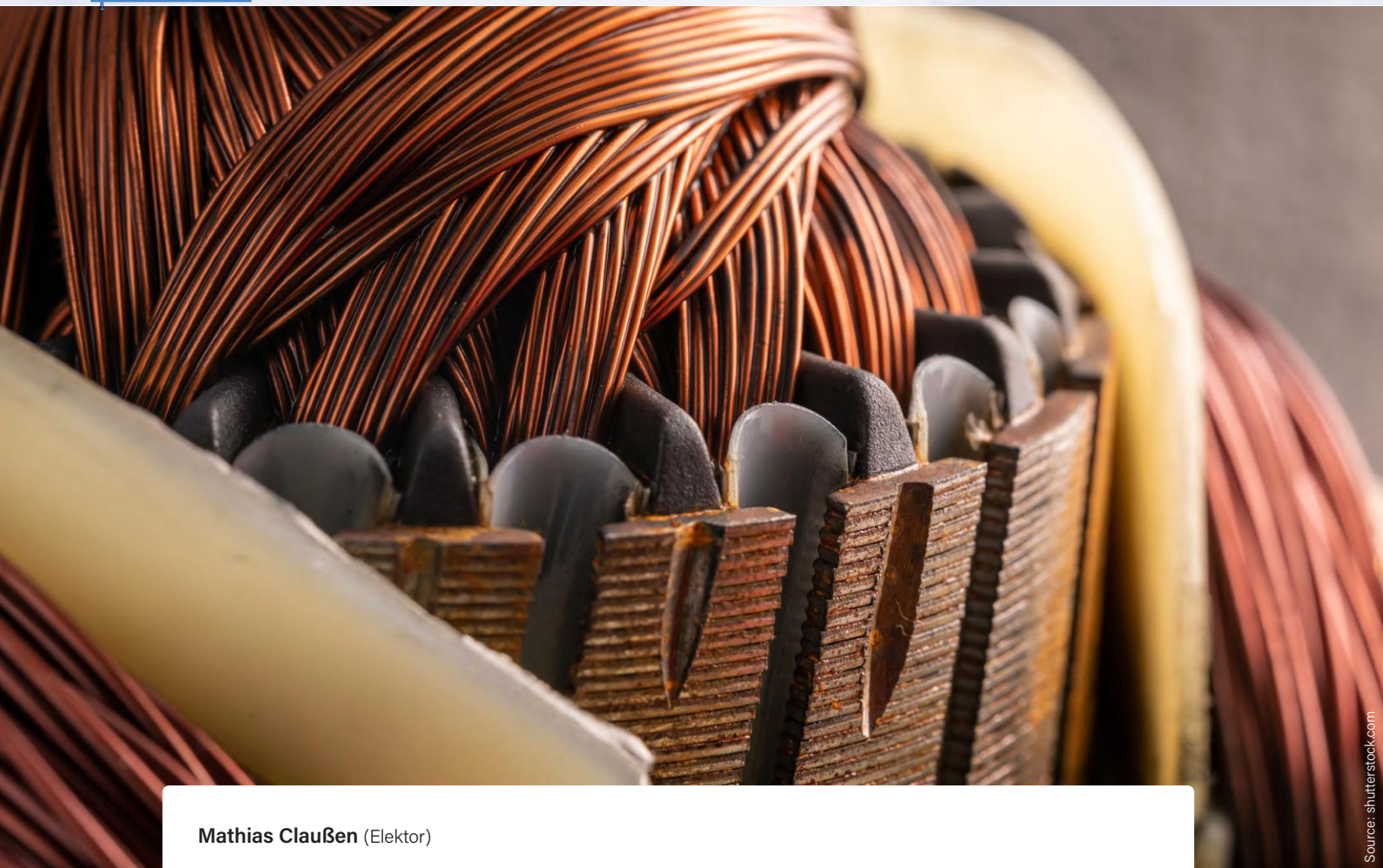


# commande de moteurs : **les ponts en H**

Introduction aux moteurs CC, pas à pas et sans balais



**Mathias Claußen** (Elektor)

Commander des moteurs est nécessaire dans bien d'autres domaines que la ventilation. Les moteurs des convoyeurs, des pompes ou des imprimantes 3D ne peuvent se contenter d'un mode marche-arrêt. Il faut aussi commander la puissance et le sens de rotation. Pour rester accessible, cette introduction n'abordera que les moteurs CC classiques, pas à pas et *brushless* (sans balais) de faible puissance.

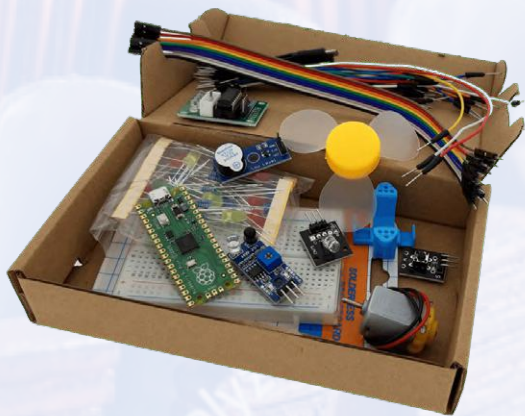


Figure 1. Le kit de base pour Raspberry Pi Pico avec un moteur CC. (Source : Kuongshun)

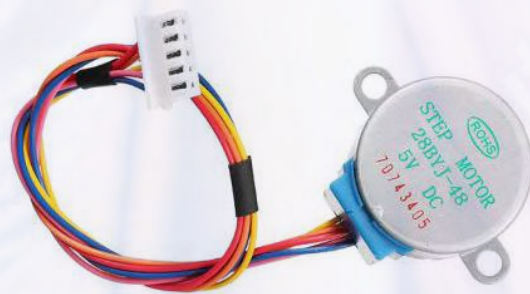


Figure 2. Moteur pas à pas de type 28BYJ-48 pour 5 V CC. (Source : Geekcreit)

Les circuits présentés dans cet article ont pour but d'illustrer nos propos. Ce sont des points de départ pour vos propres réalisations et non des circuits à copier tels quels. Voyons d'abord un moteur CC simple. Il s'agit ici d'un moteur de 3 à 6 V de tension de service et 1 A de courant de service maximal. On trouve des moteurs de ce type dans de nombreux kits de base, par ex. celui du Raspberry Pi Pico [1] (**fig. 1**). Ce kit s'alimente en 5 V, tension fournie par un port USB standard. Certains kits de démarrage incluent aussi un moteur pas à pas ou le proposent contre un supplément modique. Le 28BYJ-48 [2] (**fig. 2**), qui peut être alimenté en 5 V, est un type courant.

