



# ESD

## Le destroyer fantôme

### Foudroiement spontané des composants

Figure 1. Le tragique accident à l'arrivée du Hindenburg à Lakehurst (image : Sam Shere).

**Peter Beil** (Allemagne)

La taille de gravure des puces se réduit sans cesse, et elles sont de plus en plus vulnérables aux dommages causés par les décharges électrostatiques. Intéressons-nous à la nature de cette menace bien réelle et aux moyens de l'écartier.

Le voyage transatlantique du dirigeable *Hindenburg* en 1937 s'est achevé par une catastrophe. Au cours de l'approche du pylône d'amarrage de *Lakehurst*, en Amérique, les 200 000 m<sup>3</sup> d'hydrogène, qui sustentaient le Hindenburg, ont pris feu (**fig. 1**). La source d'inflammation n'a jamais été officiellement attribuée, mais de nombreux experts soupçonnent qu'il s'agit d'une décharge d'électricité statique entre la structure du dirigeable et le pylône d'acier. Ce type de phénomène est appelé *ESD* (*ElectroStatic Discharge*), en français décharge électrostatique, mais *DES* n'est pas usité.

#### Qu'est-ce que l'ESD ?

Il s'agit d'une décharge électrique soudaine entre deux objets ou corps qui, portant des charges électriques différentes, sont portés à des potentiels différents. Cette différence de potentiel (*ddp* en abrégé) ou tension est neutralisée lorsque les deux corps se rapprochent assez pour qu'une décharge se produise, souvent avec une étincelle et un craquement. Une méthode courante pour donner une charge électrique à un objet est de le frotter sur un matériau isolant, c'est l'effet *triboélectrique*. Tout un chacun a remarqué ce

phénomène en se peignant ou brossant les cheveux par temps sec. Marcher sur un tapis en matière synthétique ou quitter le siège d'une voiture communique aussi une charge au corps. Après, en touchant de la main un autre objet conducteur par ex. une poignée de porte (**fig. 2.**) de charge différente, on peut ressentir une décharge au bout du doigt, car les deux charges se neutralisent. Il est probable qu'à l'amarrage du Hindenburg, une étincelle jaillit et enflamma l'hydrogène. La surface de friction sur l'air du zeppelin est énorme. La ddp entre l'enveloppe et le pylône a pu facilement atteindre quelques centaines de milliers de volts et le pic de courant pendant la décharge a pu être assez élevé.

À plus petite échelle, ce phénomène se remarque déjà souvent, par ex. en enlevant un pull en coton porté sur un maillot de corps en fibres synthétiques, on entend distinctement un craquement. Les ddp produites par ce geste atteignent facilement quelques kV. La nuit, avec les yeux habitués à l'obscurité, on perçoit ces minuscules éclairs dès 5 kV. Les chaussures de sport sont presque toujours faites de matériaux synthétiques ; marcher peut entraîner une charge de 15 kV sur sol en plastique dur et atteindre 25 kV sur tapis.

Dans nos activités quotidiennes, nos mouvements produisent des charges électrostatiques. Ce phénomène est particulièrement gênant par faible humidité, par ex. dans les pièces et espaces climatisés ou chauffés. On s'en rend rarement compte, mais le simple fait de se lever d'une chaise et de s'y rasseoir peut produire une différence de potentiel de 15 kV. Pour ressentir une décharge provenant d'un seul point isolé sur le corps, il faut que la ddp dépasse 2 à 3000 V. À plus faible ddp, la décharge passe le plus souvent inaperçue.

En introduisant certains de ces chiffres dans le modèle standard HBM (*Human Body Model*) [1] (voir en français <https://cutt.ly/lbKjtUw>), on conclut que le modèle électrique équivalent d'un corps humain a une capacité variant de 100 à 300 pF. Dans l'hypothèse où la peau a une résistance moyenne de contact d'1,5 kΩ env., on doit s'attendre à ce qu'une décharge sous une ddp de 15 kV produise une pointe de courant atteignant 10 A durant quelques dizaines de ns.

## L'impact sur l'électronique

Tout électronicien amateur ou professionnel qui travaille avec des composants de faible puissance doit prendre garde à ces décharges indésirables. Même si nous n'en sommes pas conscients, les décharges proches du seuil de perception humaine peuvent avoir un effet catastrophique sur les microstructures électroniques. Les manipulations sans précaution ont déjà détruit d'innombrables puces. Toucher de la main un circuit intégré moderne peut entraîner une décharge statique destructrice dans ce composant. À notre échelle macroscopique, elle équivaut à un coup de foudre sur un arbre (**fig. 3.**).

Bien sûr, la ddp n'est pas le seul élément à prendre en compte ; il faut aussi considérer l'énergie dissipée pendant le processus d'annulation de la ddp. L'ESD est un phénomène transitoire qui ne dure que quelques nanosecondes, mais les structures autour d'une zone d'entrée de CI dans la puce ne mesurent que quelques microns. À 15 kV et 150 pF, selon la formule  $E = \frac{1}{2} C \times V^2$ , l'énergie stockée par le condensateur humain est de 17 mJ env. Bien que ce chiffre soit assez faible, la brièveté de la décharge se traduit par une puissance instantanée très élevée, de l'ordre du kW, et une densité de puissance très élevée parcourt les microstructures.



Figure 2. Une décharge électrostatique peut être douloureuse. Méfiez-vous de cette poignée ! (Cette photo et suivantes : Beil & Kaiser)

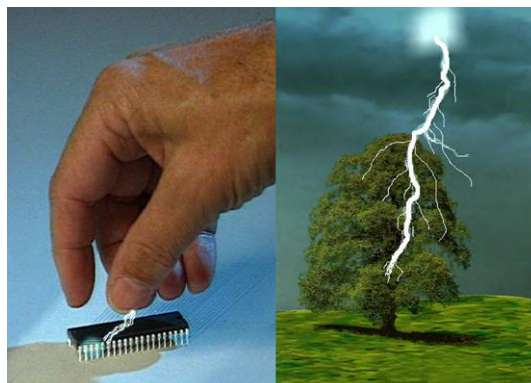


Figure 3. Un doigt chargé peut avoir le même effet sur un CI qu'un nuage d'orage sur un arbre.

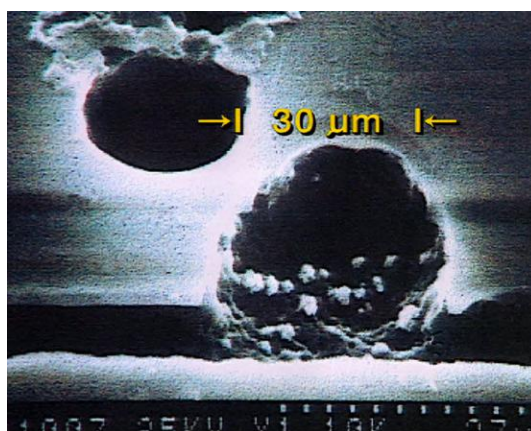


Figure 4. Image au microscope électronique des dommages causés par une ESD.

