

Réaliser un CYCLOTRON.

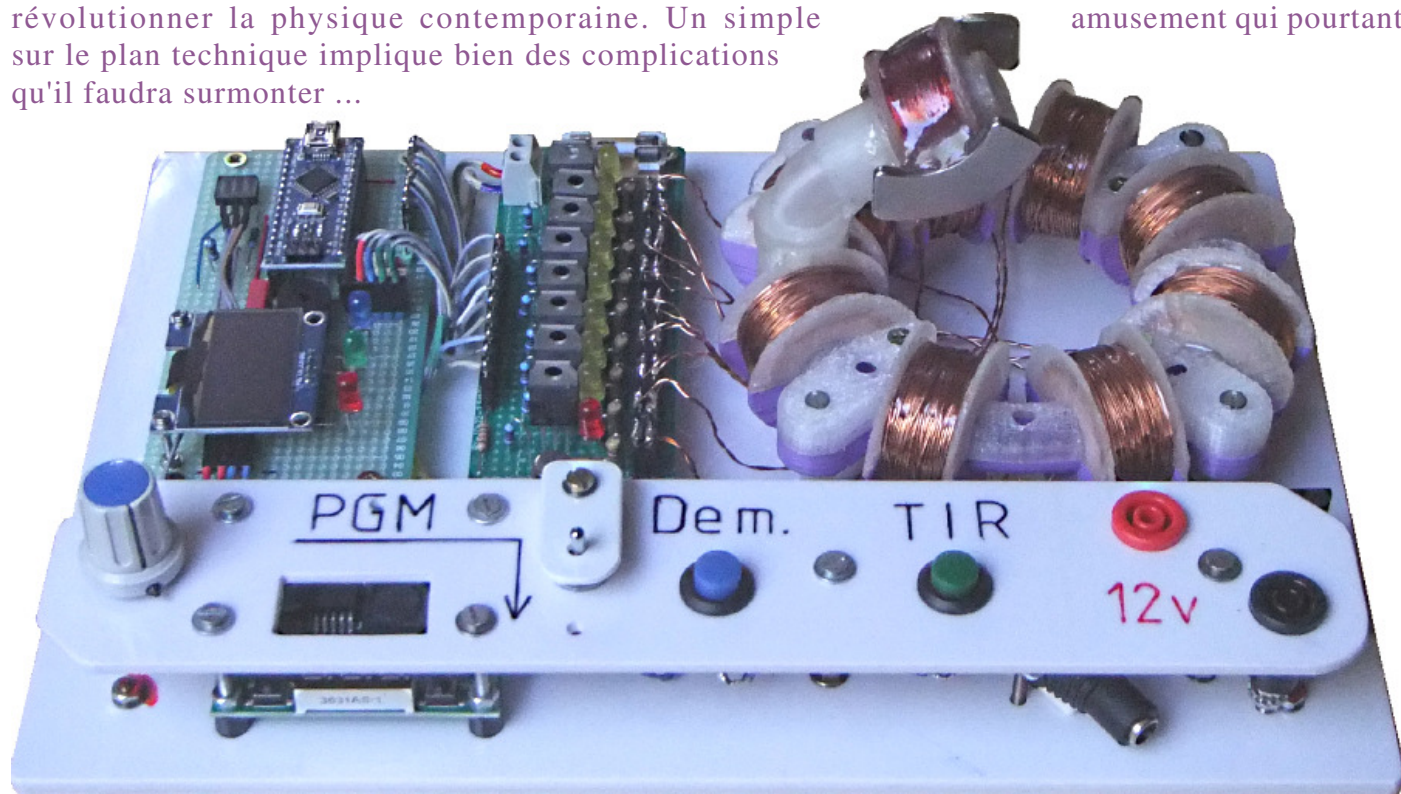
Par Nulentout : mardi 20 Juin 2023.

Cyclotrons, Biglotrons, Trucs en Tron sont des machines parfois colossales sortie directement des films de science-fiction. Ce sont des accélérateurs de particules, des appareils qui propulsent des particules chargées électriquement à des vitesses vertigineuses à l'aide de champs électromagnétiques. Dans un Synchrotron, (*Autre Truc en "Tron".*) les particules suivent une trajectoire circulaire de rayon maintenu constant par un champ magnétique croissant avec l'énergie des particules. La fréquence du champ électrique d'accélération augmente. C'est exactement sur ce principe que fonctionne notre minuscule colosse, sauf que les particules sont des billes en acier et non chargées électriquement. Elles sont donc guidées par un tore en PLA moulé sur une imprimante 3D. Huit électroaimants vont créer un champ magnétique tournant à une vitesse de plus en plus élevée pour accélérer la bille.