### En avant et en arrière

Examinons le circuit de la **figure 3**. Le relais K1 agit comme interrupteur M/A pour le moteur. Le relais est commandé par le contact à action momentanée S1, ainsi, le courant requis par le moteur ne traverse que le relais, et non le contact. La diode D1 supprime le pic de tension aux bornes de la bobine du relais à l'ouverture du contact.

En actionnant le contact à action momentanée S1, le relais K1 colle et le moteur M1 commence à tourner. Lorsque le contact S1 est relâché, le relais retombe et le moteur n'est plus alimenté. Comme les bobines des relais, les enroulements des moteurs CC peuvent produire des pics de tension. La diode D2 agit comme la diode D1 ci-dessus et évite que le moteur ne produise une pointe de tension indésirable à la coupure de K1. Ce circuit ne permet que de faire tourner le moteur dans un seul sens. Mais que faire si le moteur doit aussi tourner en arrière (par ex. pour actionner un treuil) ? Il faut modifier le circuit pour que cela soit possible.

Le *pont en H* est une bonne solution. Voir l'exemple de la **figure 4**. Le nom est basé sur la structure du schéma du circuit. Le moteur est connecté au milieu du H. En actionnant le contact S1 (marche avant), les relais K1 et K4 collent et le courant traverse le moteur de sa borne positive à sa borne négative. Pour que le moteur tourne en arrière, il suffit d'actionner le contact S2 et les relais K3 et K2 collent. Le courant traverse alors le moteur de la borne négative à la borne positive, et il tourne en marche arrière. Noter qu'il ne faut jamais actionner les deux contacts à action momentanée (S1 et S2) à la fois. Si les

relais K1 et K2, ou K3 et K4, collaient en même temps, leurs contacts court-circuiteraient l'alimentation avec un courant élevé qui pourrait les endommager gravement.

### De la lenteur à la rapidité

Avec le pont en H, nous pouvons maintenant commander le sens de rotation du moteur. Ce n'est toutefois pas le cas de la vitesse du moteur. La commutation des relais sous charge, surtout en CC, réduit notablement leur durée de vie. Au-delà de cette usure rapide, les relais sont encombrants et souffrent d'une faible efficacité énergétique.

La première amélioration logique est l'emploi de semi-conducteurs. Voyons un schéma avec des transistors NPN et PNP. La **figure 5** donne le schéma du circuit modifié. Les relais ont été remplacés par une paire de transistors PNP (T1 et T3) et une paire de transistors NPN (T2 et T4). Le circuit de commande a également été modifié. Maintenant, le contact S1, s'il est fermé, relie les bases de T1 et T2 à la terre à travers les résistances de limitation de courant R1 et R2, ou s'il est ouvert, relie ces bases à la tension d'alimentation à travers R5. Le contact S2 agit de même sur les bases de T3 et T4.

Au repos du circuit avec S1 et S2 ouverts, la tension d'alimentation est appliquée aux résistances R1 à R4 à travers les résistances R5 et R6. Par conséquent les transistors T1 et T3 sont coupés et ont donc une impédance élevée (de l'ordre du mégohm). En revanche, les transistors T2 et T4 sont mis en conduction par leur courant de base et ont donc une faible impédance. C'est pourquoi les deux bornes du moteur sont reliées à la masse et aucun courant n'y circule.

Que se passe-t-il maintenant si le contact S1 est fermé et S2 ouvert ? Dans ce cas, les résistances R1 et R2 sont reliées à la masse. La base et l'émetteur du transistor T2 sont au même potentiel et le courant de base cesse. Le transistor T1, en revanche, est conducteur car le courant peut circuler de l'émetteur à la base. Par conséquent, le positif de l'alimentation est appliqué à une borne du moteur tandis que l'autre est reliée à la masse : le moteur commence à tourner. Si le contact S1 est ouvert et l'interrupteur S2 fermé, alors le transistor T3 est passant et le transistor T4 coupé. Dans ce cas, le moteur commence aussi à tourner, mais dans l'autre sens.

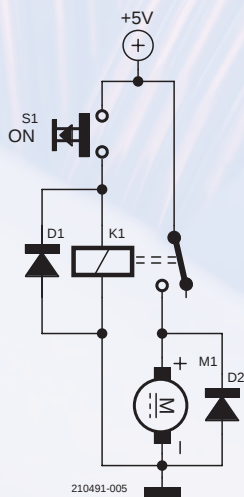


Figure 3. Commande de moteur par des relais.

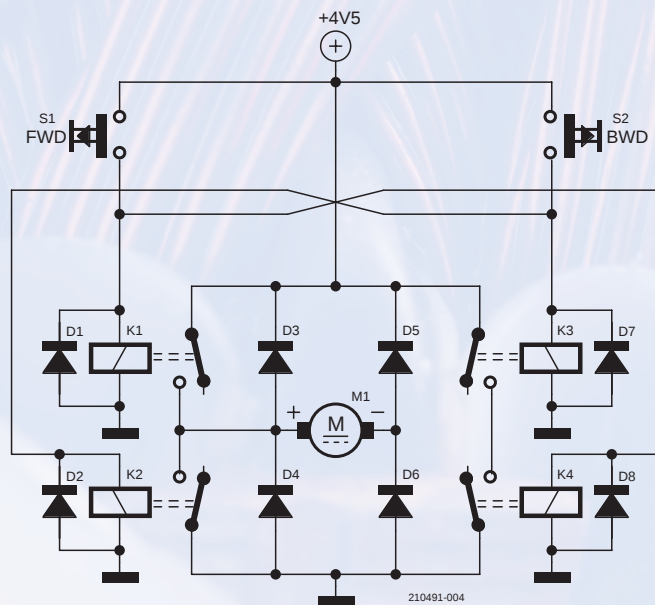


Figure 4. Pont en H avec relais.