L'observation au microscope électronique des dommages dus à ces décharges révèle des connexions calcinées, des cratères et restes carbonisés de la micro-explosion produite sur le silicium (**fig. 4.**), rappelant un coup de foudre, à microéchelle. Il faut noter que les CI hautement intégrés où nous gravons désormais des nanostructures, ne sont pas les seuls concernés : les diodes, LED, MOSFET et même les semi-conducteurs de puissance le sont aussi.

Les décharges de « faible » ddp autour de 1 kV que nous ne pouvons pas percevoir nous-mêmes peuvent détruire beaucoup de composants actifs. Un tel dommage passe donc souvent inaperçu. Il est visible si un composant entier tombe en panne, mais si une petite partie d'un CI ou une fonction est affectée, il peut rester longtemps caché.





Figure 5. Lieu de travail équipé de toutes les mesures anti-ESD.

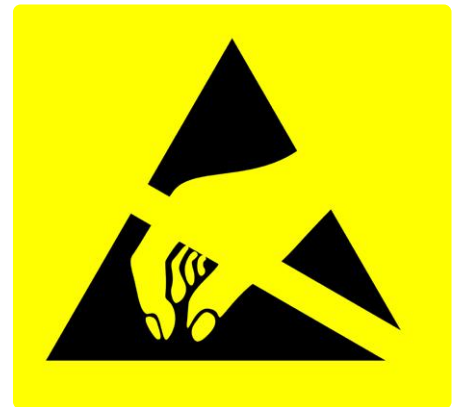


Figure 6. Logo officiel de l'ESD.

Les conséquences peuvent être graves, voire mortelles, si le composant endommagé est par ex. utilisé dans une application cruciale de sécurité : équipement de surveillance laser utilisé pour de délicates procédures cardiaques ou commande de déploiement d'airbags exécuté lors d'une collision automobile.

### Protection contre les ESD

Pour réduire les dommages qu'une ESD peut infliger à un appareil électronique, il est important que le personnel manipulant des composants soit conscient du risque et applique des mesures efficaces pour le réduire. Chez les fondeurs, de la fabrication des galettes au test des composants en passant par le back-end, chaque étape est conçue de manière à éliminer tout risque d'endommager des composants par accumulation de charges. Un CI peut être implanté dans un système de contrôle de sécurité crucial dont la fiabilité est d'une importance vitale. Même chez les électroniciens amateurs, une bonne assimilation de l'ESD peut éviter bien des défaillances soudaines de CI et des déconvenues.

Les fondeurs et concepteurs de CI estiment ce problème assez important pour imaginer et intégrer des protections dès le stade de la conception des puces. Ces circuits de protection sont intégrés à la gravure des CI. Cela s'appelle le *durcissement ESD*. Toutefois, les CI ne sont pas protégés contre tous les phénomènes ESD. À mesure que la finesse de gravure et le nombre de composants des puces de générations successives augmentent, les distances entre les éléments se réduisent et la vulnérabilité aux décharges électrostatiques s'accroît. Pour les microcontrôleurs, des circuits de suppression externes sont aussi utilisés pour écrêter les pointes de tension. Semblables aux diodes Zener, ils entrent en conduction lorsqu'un signal d'entrée approche d'un niveau haut ou bas spécifié. Leur temps de réponse est très court et ils absorbent des charges relativement élevées. Malheureusement, même ces dispositifs ne garantissent pas une protection absolue. Un article détaillé [2] a déjà été publié à ce sujet dans Elektor.

Une exigence de base pour manipuler des CI à haute densité est une zone protégée contre les ESD. Dans cet environnement, des mesures

sont mises en œuvre pour combattre l'apparition des charges statiques et faire qu'elles soient déchargées au potentiel de la terre de manière contrôlée (**fig. 5.**). Seul un personnel spécialisé, dûment formé et équipé, peut accéder aux zones marquées du logo illustré à la **figure 6**. Les espaces anti-ESD sont généralement équipés d'un revêtement de sol conducteur mis à la terre. Les étagères et surfaces de travail ont toutes des résistances de fuite  $< 100 \text{ k}\Omega$  afin d'amortir toute apparition soudaine de charges et garantir que les charges puissent se dissiper lentement. Les matériaux présentant une faible résistance ohmique surfacique réduisent l'accumulation d'électricité statique et la mise à la terre laisse les charges s'écouler vers le potentiel de la terre.

Les étagères mobiles, les chariots et les chaises ont des surfaces et des roulettes conductrices. Idem pour les outils et autres fers à souder. Les poignées isolées en plastique de l'outillage à main sont susceptibles de porter des charges statiques élevées. Il est donc recommandé d'utiliser uniquement des matériaux conducteurs d'électricité statique assurant l'égalisation en douceur des charges entre la main, l'outil et le composant.

Mieux vaut savoir que ces outils conducteurs ne sont pas adaptés à une utilisation avec des tensions  $> 25 \text{ V}$ , ce qui signifie qu'ils ne sont pas conformes à la norme VDE d'Allemagne !

Les brucelles et autres outils pointus méritent une attention particulière à cet égard ; les formes vives (pointes et angles) ont la faculté de concentrer les porteurs de charge électrique ce qui peut entraîner des décharges et étincelles, même à relativement faible ddp. Si vous travaillez avec des composants sensibles, il est essentiel de porter un bracelet (**fig. 7.**) relié à un point de mise à la terre spécifique.

Dans certains environnements, tels que les salles blanches, l'emploi de matériaux susceptibles de garder une charge statique est inévitable en raison de l'ingénierie des processus. Un flux d'air ionisé combat l'accumulation de charges sur une surface isolante, on place donc des ioniseurs en sortie de climatiseur ; c'est la méthode de choix si la mise à la terre classique ne peut être mise en œuvre (**fig. 8.**). L'ionisation de l'air n'est qu'un complément et ne doit jamais être considérée comme un substitut des mesures de protection ESD classiques.

## ESD et assemblage des cartes imprimées

Les robots de placement de composants éviteront tout mouvement ou glissement inutile du composant susceptible de faire naître une charge sur le composant. Aujourd'hui, on utilise principalement des robots appliquant la méthode *pick-and-place* : un bras de préhension saisit le composant et le place sur la carte. Les capteurs de la pince mesurent les propriétés du composant à placer et le rejettent s'il n'est pas conforme aux spécifications.

