère, spécialisée dans les solutions commerciales pour la logistique et la gestion d'entrepôts. Aujourd'hui, il développe des solutions intelligentes de bout en bout, qui intègrent tout, du matériel aux logiciels en nuage, tirant parti de son expertise approfondie dans ces deux domaines. Architecte logiciel de profession, l'électronique demeure son hobby préféré. Hans continue d'explorer des moyens de fusionner ses passions pour créer des solutions combinant le matériel et le logiciel pour créer des solutions innovantes et intégrées.



## Produits

- **Carte de développement LILYGO T-Display-S3 ESP32-S3 (avec connecteurs)**  
[www.elektor.fr/20299](http://www.elektor.fr/20299)



## Questions ou commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur ([hans@expaso.nl](mailto:hans@expaso.nl)), ou contactez Elektor ([redaction@elektor.fr](mailto:redaction@elektor.fr)).

## LIENS

- [1] Elektor Labs annonce les gagnants du concours 2024 Project Contest :  
<https://www.elektormagazine.fr/articles/gagnants-du-concours-de-projet-2024>
- [2] Vibrotactile coordinated reset stimulation for the treatment of Parkinson's disease :  
<https://ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8771098>
- [3] NBC Today, "Scientists Develop Glove That Eliminates Parkinson's Tremor" (YouTube) : <https://youtu.be/YEEwbxFT4Bc&t=79s>
- [4] Video : VibroTactile Gloves : <https://youtu.be/RJwAdNKXpX8>
- [5] United Nations — Sustainable Development: The 17 Goals : <https://sdgs.un.org/goals>
- [6] Seeed Studio Mini Vibration Motor 2.0 mm : <https://tinyurl.com/seedminivib>
- [7] Lilygo T-Display-S3 : <https://www.lilygo.cc/products/t-display-s3>
- [8] Types d'accumu 18650 : <https://nkon.nl/blog/protectedunprotectedbattery>
- [9] Fichiers du micrologiciel et du circuit imprimé sur la page de ce projet sur Elektor Labs :  
<https://elektormagazine.fr/labs/vibrotactile-gloves-against-parkinsons-disease>
- [10] ESP-NOW: A wireless communication protocol for quick responses and low-power control :  
<https://espressif.com/en/solutions/low-power-solutions/esp-now>
- [11] LVGL — Light and Versatile Graphics Library : <https://lvgl.io>
- [12] Squareline Studio : <https://squareline.io>

# Rejoignez la communauté Elektor



Devenez membre maintenant !



- accès à l'archive numérique depuis 1978 !
- 8x magazine imprimé Elektor
- 8x magazine numérique (PDF)
- 10 % de remise dans l'e-choppe et des offres exclusives pour les membres
- accès à plus de 5000 fichiers Gerber



Également disponible  
abonnement  
sans papier !



- accès à l'archive numérique d'Elektor
- 10 % de remise dans l'e-choppe
- 8x magazine Elektor (PDF)
- accès à plus de 5000 fichiers Gerber



[www.elektormagazine.fr/membres](http://www.elektormagazine.fr/membres)

**elektor**  
design > share > earn



**MOUSER  
ELECTRONICS**

## Aider les élèves ingénieurs à relever les défis de demain

- Parrainages universitaires
- Tarifs préférentiels
- Ressources éducatives

[mouser.com/educationsales-emea](http://mouser.com/educationsales-emea)