Comment faire alors pour commander la vitesse du moteur, par ex. à l'aide d'un microcontrôleur ( $\mu C$ ) ? Deux broches de sortie d'un  $\mu C$  joueront le rôle des contacts. Elles sont notées *PWM\_A* et *PWM\_B* sur la **figure 6**. Pour que le moteur avance ou recule, il suffit de piloter l'état de ces broches de façon adéquate. La *modulation de largeur d'impulsion* (MLI, ou PWM en anglais) peut contrôler la vitesse. Celle-ci est alors déterminée par le rapport cyclique (temps d'activation/période) du signal MLI, et la direction est dictée par la broche de sortie de l'onde impulsionnelle *PWM\_A* ou *PWM\_B*. Ce schéma est conçu pour être alimenté en 5 V, les sorties du  $\mu C$  doivent donc pouvoir gérer ce niveau de signal. Si le moteur doit s'alimenter sous une tension plus élevée ou si le  $\mu C$  ne peut gérer que le 3,3 V sur ses broches d'E/S (par ex. Raspberry Pi), le circuit doit être légèrement modifié.

La **figure 7** répond au problème avec deux transistors supplémentaires (T5 et T6) pilotés par les signaux MLI à travers des résistances de base. Ces transistors permettent d'utiliser des  $\mu C$  fonctionnant à une tension d'alimentation inférieure à celle du moteur CC. Il faut

noter ici que les signaux MLI sont maintenant inversés. Une tension appliquée au transistor T5 ou T6, le met en conduction en tirant à la masse les entrées des transistors T2 et T1, ou T3 et T4. Il faut en tenir compte dans les signaux de commande délivrés par le  $\mu C$ , car cela inverse les sens avant et arrière.

Malgré tout, l'utilisation de transistors PNP et NPN présente des inconvénients. Le courant de base n'est pas négligeable, il y a donc perte d'énergie, et la fréquence du signal MLI est limitée. Le passage de l'état haut à l'état bas n'est pas instantané, il y a donc des pertes de commutation. En outre, au moment où T1 et T2, ou bien T3 et T4, changent d'état, il y a un bref intervalle durant lequel les deux transistors de la paire sont conducteurs. Ainsi un courant plus élevé peut circuler directement de la tension d'alimentation à la masse. Cela augmente aussi la perte de puissance et peut même causer une défaillance précoce.

### Ponts en H avec FET

Le choix de transistors à effet de champ (FET) permet d'éviter certains

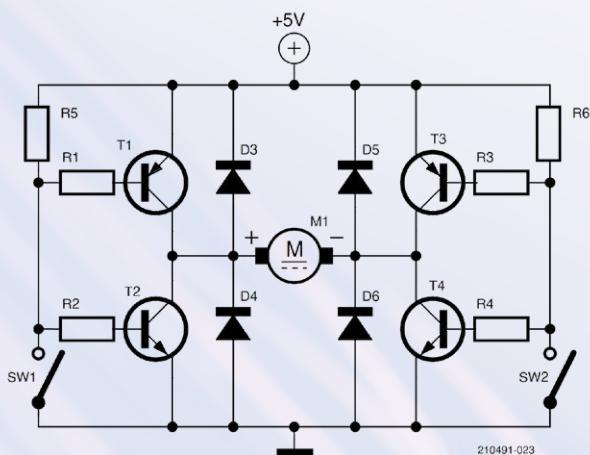


Figure 5. Pont en H avec transistors NPN et PNP.

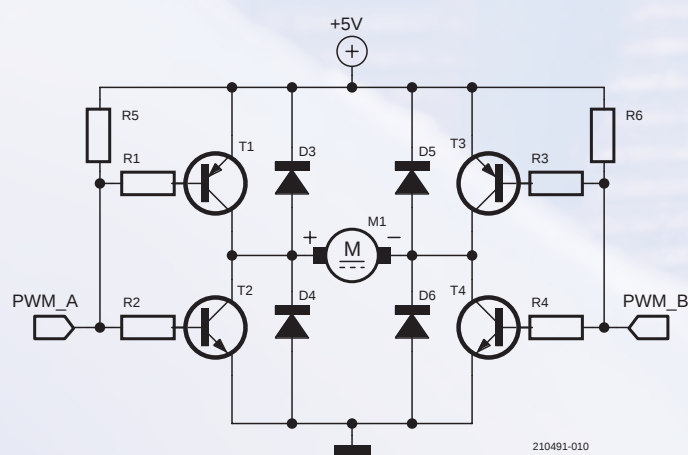


Figure 6. Commande par signaux MLI provenant  $\mu C$ .

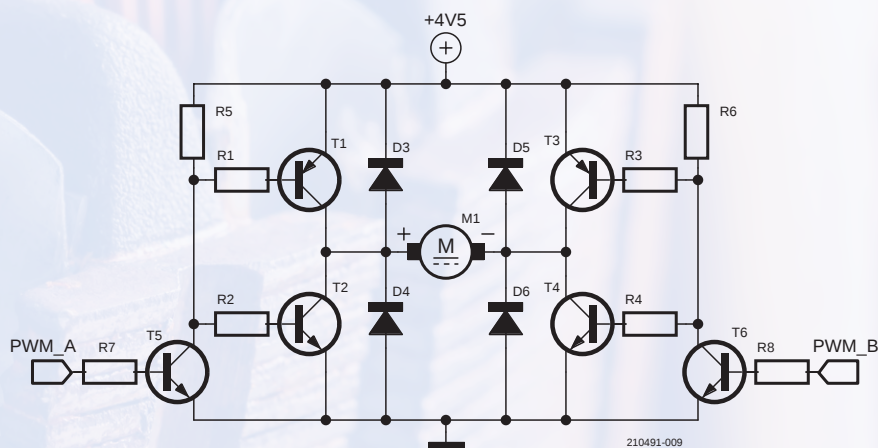


Figure 7. Commande par signaux de 3,3 V.

des inconvénients des transistors bipolaires. Ils peuvent repousser les limites : vers le haut en fréquence et vers le bas en perte de puissance. Tous les ponts en H évoqués ci-dessus ont ce problème de court-circuit transitoire lors de la commutation des transistors. Cet écueil doit être éliminé. Le pont en H de la **figure 8** est donc construit avec des FET à commande individuelle.