Toute personne entrant dans une zone de sécurité ESD est obligée de porter chaussures et vêtements spéciaux. Une barrière d'entrée se charge de vérifier que tout visiteur respecte la règle ; l'accès n'est accordé que si la mesure de sa conductivité est conforme. Cette mesure, effectuée à l'aide d'une plaque au sol pour les pieds et une autre pour les mains (**fig. 9.**), commande l'ouverture ou le blocage de la barrière. Le cas échéant, les visiteurs sont munis d'une bande de décharge des chaussures et d'une blouse de travail en coton. Celle-ci doit d'ailleurs être complètement fermée pour littéralement confiner les charges statiques : toute charge sera piégée côté intérieur de la combinaison. En salle blanche, des restrictions particulières s'appliquent dans les zones de production de semi-conducteurs. Il faut porter des

combinaisons couvrant tout le corps, à l'exception des yeux et des mains. Des fibres de carbone conductrices sont introduites dans le tissu dont ces combinaisons sont faites (**fig. 10**). Il peut être nécessaire de porter des doigtiers ou des gants dissipateurs.

Dans d'autres situations les phénomènes ESD indésirables peuvent être visibles ou même audibles : les boîtes de film 35 mm contiennent une bobine de film plastique recouvert d'une émulsion photosensible. Si l'air est sec, de minuscules décharges peuvent se produire là où les surfaces du film se séparent lors du tournage. La trace de ces éclairs apparaîtra sur le tirage lorsque le film sera développé. Un phénomène analogue peut arriver lors des prises de son sur bande magnétique, surtout si elle est large et qu'elle avance à vitesse élevée. L'enregistrement peut souffrir d'un léger crépitement que l'on peut supprimer avec un filtre adéquat dans le circuit audio. Retour à l'électronique...

Les phénomènes ESD sont par nature transitoires et la possibilité d'enregistrer leurs profils de courant et de tension n'est que très récente, grâce aux oscilloscopes à mémoire rapides avec échantillonnage  $> 1$  GHz. Des intervalles d'échantillonnage  $< 1$  ns sont requis avec ces phénomènes très brefs. L'intensité du champ peut être mesurée, à l'aide d'un électromètre. Toutes ces mesures sont décrites dans la spécification [3].



Figure 7. Bracelet mis à la terre.

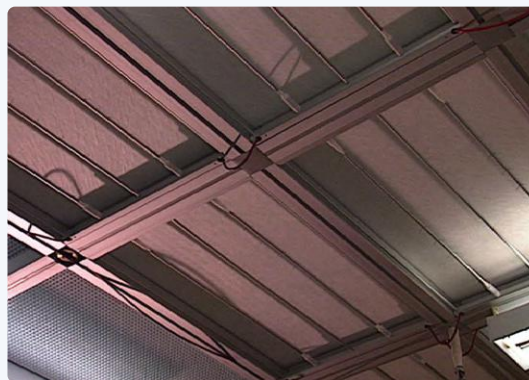


Figure 8. Ventilation ionisante dans le plafond d'une salle de production de puces.



Figure 9. Barrière de contrôle de la conductivité.



Figure 10. Équipement de salle blanche.

## L'ESD et le petit laboratoire

Les électroniciens amateurs et les exploitants de petits labos se demanderont s'il faut prendre ce sujet autant au sérieux. Soyons clairs : les mêmes lois physiques s'appliquent à la maison ainsi que dans les halls de production industriels. Ne lésinez pas sur les mesures de protection anti-ESD. Soyez conscient des risques. Il n'est sans doute pas indispensable d'investir dans autant de matériel onéreux que l'industrie, mais au moins, vous réduirez les risques de dommages en suivant ces règles d'or :

- Même dans un petit laboratoire d'électronique, on peut « désamorcer » le sol en y plaçant un tapis conducteur relié à la terre.
- Idem pour le plan de travail : il est assez bon marché d'y installer un tapis conducteur.
- Un bracelet relié à un point de masse commun est une assurance-vie pour les composants fragiles.
- Tout fer à souder digne de ce nom, même semi-professionnel, doit être doté d'une connexion à la terre et les outils sont disponibles avec des poignées qui dissipent les charges statiques.
- Faites très attention en utilisant des brucelles à pointe acérée.
- Les roulettes de tous les tabourets, chaises, armoires et étagères doivent être de type « conductrice des ESD ».
- Les composants fragiles sont fournis dans un emballage conducteur. Ils doivent y rester jusqu'à leur montage.
- Vérifiez l'absence de trous et déchirures dans les sacs de protection ESD et les boîtes de rangement.

S'assurer qu'un composant sorti de son emballage de protection est déplacé le moins possible, et ça va de soi, qu'aucune de ses bornes de connexion ne peut établir de contact, est une stratégie ESD sûre. Le simple fait de renverser des composants sur une surface isolante peut – par malchance – produire des ddp potentiellement dommageables. Des brucelles et pinces appropriées sont disponibles pour la manipulation et le montage des composants. L'investissement que représentent ces outils sera amplement remboursé à long terme. Même s'ils sont confortables, il vaut mieux éviter de porter des vêtements de sport ; ils sont invariablement en matière synthétique. Choisissez des combinaisons ou blouses antistatiques par nature et veillez à ce qu'elles soient boutonnées et ne bâillent pas lorsque vous vous déplacez. Veillez à la propreté de l'espace de travail ; nettoyez-en les surfaces ; ôtez les projections de soudure et copeaux de métal ; nettoyez régulièrement les roulettes de chaise et le sol (ne le cirez pas). L'utilisation de microcomposants complexes dans les petits labos d'électronique peut être source de déconvenues et de regrets si on n'utilise pas les outils adéquats pour manipuler les composants

## Mots clés

|               |                                                                                                                                                       |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ESD           | Décharge électrostatique                                                                                                                              |
| ESA           | <i>Electrostatic Area</i> (zone protégée contre l'ESD)                                                                                                |
| ESDS          | Sensible aux ESD                                                                                                                                      |
| Salle blanche | Environnement contrôlé à faibles polluants aériens tels que poussières et microbes en suspension. Utilisé pour la fabrication de puces électroniques. |
| Wafer         | Galette de silicium, le substrat où les puces sont gravées.                                                                                           |
| Front End     | Étape de gravure des puces ; dopage de la galette pour produire des zones conductrices.                                                               |
| Back End      | Étape de gravure des puces ; contrôle des galettes, découpage en dés et test final des puces.                                                         |
| HBM           | Modèle électrique du corps humain ( <i>Human Body Model</i> ).                                                                                        |

et monter les cartes électroniques. Il y a de fortes chances que les informations fournies ici contribuent à prolonger la durée de vie de quelques CI coûteux et à réduire les recherches de défauts longues et exaspérantes. ❏

(200607-04)

## Des questions, des commentaires ?

Envoyez un courriel à la rédaction d'Elektor ([redaction@elektor.fr](mailto:redaction@elektor.fr)).

## Contributions

Texte : **Peter Beil**  
Rédaction : **Thomas Scherer**

Mise en page : **Harmen Heida**  
Traduction : **Yves Georges**



## PRODUITS

- **Jeu de tournevis ESD Bernstein 4-620 (6 pièces)**  
<https://www.elektor.fr/bernstein-4-620-esd-screwdriver-set-6-pieces>
- **Porte-outils Vario Bernstein 2100 avec 6 outils ESD**  
<https://www.elektor.fr/bernstein-2100-esd-tool-holder-vario-6-tools>

## LIENS

- [1] **HBM** : [https://en.wikipedia.org/wiki/Human-body\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/Human-body_model)
- [2] **P. Krüger, « protection active anti décharges électrostatiques », Elektor 01-02/2014** : [www.elektormagazine.fr/130221](http://www.elektormagazine.fr/130221)
- [3] **Association ESD (États-Unis)** : [www.esda.org/about-esd/esd-fundamentals/part-6-esd-standards/](http://www.esda.org/about-esd/esd-fundamentals/part-6-esd-standards/)



# énergie solaire pour les robots de tonte

Écologique, peu coûteux, simple !



**Thomas Scherer** (Allemagne)

Un robot de tonte est un bel objet, confortable et pratique. Mais écologiquement, il y a encore une marge d'optimisation, car il a besoin d'énergie électrique en permanence. Par ailleurs on ne peut pas partout poser facilement un câble de 230 V pour l'alimentation électrique. Un système solaire adapté résout les deux problèmes.

Il fut un temps (il y a trois ans), lorsque le gamin du voisin est devenu jeune étudiant, où il a préféré passer du temps à étudier plutôt qu'à tondre la pelouse de mon jardin. J'ai donc acheté un robot de tonte. En plus, cette décision permettait de recycler les tontes de gazon et donc les nutriments, au lieu de transformer rapidement mon tas de compost en montagne. Passées les difficultés initiales pour la pose du câble de délimitation en cherchant à épouser la forme plutôt complexe de mon terrain, le robot a fait ce qu'il était censé faire. Et s'il n'est pas en panne, il tond encore aujourd'hui...

## Fonctionnement solaire

Tout aurait été parfait et le conte de fées se serait terminé ici, si récemment ma petite amie – qui a un doctorat en chimie – ne m'avait pas taquiné. Il se trouve qu'un bon ami

à moi voulait équiper son bateau à moteur d'un réfrigérateur électrique qui devait être alimenté par l'énergie solaire. En tant qu'« Electricus » de mon clan, j'étais naturellement chargé des calculs de base de ce système solaire. Et dès qu'Alexandra a entendu parler de cela, elle a pointé les lèvres et m'a demandé avec une feinte innocence : « Et pourquoi ton robot de jardin ne fonctionne pas encore à l'énergie solaire ? ».

Bang ! Bien sûr, je ne pouvais pas laisser passer ça. J'ai donc rapidement étudié les modalités de ce projet, consulté l'internet pour connaître les prix actuels des composants et, une demi-heure plus tard, je lui ai dit : « C'est aussi facile à faire que peu coûteux. Avec environ 100 €, on peut y arriver ! ».

Elle sourit avec scepticisme, car en tant que scientifique convaincue, le système d'exploitation orienté Goethe installé dans

son cerveau fonctionne selon la devise : « J'ai bien entendu le message, seule ma foi vacille ». Les belles paroles ne comptent pas pour elle, seulement les actes. Je devais donc le prouver...

## Considérations de base

J'ai un robot de tonte Gardena, une version bon marché des célèbres machines Husqvarna. Pour une pelouse d'environ 550 m<sup>2</sup>, il doit tondre environ 4 h/j pendant la phase de croissance – au printemps et en automne, alors qu'en plein été sec, il y arrivera avec 2 h/j ou moins. Heureusement, il y a beaucoup de soleil au moment où on en a besoin.

Le robot a une batterie qui lui permet de tondre pendant environ une heure. Il doit ensuite retourner à sa station de base et après une heure de recharge, il est prêt à

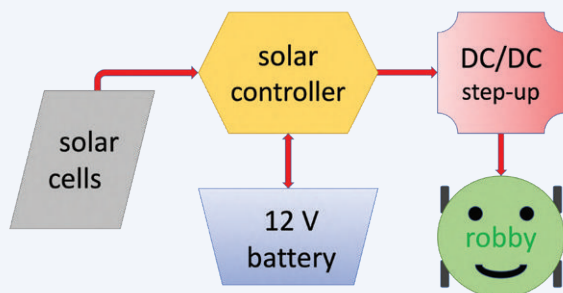


Figure 1. Le schéma fonctionnel d'un système solaire pour les robots de tonte avec le flux d'énergie (rouge).

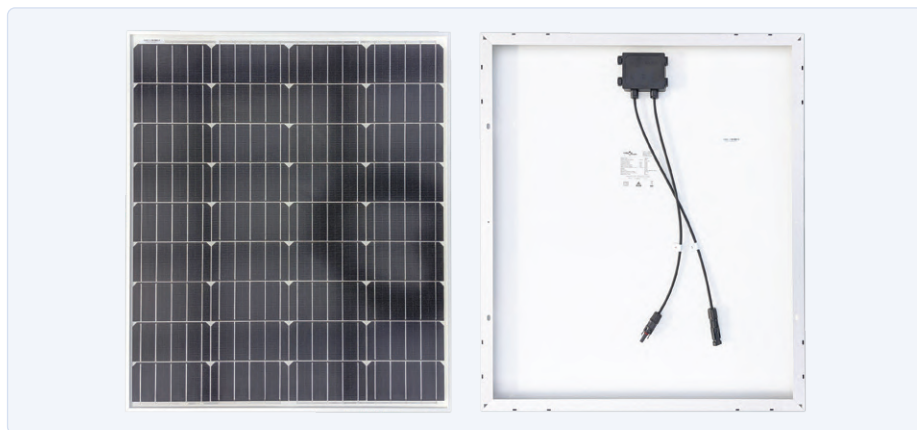


Figure 2. Avant et arrière de mon panneau solaire 12 V avec 80 W<sub>crête</sub>

tondre à nouveau. Si je veux le faire tondre pendant 2 h/j, je dois programmer (sans fil) une fenêtre de 3 h qui inclut une heure de pause pour la recharge.

Afin de pouvoir estimer la quantité d'énergie nécessaire par processus de charge, j'ai interrogé l'internet : le bloc d'alimentation correspondant est censé fournir 28 V à un maximum de 1,3 A. Comme je suis patient, je l'ai mesuré : en fait, mon alimentation délivrait une tension de 28,1 V (CC) en mode hors charge. Lorsque le robot chargeait sa batterie, ma pince ampèremétrique indiquait un courant de 1,29 A. Pendant la charge, la tension tombait à 26,5 V. « L'alimentation est vraiment faible » ai-je pensé, ce qui s'est révélé faux par la suite ;-) Quoi qu'il en soit, 26,5 V × 1,3 A donnent environ 35 W selon Adam Ries et la formule de puissance. Cela signifie qu'il faut environ 35 Wh pour une heure de charge. Pour les quatre phases de tonte d'une journée de début d'été, on peut s'attendre à 140 Wh. C'est la quantité d'énergie électrique quotidienne que le système solaire devrait être capable de fournir (et de stocker) même par faible ensoleillement.