T1 et T3 sont des FET PMOS, tandis que T2 et T4 sont des FET NMOS. Un FET PMOS est coupé (haute impédance) lorsque la différence de tension entre la grille et la source est proche de zéro. Pour mettre en conduction (basse impédance) un FET PMOS, la tension de grille doit être plus négative que la tension de source. Pour T1 et T3, cela signifie que lorsque la grille est tirée à la masse, le FET est conducteur. La tension grille/source maximale admissible doit également être prise en compte. Si cette tension est dépassée, le FET sera endommagé. Pour mettre en conduction un FET NMOS, la tension de grille doit être plus positive que la tension de source. Pour T2 et T4, cela signifie qu'ils sont dans un état de

haute impédance lorsque la grille est tirée à la masse, et qu'ils commencent à conduire si la grille est à une tension positive (ici par rapport à la masse).

Sur la figure 8, les diodes D4 à D6 sont toujours là, mais elles ne sont pas nécessaires si des FET sont utilisés car des diodes internes remplissent la même fonction. Le symbole FET de T1 à T4 de la **figure 9** montre clairement la diode interne comme composant de sa structure. Par conséquent, les diodes D4 à D6 peuvent être omises pour aboutir au schéma de la **figure 10**.

Si seule une alimentation de 5 V est disponible, ne peut-on pas simplement relier PWM\_A à !PWM\_A et PWM\_B à !PWM\_B ? Oui en théorie, mais cela conduirait à des courants transitoires de court-circuit encore pires qu'avec des transistors bipolaires. À titre d'expérience mentale, supposons que les PWM\_A et !PWM\_A soient reliés. Avec 5 V appliqués à T1 et T2 comme condition initiale, T1 est conducteur et T2 est coupé. Maintenant, tirons PWM\_A et !PWM\_A à la masse. Le signal de 5 V tombe à 0 V, mais ce n'est pas instantané. Au contraire, cela

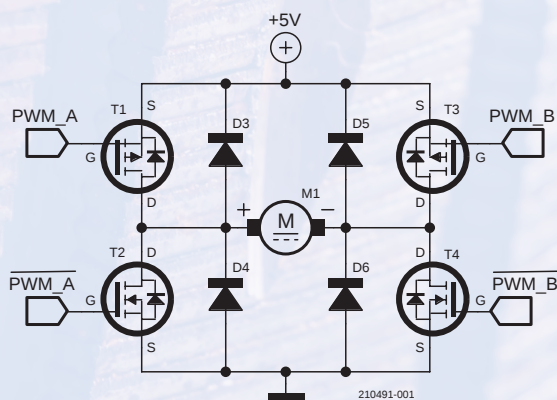


Figure 8. Pont en H avec FET.

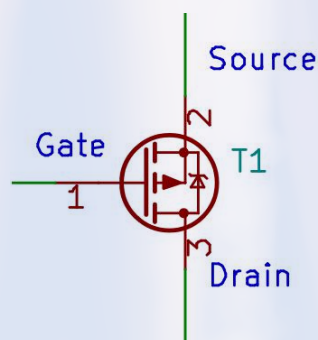


Figure 9. Symbole d'un FET avec diode de suppression intégrée.

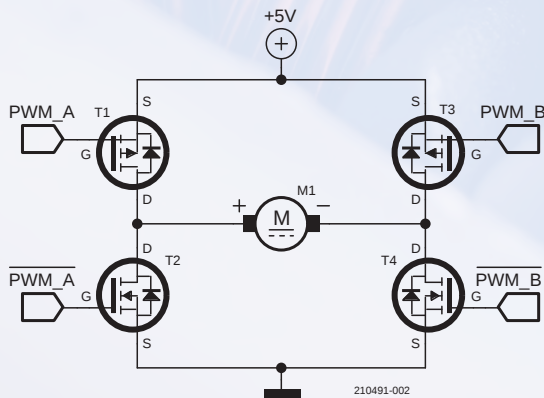


Figure 10 Schéma de circuit sans diodes de suppression.

prend un temps de l'ordre de la nanoseconde. Il y a donc un instant  $t$  où les deux FET sont conducteurs : T2 n'est pas encore tout à fait coupé alors que T1 est déjà passant. Dans cette situation, les deux FET n'opposent que qq  $\Omega$  au courant de court-circuit qui circule directement dans T1 et T2. Cela s'appelle le *shot-through* (tir traversant), et c'est proscrit dans un pont en H car les composants risquent d'être sévèrement endommagés. Il est donc vital de ne pas essayer de connecter les deux signaux. Certaines unités MLI de  $\mu C$  perfectionnées peuvent produire des signaux de commande de ponts en H en insérant des temps morts appropriés pour éviter ces conditions destructives.