À cela s'ajoute le besoin en énergie de

la station de base, qui alimente H24 les câbles de délimitation avec un signal pulsé d'intensité notable, dont le champ magnétique est détecté par le robot pendant le fonctionnement (voir mon article [1]). J'ai mesuré un courant de repos (hors charge) de 85 mA à 28,1 V. Par conséquent, environ 2,4 W (≈ 58 Wh/j) sont nécessaires en plus des charges.

Même si ces valeurs ne sont valables que pour mon robot de tonte, on peut supposer qu'elles le sont plus ou moins pour la plupart des appareils actuellement disponibles. Mon robot convient pour 1 100 m<sup>2</sup> et fait donc partie de la « gamme moyenne ». Les petits robots ont certainement besoin de moins d'énergie et les grands de plus. Cependant, il vaut mieux le mesurer soi-même que de se contenter de supposer.

### Système solaire

Si je table sur 200 jours de tonte par an avec une moyenne de 3 h/j, j'obtiens 600 cycles de charge, ce qui donne un besoin énergétique annuel de 21 kWh. Si l'on y ajoute les 2,4 W × 24 h × 200 j ≈ 11,5 kWh, on obtient un coût d'électricité de 9,75 € (à 30 c/kWh). Une installation solaire pour les 100 €

supposés serait amortie au bout de dix ans. Cela en vaut-il la peine ? D'un point de vue économique, sans doute pas, mais d'un point de vue écologique oui, car pendant cette période, vous auriez économisé environ 105 kg de CO<sub>2</sub>. En outre, le choix de l'emplacement de la station de charge de la tondeuse est indépendant du raccordement au réseau. Troisièmement, Alexandra...

Le système solaire du robot de tonte nécessite quatre composants (fig. 1) : en plus du **panneau solaire**, une **batterie** est nécessaire pour stocker l'énergie, sinon la tondeuse ne peut pas être chargée lorsque le soleil ne brille pas. Ce dernier point entraîne la nécessité d'un **contrôleur de charge** qui transfère l'énergie du panneau à la batterie, en tenant compte des tensions de fin de charge et de décharge de la batterie. Enfin, il faut un **convertisseur CC/CC** pour élever la tension de la batterie au niveau requis par la station de charge de la tondeuse. Le dimensionnement adéquat de chaque composant impose une petite étude et un calcul approximatif. Tous les calculs sont basés sur le besoin énergétique maximal par jour, qui dans mon cas est ≤ 200 Wh. Passons maintenant aux calculs.

### Panneau solaire

Idéalement, le panneau devrait fournir en deux heures autant d'énergie que la tondeuse en consomme en une heure de tonte, en tenant compte de la pause de charge d'une heure. En estimant à 15% les pertes dues au contrôleur de charge et au convertisseur CC/CC, on arrive à environ 40 W par 2 h, soit 20 W de puissance continue pendant le temps où la tondeuse tond (et se charge). Ensuite, la batterie reste généralement pleine si le soleil brille. Comme la puissance de sortie des panneaux solaires est mesurée en W<sub>crête</sub> et que vous aurez rarement des conditions optimales sans ombre et une inclinaison idéale du panneau, doubler la puissance de sortie n'est certainement pas une erreur. Un panneau de 40 W<sub>crête</sub> est-il suffisant ? À mon avis, non, car les rayons du soleil sont très obliques au printemps et en automne, ce serait encore une supposition très optimiste. Un autre facteur de sécurité de 2 n'est sans doute pas exagéré. Donc 80 W<sub>crête</sub> dans mon cas est le minimum. J'ai commandé un tel panneau sur eBay pour 55 € (fig. 2), car il avait – quelle coïncidence ! – avec 77 × 66,5 cm exactement les bonnes dimensions pour servir de toit à la niche du chien, que j'ai transformée en garage à tondeuse.





Figure 3. La batterie au plomb AGM 12 V / 12 Ah.

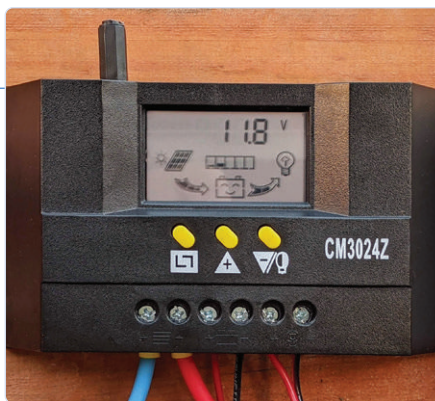


Figure 4. Ce régulateur de charge solaire bon marché en technologie MLI tolère des courants jusqu'à 30 A.

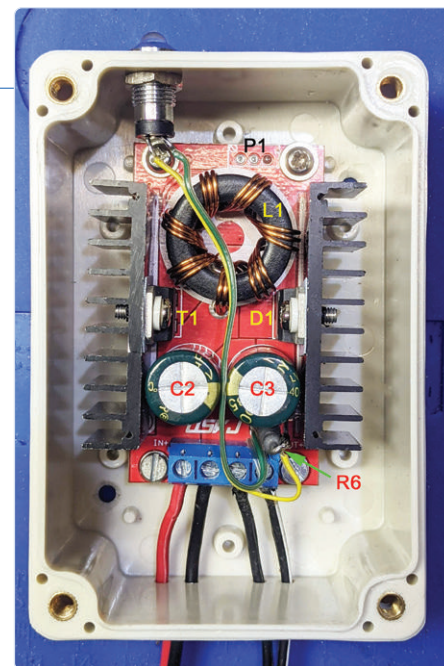


Figure 5. Un simple convertisseur élévateur a été complété par un limiteur de courant de 1,3 A.

Les mesures ont montré qu'à la fin du mois d'octobre dans le sud du land Bade (Allemagne), vers midi, lorsque le soleil est au zénith, on peut s'attendre à une puissance d'environ 22 W. Le calcul approximatif était correct !

## Batterie

Le stockage d'énergie doit être suffisant pour au moins une journée de couverture nuageuse dense. La batterie doit donc être capable de stocker  $\geq 140$  Wh. Une batterie AGM 12 V plomb-acide de 12 Ah ( $\approx 150$  Wh) coûte environ 25 € sur eBay. L'AGM (Absorbed Glass Mat) est nécessaire pour obtenir un maximum de cycles de charge dans cette application et donc une durée de vie longue. Un panneau de 80 W délivre un courant de pointe d'un peu moins de 6 A. La batterie est donc chargée avec un maximum de 0,5 C (généralement moins ; voir encadré **Courants en C**), ce qui est bon pour la longévité. Elle est déchargée à environ 40 W, ce qui correspond à 0,25 C. Comme il y a également de nombreux cycles courts de charge partielle, on peut s'attendre à juste titre à des années de fonctionnement. Une batterie de 12 Ah est un minimum pour cette application – plus serait mieux – mais je voulais essayer avec le minimum calculé et j'ai donc commandé la batterie de la **figure 3**.