### Circuit intégré de commande de pont en H

Il faut soit que le  $\mu C$  gère des temps morts garantissant que T1 et T2 ne sont jamais conducteurs en même temps, soit utiliser un circuit intégré (CI) de commande approprié. Le pont en H à transistors FET (deux NMOS et deux PMOS) décrit ci-dessus a un autre inconvénient : la conductivité des FET PMOS est au moins dix fois moins bonne que celle des NMOS. Cela signifie une perte thermique plus forte,

surtout avec des courants relativement élevés. La **figure 11** montre un circuit avec deux CI de commande en demi-pont (NCP5901B de ON Semiconductor) et donc câblé avec quatre FET NMOS. Les condensateurs de ce schéma ne sont pas des condensateurs de blocage ; C1 et C2 font partie de la pompe de charge du NCP5901B. Mais pourquoi le CI d'attaque en demi-pont a-t-il besoin d'une pompe de charge ? Ici, T1 et T3 sont des FET NMOS qui, comme vu ci-dessus, ont besoin d'une tension de grille supérieure à celle de source pour devenir passants. Donc pour T1 et T3, cela signifie que la tension de grille doit être supérieure à la tension d'alimentation du pont en H. La pompe de charge permet d'y parvenir. La **figure 12** donne le schéma fonctionnel interne du CI de commande du demi-pont. Le bloc noté *Anti-Cross Conduction* (anticroisement de conduction) sert à produire les temps morts destinés à empêcher le *shot-through*.

Ainsi, avec des FET adaptés à ce cas d'utilisation, on peut construire un pont en H à partir de composants discrets. De tels ponts en H permettent aussi de traiter des courants supérieurs à 25 A. Une solution plus compacte, entièrement intégrée, est possible pour de plus faibles courants.

Le STM L298N (**fig. 13**) abrite deux ponts en H complets et équipe bien des cartes de commande de moteur bon marché. Ce CI n'intègre pas des FET, mais des transistors bipolaires. Il peut fournir jusqu'à 4 A sous 46 V. Un coup d'œil au schéma fonctionnel (**fig. 14**) révèle une structure très familière. Il ne fait pas de doute que les  $\mu C$  à E/S en 3,3 V peuvent piloter le L298N. Ce module est disponible en vente à distance pour environ 3 à 6 €. Le module IFX9201SG d'Infineon est nettement plus compact. Il peut gérer jusqu'à 6 A et dispose de circuits de protection et de diagnostic intégrés, comme le montre la **figure 15**. Il coûte environ 4 € par appareil. Il est facile de concevoir une commande de moteur CC avec ce CI, mais il est indisponible jusqu'à la mi-2022, comme tant d'autres composants à base de semi-conducteurs. S'il vous faut un pont en H prêt à l'emploi pour commander un moteur, jetez un coup d'œil aux cartes Cytron [3] dans la boutique Elektor.

### Moteurs pas à pas, étape par étape

Les moteurs pas à pas tournent, mais comme leur nom le suggère, par fractions de rotation appelées pas ou incréments. Ils ne sont pas conçus

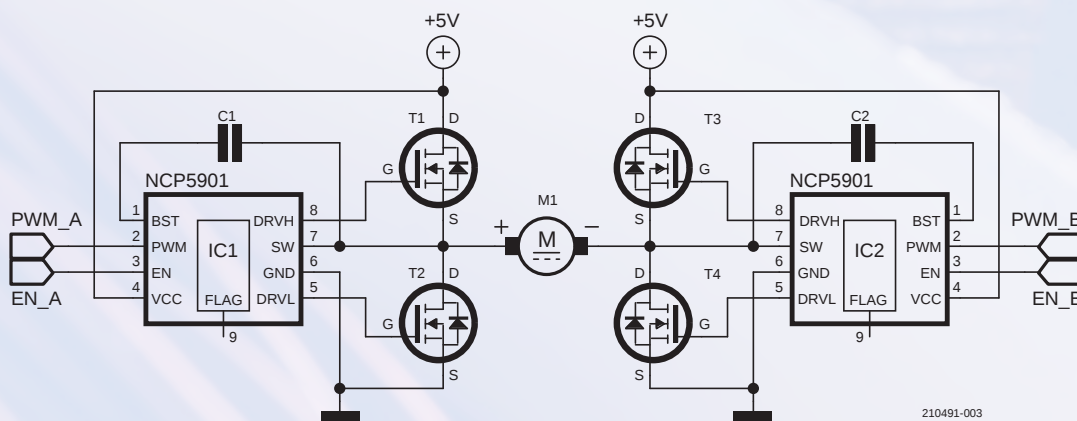


Figure 11. Quatre FET NMOS avec CI de commande.

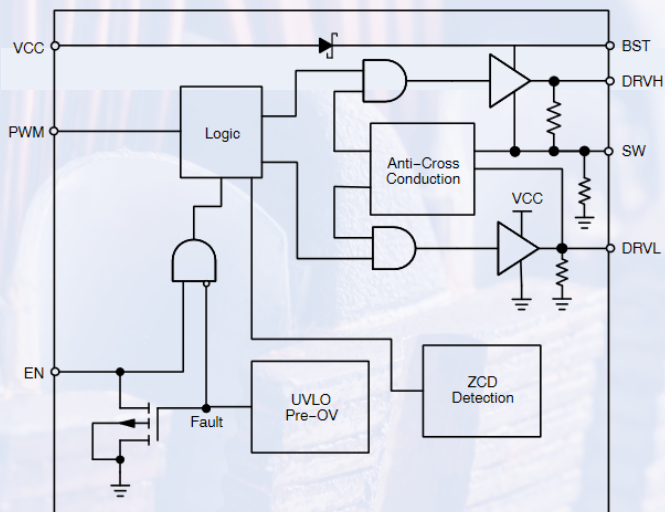


Figure 12. Schéma-bloc interne du NCP5901B de ON Semiconductor (source : ON Semiconductor).



Figure 13. Le module L298N en double pont en H.

pour le fonctionnement continu à vitesse élevée, mais ils peuvent effectuer des rotations incrémentielles à couple élevé. Les moteurs pas à pas sont présents dans la plupart des foyers... Dans les imprimantes à jet d'encre, ils servent à déplacer la tête d'impression ou à l'avance du papier. Un moteur pas à pas fonctionne avec une taille de pas définie (l'incrément), il est donc très facile de calculer la position exacte de la tête d'impression. Certains d'entre nous se souviennent du son des moteurs pas à pas des lecteurs de disquettes, où ils déplaçaient la tête de lecture/écriture.