## Régulateur de charge solaire

Le marché est inondé par une multitude de régulateurs de charge de petite puissance bon marché, qui conviennent à mes fins. J'ai décidé d'acheter un régulateur relativement « cher » à 13,50 €, parce qu'il a un boîtier métallique et des ailettes de refroidissement à l'arrière. C'est peut-être exagéré, car mon système n'utilise que 20% des 30 A possibles.

Les unités bon marché fonctionnent toutes avec un simple contrôle MLI, ce qui n'est pas tout à fait optimal. Si vous voulez un meilleur contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour une efficacité maximale, vous devrez déboursier au moins 75 €. Afin de rester en dessous des 100 € prévus, j'ai décidé d'utiliser la version bon marché de la **figure 4**.

## Convertisseur CC/CC

J'ai d'abord pensé qu'un système solaire de 24 V avec deux batteries de 12 V connectées en série serait la solution la plus simple. La station de charge de la tondeuse fonctionne probablement bien avec 24 V, même si elle est spécifiée pour 28 V. Cela permettait d'économiser un convertisseur élévateur, qui autrement est indispensable pour augmenter la tension de fonctionnement d'une batterie de 12 V, en éliminant en outre la perte de conversion et le courant de repos du convertisseur. Cependant, les panneaux solaires de 24 V sont plus chers. Ce qui est devenu évident par la suite, c'est que j'ai eu de la chance en optant pour la technologie 12 V.

Il fallait donc trouver un convertisseur élévateur de puissance suffisante, qui amène les 12-14 V de la batterie aux 28 V requis. Il devait pouvoir fournir au moins 40 W. Sur l'internet, on trouve des modules appropriés en abondance. J'ai décidé d'acheter un module de 150 W pour un peu moins de 10 €, qui promettait des réserves suffisantes. La **figure 5** montre la version modifiée intégrée dans un boîtier en plastique. Le rendement annoncé était de 95%. Et c'était vrai, comme l'ont montré mes mesures. Ce n'est pas étonnant, car l'UC3843 n'est certainement pas un mauvais choix pour IC1.

En tout, j'ai dépensé 55 € + 25 € + 13,5 € + 10 € = 103,50 € – une bonne estimation, n'est-ce pas ? En plus de cela, j'ai dû dépenser quelques euros pour les petites pièces,



Figure 6. Les quatre étapes de la transformation d'une niche pour chien mal utilisée en un garage solaire pour mon robot de tonte.





Figure 7. Comment empêcher le soulèvement du panneau par le vent.

les vis en acier inoxydable, les charnières et le boîtier en plastique.

### Conversion avec obstacles

Il y a d'abord eu les travaux mécaniques que j'affectionne peu en tant qu'électronicien : la transformation de l'ancien logement de la station de base en un garage avec un toit solaire. Les quatre photos partielles de la **figure 6** illustrent la procédure.

Tout d'abord, j'ai retiré les deux moitiés du toit (a) et j'ai scié les pignons comme indiqué en (b). Ensuite, j'ai ajouté des profilés d'angle en aluminium pour stabiliser le support devenu quelque peu bancal, et enfin j'ai fixé le panneau solaire de manière articulée (c). L'acier inoxydable n'est pas de trop dans les charnières et les vis, si l'on veut éviter la rouille. En (d), vous pouvez voir le résultat avec le panneau déplié et la tondeuse garée. La **figure 7** montre comment j'ai bloqué le panneau pour empêcher son soulèvement par le vent, ce

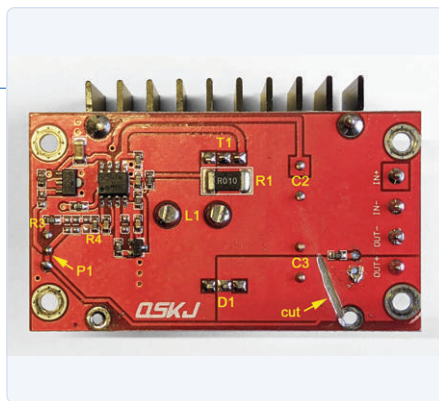


Figure 8. Face arrière de la carte du convertisseur élévateur.

qui est une nécessité absolue. L'étape suivante a déjà été plus intéressante : j'ai installé et câblé la batterie, le contrôleur de charge et le convertisseur élévateur. La LED de la station de charge est immédiatement devenue verte, même si j'avais réglé le convertisseur à seulement 27 V pour tenir compte de la chute de tension de l'alimentation d'origine. Au début, tout semblait fonctionner et le robot de tonte a reconnu les câbles de délimitation installés et s'est mis à tondre joyeusement.

Pour voir si la tondeuse se chargeait bien, je l'ai ensuite poussée dans sa station de charge. Mon smartphone était déjà en train de « pinguer » lorsque l'application de la tondeuse a reçu un message d'erreur de la part de la tondeuse...

Le message affiché était : « Courant de charge trop élevé ».

Oh ! « Ça peut faire de gros dégâts » me suis-je dit et j'ai rapidement sorti la

tondeuse de la station de charge. Le soir, Alexandra m'a demandé : « Tout s'est bien passé avec ta tondeuse ? ». J'ai dû concéder un rapport de situation dans le style de Radio Erevan : « En principe oui, mais... ». Je lui ai dit que le mode de repos fonctionnait bien, mais que le message d'erreur était ennuyeux. Mais je soupçonne que le robot compte sur le fait que son alimentation a un limiteur de courant intégré, et qu'il se charge donc simplement avec un courant constant. Demain, je mesurerai l'alimentation et, si nécessaire, j'équiperai le convertisseur élévateur d'un limiteur de courant ou j'en fabriquerai un pour lui. Si j'avais connecté directement le 24 V des batteries sans limiteur de courant, il y aurait eu des nuages de fumée. J'ai de la chance dans mon malheur.

### Limitation de courant

Le lendemain, il s'est avéré que mon hypothèse était correcte. Avec une charge de 24  $\Omega$ , l'alimentation d'origine délivrait un courant de 1,17 A pour une tension stable de 28,05 V. Avec une charge de 12  $\Omega$ , je n'ai pu mesurer que 15,5 V. Le courant était de 1,29 A. Un nouveau test avec 15  $\Omega$  a donné 19,4 V pour un courant stable de 1,29 A. Il s'agissait donc d'une alimentation de 28 V avec un limiteur de courant intégré d'environ 1,3 A.

J'ai maintenant examiné de plus près le circuit imprimé du convertisseur (**fig. 8**) et reproduit le circuit autant que nécessaire. La moitié supérieure de la **figure 9** montre le circuit original. La moitié inférieure montre mes modifications en rouge.