Mais comment piloter un moteur pas à pas, et pourquoi se déplace-t-il par pas ? Il existe différentes formes de moteurs pas à pas : moteurs pas à pas à réluctance ou à aimant permanent ou encore hybrides. Nous considérons ici les moteurs pas à pas hybrides. Ils se sont imposés dans de nombreuses applications en raison de leur couple élevé et de leur grand nombre de pas par rotation.

La **figure 16** donne la structure de ce type de moteur pas à pas. Un rotor, composé d'aimants permanents et d'anneaux dentés en fer doux prend place à l'intérieur. Le stator est constitué d'un jeu d'enroulements

disposés de telle sorte que le rotor ne se déplace que d'un pas à la fois. Côté entraînement, les moteurs pas à pas les plus courants ont deux pôles. D'autres nombres de pôles sont possibles, mais ne seront pas considérés ici. Côté structure, il existe deux types de moteurs pas à pas : unipolaire et bipolaire. Nous allons les examiner ci-dessous.

### Moteurs pas à pas unipolaires

Notre moteur pas à pas type sera le 28BYJ-48 illustré à la **figure 2** et présent dans de nombreux kits de démarrage. Ce petit moteur pas à pas unipolaire possède en outre un réducteur d'un rapport de 63,68395:1. Avec un pas de 11,25°, le nombre de pas pour une rotation complète de l'arbre de sortie du réducteur est de 2037,8864, soit environ 2038 pas par tour (arrondi au chiffre supérieur). La connexion du moteur nécessite cinq fils : A, B, C, D, et l'alimentation.

La commande d'un moteur pas à pas unipolaire est très facile, et pour cette taille de moteur, l'ULN2003, disponible auprès de divers fabricants, convient. Comme le montre le schéma-bloc de la **figure 17**, l'ULN2003 renferme sept transistors Darlingtons. Ce CI comprend des diodes de

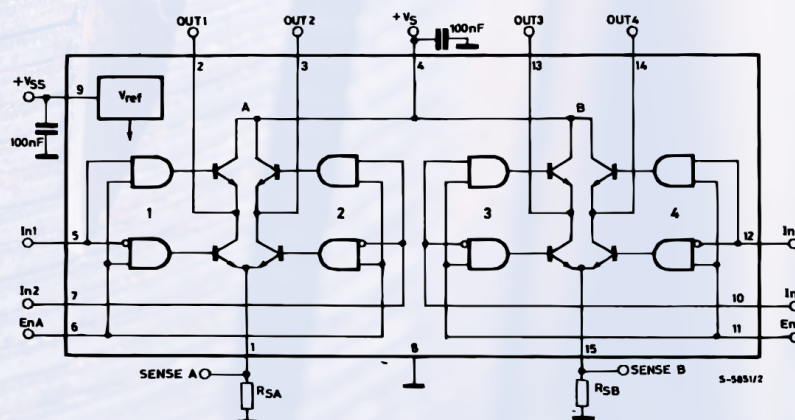


Figure 14. Structure interne du L294N (source : STMicroelectronics).

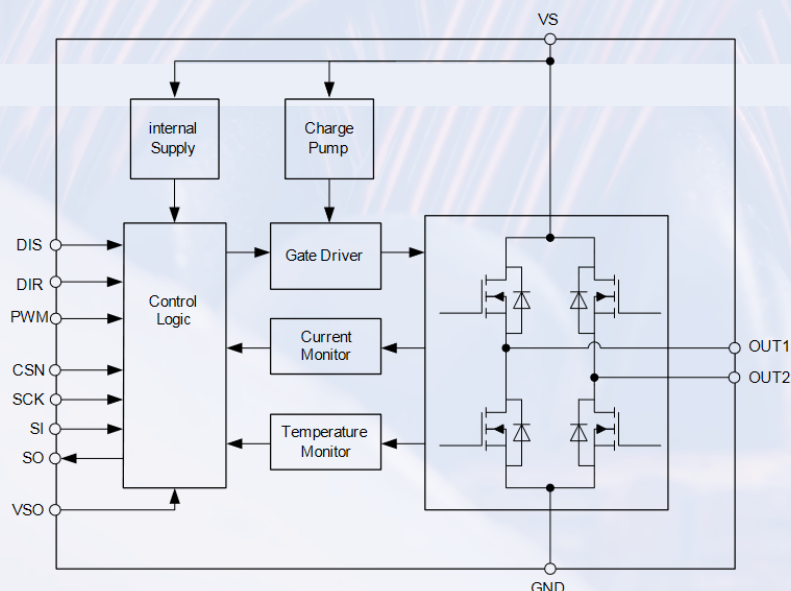


Figure 15. Schéma-bloc interne de l'IFX9201SG d'Infineon (source : Infineon).

suppression, il peut donc tout à fait piloter des charges inductives. La **figure 18** montre un circuit avec ULN2003 utilisable pour piloter un moteur pas à pas 28BYJ-48. Outre le mode pas à pas, le 28BYJ-48 accepte le mode demi-pas. Selon la fiche technique, c'est même la méthode d'entraînement recommandée. Le **tableau 1** donne la séquence des signaux d'entraînement pour une rotation dans le sens horaire. Pour faire un pas dans le sens inverse, il faut parcourir la séquence en sens inverse. Les moteurs pas à pas unipolaires sont devenus rares aujourd'hui car ils ne délivrent que la moitié environ du couple d'un moteur pas à pas bipolaire de même taille. Cependant, ceci est compensé par la commande très simple avec un ULN2003. Il est possible de modifier un moteur pas à pas 28BYJ-48 pour le rendre bipolaire. À cet effet, lisez l'article du blog de jangeox [4]. Ce moteur pas à pas pourra produire plus de couple, mais aura besoin d'un pilote différent.

## Moteurs pas à pas bipolaires

Les moteurs pas à pas bipolaires de la plupart des imprimantes 3D n'ont que quatre fils. Pour ces moteurs, il existe des tailles normalisées définies par la *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA). La NEMA 17-03, par exemple, désigne la taille d'un type de moteur

pas à pas produit et/ou vendu par diverses entreprises. Le moteur pas à pas NEMA17-03 de Joy-IT [5] en est un exemple (**fig. 19**). Un ULN2003 ne suffit pas à piloter ce type de moteur pas à pas ; le circuit de commande nécessite deux ponts en H. Un L298N, comme vu ci-dessus pour les moteurs CC, fournit deux ponts en H en un seul boîtier. Il commande le moteur dans le circuit de la **figure 20**. Ces ponts en H étant à transistors bipolaires, des diodes de suppression sont nécessaires aux sorties. La séquence du **tableau 2** doit être exécutée pour obtenir un pas dans le sens horaire.

Au contraire des moteurs unipolaires, l'enroulement complet est utilisé, et non la moitié seulement avec prise centrale. Le couple est plus élevé qu'avec un moteur pas à pas unipolaire de même taille. La commande par ponts en H est très facile, et des CI hautement intégrés comme le MP6500 de MPS ou le TMC2300-LA de Trinamic la rendent encore plus aisée. Ils contiennent une partie de la logique qui exécute les séquences de pas. Le  $\mu C$  ne spécifie que la direction souhaitée (sens horaire ou antihoraire) et fournit une impulsion pour chaque pas souhaité. Les moteurs pas à pas ont l'avantage d'un couple élevé et, à l'inverse des moteurs CC, n'ont pas besoin de balais ni de commutateurs pour acheminer le courant au rotor.

Tableau 1. Séquence d'une étape

| Étape/<br>couleur | Orange | Jaune | Rose | Blue |
|-------------------|--------|-------|------|------|
| 1.                | 1      | 0     | 0    | 0    |
| 2.                | 1      | 1     | 0    | 0    |
| 3.                | 0      | 1     | 0    | 0    |
| 4.                | 0      | 1     | 1    | 0    |
| 5.                | 0      | 0     | 1    | 0    |
| 6.                | 0      | 0     | 1    | 1    |
| 7.                | 0      | 0     | 0    | 1    |
| 8.                | 1      | 0     | 0    | 1    |

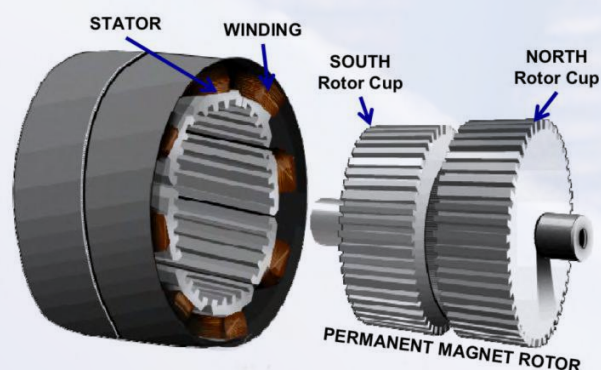


Figure 16. Structure d'un moteur pas à pas (source : Microchip)

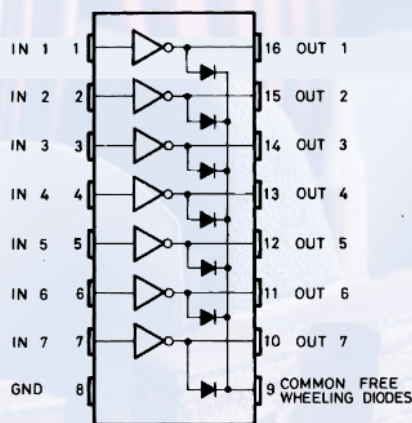


Figure 17. Structure interne de la matrice Darlington ULN2003 (source : STMicroelectronics).

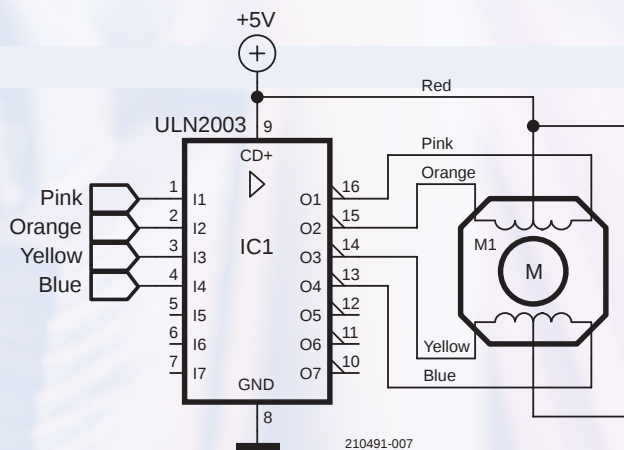


Figure 18. Schéma du circuit avec ULN2003 et moteur pas à pas.

## Moteurs CC sans balais

En combinant les propriétés d'un moteur CC avec le couple et la faible maintenance d'un moteur pas à pas, on obtient un moteur CC sans balais. Ces moteurs dits *BLDC* (en anglais *brushless DC* = CC sans balais) sont parfaits pour les tâches d'entraînement dans toutes sortes d'applications. Dans les moteurs CC classiques, les balais conduisent le courant aux enroulements du rotor. À chaque tour, ces balais s'usent et répandent de la poussière conductrice à l'intérieur du moteur, il faut les remplacer à intervalles réguliers et les moteurs peuvent nécessiter des nettoyages. Les moteurs BLDC n'ont pas besoin de cet entretien et ils fournissent un couple élevé dans un petit boîtier. Cependant, la commande des moteurs BLDC est complexe et tout défaut dommageable. C'est pourquoi nous ne donnons ici qu'un bref aperçu de la théorie de la commande des moteurs BLDC.

La structure d'un moteur BLDC est très similaire à celle d'un moteur pas à pas. Il comporte un stator (la partie immobile) et un rotor. Deux configurations de rotor sont possibles : interne et externe. Certains moteurs BLDC intègrent des capteurs à effet Hall pour déterminer la position du rotor ; les moteurs à trois fils seulement n'ont pas cette forme de rétroaction. Ils nécessitent un circuit un peu plus complexe

et plus de calculs. Pour les moteurs BLDC sans capteur, la note applicative de l'AVR444 [6] est un bon point de départ pour en savoir plus sur le sujet.