La tension de sortie est ajustée par IC1 pour que son entrée VFB reçoive une tension appliquée de 2,5 V. Elle est réglable avec P1 entre  $U_{in}$  et 34 V. La tension de sortie de ce type de convertisseur ne peut pas être plus petite que l'entrée, car même lorsque le convertisseur est éteint, un courant circule à travers L1 et D1 vers la sortie. Mais si la tension à la sortie peut varier entre 14 V et 28 V, c'est suffisant, me suis-je dit. Il suffisait donc de boucler une résistance shunt (R6) et d'augmenter la tension sur la broche VFB en cas de surcharge par un transistor PNP, pour réduire la tension à la sortie.

J'ai d'abord remplacé P1 par une résistance fixe de 6,8 k $\Omega$ . Cela a donné un résultat de 27 V – c'est bon. Ensuite, le capteur de courant d'entrée R1 a été remplacé par une résistance plus élevée de 0,22  $\Omega$  (CMS 2512), car 150 W ne sont pas du tout nécessaires. Avec 0,47  $\Omega$  pour R6 et une tension BE

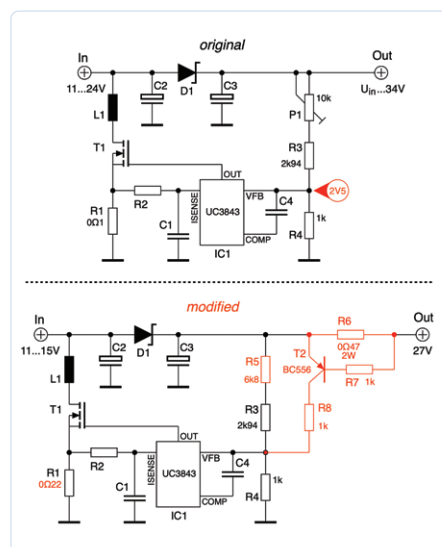


Figure 9. Circuit original et circuit modifié (partiel) du convertisseur élévateur.



Figure 10. Tout est terminé : garage solaire avec électronique intégrée.

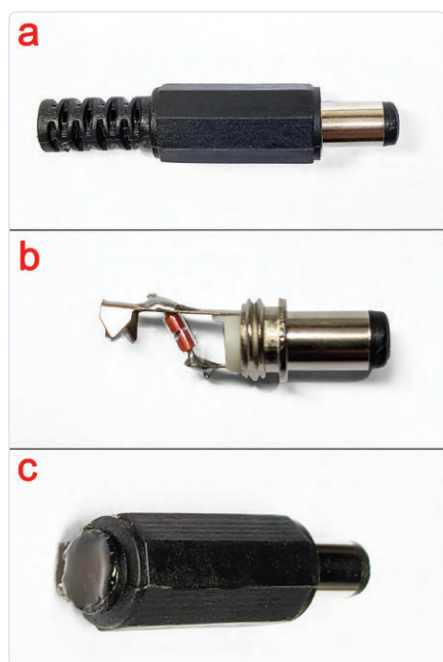


Figure 11. Une fiche jack de 3,5 mm (a) contient une diode (b) comme capteur de température. En (c), elle est scellée de manière étanche avec de la colle chaude.

d'environ 650 mV du T2 ajouté, on peut s'attendre à une limitation de courant de 1,38 A, ce qui conviendrait. J'ai donc installé les composants rouges (T2, R7 et R8 directement sur la face inférieure de la carte) et sorti l'ampèremètre : exactement 1,30 A. Gagné !

### Tout est bien qui finit bien !

J'ai remis le convertisseur modifié dans son boîtier, je l'ai replacé dans le garage de la tondeuse (fig. 10) et je l'ai allumé : la LED verte de la station de charge s'est allumée. Tadaah ! Lorsque j'ai poussé la tondeuse à l'intérieur, il n'y avait plus de message d'erreur. Le contrôleur de charge indiquait qu'environ 37 W circulaient vers le robot de tonte. Que demander de plus ? Avant d'annoncer triomphalement mon succès à Alexandra, j'ai fait tondre et charger la tondeuse à plusieurs reprises. Aucun autre problème n'est apparu.

Et au cas où vous vous demanderiez ce qui se passe s'il pleut pendant une semaine en automne ou au printemps – cette question est justifiée : avec une durée de tonte de 2 h/j, la batterie ne dure que 1,5 à 2,5 j, puis elle est vide et la tondeuse reste au garage jusqu'à ce que le soleil brille suffisamment. Une légère couverture nuageuse suffit pour qu'elle se réveille à nouveau. Si

vous voulez plus de réserve, la batterie et éventuellement le panneau doivent être dimensionnés plus largement. Un panneau de 100 W et une batterie de 20 Ah ne sont certainement pas exagérés. Le régulateur de charge et aussi le convertisseur peuvent tolérer une puissance bien supérieure.

Au passage, pas de problème en hiver, car c'est le moment où la tondeuse (y compris la batterie) passe de son garage à mon garage.

### Addendum

Les tensions d'une batterie au plomb dépendent de la température. Par conséquent, certains régulateurs de charge sont équipés d'un capteur de température pour en tenir compte. Mon contrôleur de charge incluait une prise jack de 3,5 mm apparemment vide (fig. 11a). En dévissant le capuchon, une simple diode en silicium est apparue (b). Il est clair qu'une jonction PN a un coefficient de température d'environ  $-1,7 \text{ mV/K}$ , ce qui est suffisant. Mais ce montage rudimentaire n'était pas une bonne idée à cause de l'humidité possible et des petits animaux qui cherchent un

abri. J'ai donc coupé la protection contre les courbures et simplement rempli l'œillet avec de la colle thermofusible (c). Maintenant, il est à l'abri de l'eau et des animaux.

Si vous avez quelque chose de similaire en tête : il existe également des convertisseurs step-up/down ou boost/buck prêts à l'emploi avec un limiteur de courant réglable pour juste quelques euros supplémentaires. Vous pouvez donc éviter la modification que j'ai faite. ❏

(200553-04)

### Des questions, des commentaires ?

Contactez Elektor ([redaction@elektor.fr](mailto:redaction@elektor.fr)).

### Contributeurs

Idée, mise en œuvre et texte :

**Thomas Scherer**

Rédaction : **Jens Nickel, CJ Abate**

Mise en page : **Giel Dols**

Traduction : **Denis Lafourcade**

## COURANTS EN C

Pour les batteries rechargeables, le courant de charge ou de décharge en fonction de la capacité nominale de la batterie est donné dans l'unité non-SI couramment utilisée, le C – c'est le rapport courant (en A) sur capacité nominale (en Ah) ; pour mémoire, capacité nominale (Ah) = courant (A) × durée (h). Un C de 0,5 donne un courant de 6 A pour une batterie de 12 Ah. L'avantage de l'unité C est qu'elle indique le stress de la batterie. Les batteries sont conçues pour certaines valeurs C maximales. Plus les valeurs réelles de C sont élevées, plus la durée de vie de la batterie est courte.  
=> Pour un courant donné, les batteries plus grosses durent plus longtemps.



### PRODUITS

#### > Régulateur de batterie pour panneau solaire avec sortie USB

[www.elektor.fr/usb-solar-panel-battery-regulator-charge-intelligent-controller-12-24-v-10-a](http://www.elektor.fr/usb-solar-panel-battery-regulator-charge-intelligent-controller-12-24-v-10-a)

#### > Pince ampèremétrique 4350 de marque PeakTech

[www.elektor.fr/peaktech-4350-clamp-meter](http://www.elektor.fr/peaktech-4350-clamp-meter)

#### > Multimètre numérique avec Bluetooth OW16B de marque OWON

[www.elektor.fr/owon-ow16b-digital-multimeter-with-bluetooth](http://www.elektor.fr/owon-ow16b-digital-multimeter-with-bluetooth)

### LIEN

- [1] « Locating Wayward Wires » (article en anglais), Elektor 03-04/2019 : [www.elektormagazine.com/magazine/elektor-141/57129](http://www.elektormagazine.com/magazine/elektor-141/57129)



# 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

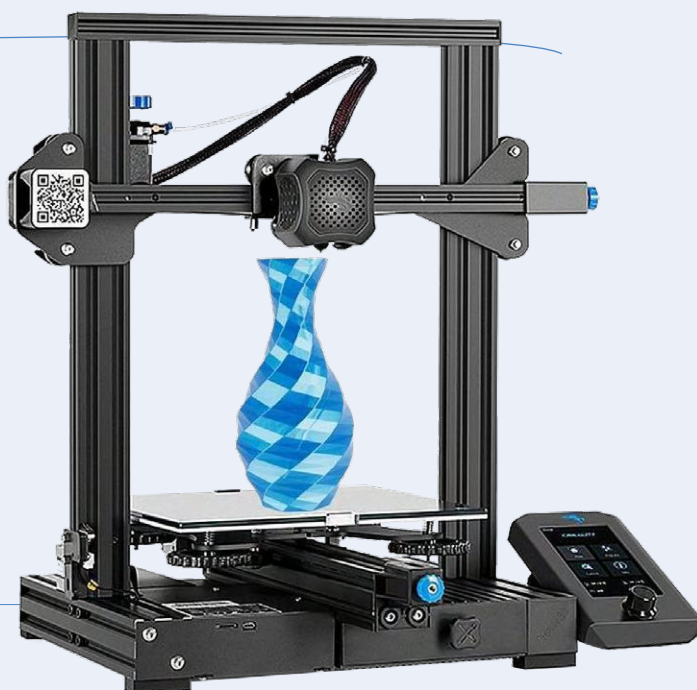
prix très étudiés. Ce sont les produits que nous aimons et testons nous-mêmes. Si vous avez une suggestion, n'hésitez pas : [sale@elektor.com](mailto:sale@elektor.com).  
Seule exigence :  
**jamais cher, toujours surprenant !**

### Imprimante 3D Creality Ender-3 V2

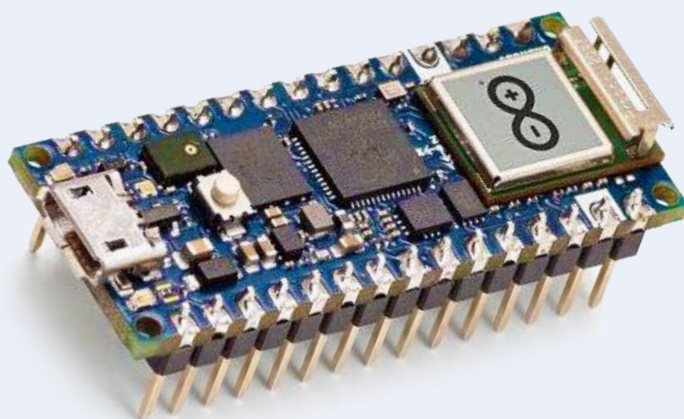
Prix : 259,00 €

**Prix (membres) : 233,10 €**

 [www.elektor.fr/19744](http://www.elektor.fr/19744)



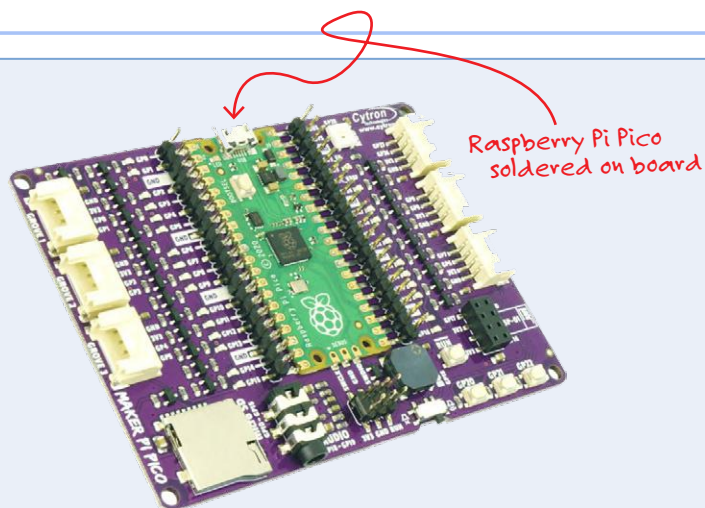
### Arduino Nano RP2040 Connect with headers



Prix : 29,95 €

**Prix (membres) : 26,96 €**

 [www.elektor.fr/19754](http://www.elektor.fr/19754)



Cytron Maker Pi Pico  
(Raspberry Pi Pico RP2040 inclus)

Prix : 19,95 €

**Prix (membres) : 17,96 €**

[www.elektor.fr/19706](http://www.elektor.fr/19706)



Microscope numérique  
Andonstar AD409 avec écran 10,1"

Prix : 399,00 €

**Prix (membres) : 359,10 €**

[www.elektor.fr/19681](http://www.elektor.fr/19681)

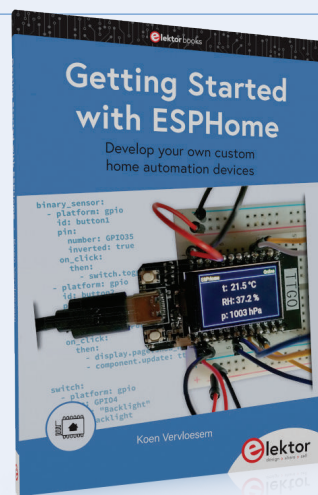


The Complete Linear Audio Library  
(clé USB)

Prix : 149,95 €

**Prix (membres) : 89,95 €**

[www.elektor.fr/19672](http://www.elektor.fr/19672)



Getting Started with ESPHome

Prix : 29,95 €

**Prix (membres) : 26,96 €**

[www.elektor.fr/19738](http://www.elektor.fr/19738)