La **figure 21** donne la structure d'un moteur BLDC avec rotor externe. Ici, le rotor externe est un aimant permanent. À l'intérieur du rotor se trouvent six enroulements disposés en trois paires. Chaque paire est enroulée de telle sorte qu'un enroulement forme le pôle nord et l'autre le pôle sud lorsque le courant les traverse. Les pôles du rotor tendent à s'aligner avec une paire d'enroulements dans laquelle le courant circule. La **figure 22** montre comment le champ magnétique des enroulements tire le rotor et le fait tourner. Cependant, une seule des trois paires d'enroulements est utilisée à la fois, ce qui peut être amélioré. Quand la paire d'enroulements A attire l'aimant permanent dans la première étape, la paire C peut contribuer à le repousser. Ainsi, deux enroulements participent au mouvement de rotation, augmentant le couple et donc les performances du moteur. La **figure 23** montre la rotation avec deux enroulements alimentés. La chronologie des signaux de commande doit être correcte.

Les enroulements sont entraînés par trois demi-ponts. Vous avez déjà appris à les connaître dans la partie consacrée aux moteurs CC. La

Tableau 2. Séquence pour un moteur pas à pas bipolaire.

|    | A | B | C | D |
|----|---|---|---|---|
| 1. | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 2. | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 3. | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 4. | 1 | 0 | 0 | 1 |



Figure 19. Moteur pas à pas Joy-IT NEMA17-03 (source : Joy-IT).

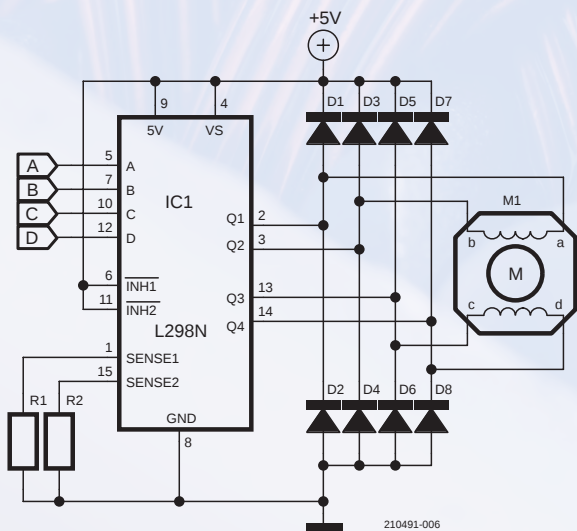


Figure 20. Le L294N en commande de moteur pas à pas.

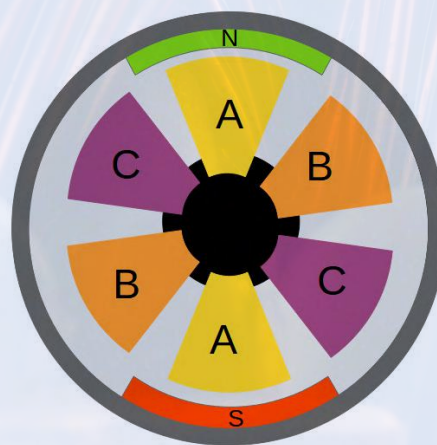


Figure 21. Structure d'un moteur CC sans balais.

**figure 24** donne la disposition théorique de ces trois demi-ponts (aussi disponibles sous forme de CI auprès de différents fabricants). Des signaux appropriés doivent être fournis aux entrées A, B et C pour commander le moteur. Le NCP5901B a un diviseur de tension qui polarise chaque broche d'entrée à 2,0 V quand le  $\mu C$  ne la commande pas. Entre 1,3 V et 2,7 V, le NCP5901B se met en mode émulation de diode, c.-à-d. en roue libre, de sorte que l'enroulement n'est pas relié à la masse ni à la tension d'alimentation du moteur. Cela permet par la suite de mesurer la force contre-électromotrice (FCEM) pour déterminer la position du rotor.

Supposons que le rotor tourne et qu'aucun capteur à effet Hall n'est installé dans le moteur, la FCEM de l'enroulement non alimenté peut être utilisée. Cela permet de déterminer la position du rotor, ou plus exactement l'instant où le rotor a tourné suffisamment pour être entre deux paires d'enroulements. Les trois paires d'enroulements A, B et C sont repérées sur la figure 23. Si une tension est appliquée entre A et B, la tension entre les deux enroulements peut être détectée sur l'enroulement C. Au moment où une tension est appliquée entre A

et B, un chrono est lancé et la tension sur l'enroulement C est surveillée. Quand celle-ci atteint la moitié de la tension d'alimentation du moteur, le rotor a tourné du demi-angle de rotation entre deux paires d'enroulements. Ce temps est utilisé pour calculer quand les enroulements suivants doivent être alimentés et avec quelle polarité. Par conséquent, l'aimant permanent est maintenu en rotation par le champ magnétique tournant.

La vitesse du moteur peut être contrôlée par des signaux MLI, qui doivent être appliqués en conséquence aux entrées A, B et C du circuit intégré de commande. Le matériel décrit dans la note d'application AVR444 est le kit d'évaluation ATAVRMC100, dont la description et les schémas se trouvent sur la page web de Microchip [7]. Les notes d'application AN1946 de ST [8] et AN12435 de NXP [9] donnent des informations détaillées. La commande de moteurs BLDC nécessite un peu plus de logiciel que celle des moteurs pas à pas ou CC simples. La détection de la position du rotor, le filtrage et le conditionnement interne du signal par logiciel rendent la commande moins intuitive qu'avec les moteurs CC classiques.



Figure 22. Le rotor est tiré par un champ magnétique.



Figure 23. Le rotor est entraîné par deux des trois paires d'enroulements.