Un collisionneur est une machine qui accélère simultanément deux faisceaux de particules en sens inverse, afin de les faire entrer en percussion frontale. Ce type d'installation est plus difficile à construire, mais est bien plus performant qu'un accélérateur "simple" projetant ses particules sur une cible fixe. Lors de la collision des particules, les phénomènes qui sont fonction de l'énergie du choc sont analysés par les chercheurs pour faire évoluer la physique des particules. La petite machine que je vous propose dans ces lignes est un "délire d'enfant" qui fasciné par ces engins d'un autre monde désirais depuis toujours en concrétiser une petite représentante ludique.

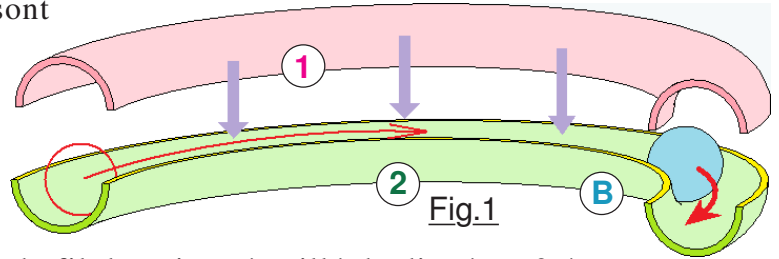
Intermédiaire entre le collisionneur linéaire et l'accélérateur sur particule fixe, notre colosse lilliputien emprunte un peu de l'ADN sur les deux types d'accélérateur. *Comme un synchrotron il accélère la bille projectile à une vitesse maximale permise sur la machine. Puis, au bon moment il place sur la trajectoire du projectile une bille cible* pour provoquer la collision.

Naturellement les énergies mises en œuvre sont dérisoires et la collision ne génèrera pas des rayonnements à haute énergie. Même à vitesse maximale la bille projectile ne dépassera pas la vitesse de la lumière. Ce n'est qu'un petit jouet qui se veut un tantinet scientifique sans pour autant révolutionner la physique contemporaine. Un simple amusement qui pourtant sur le plan technique implique bien des complications qu'il faudra surmonter ...

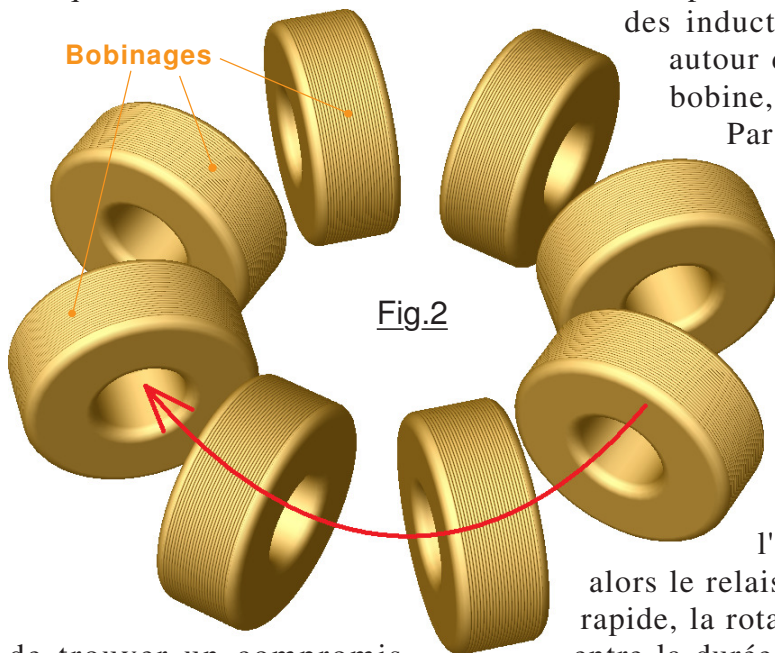


01) Le principe de fonctionnement de notre machine.

Fondamentalement la particule accélérée est constituée d'une bille de roulement **B** en acier trempé de diamètre nominal 10mm. Le "guide d'onde" n'est pas autre chose qu'un tore dans lequel elle peut circuler librement. Toutefois, la gouttière de guidage doit être parfaitement lisse. Cet anneau creux étant moulé sur une imprimante 3D, pour ne pas avoir dans le volume de roulement des "supports", le tore est réalisé en deux pièces complémentaires **1** et **2** assemblées l'une sur l'autre par des boulons ϕ M3. Ces deux éléments sont maintenus en contact sur le plan de joint qui sur la Fig.1 est colorié en jaune. L'acier ayant la propriété d'être magnétique, pour accélérer cette "particule" on va procéder par attraction. Répartis uniformément tout le tour du tore de guidage, on va disposer huit électroaimants constitués de bobinages de fil de cuivre émaillé de diamètre 0,4mm.



Chaque bobine d'induction contient environ 425 spires. L'arrangement de la Fig.2 présente l'ensemble des inducteurs qui dans la pratique sont positionnés autour du tore de guidage. Quand on alimente une bobine, elle est susceptible d'attirer vers elle la bille.

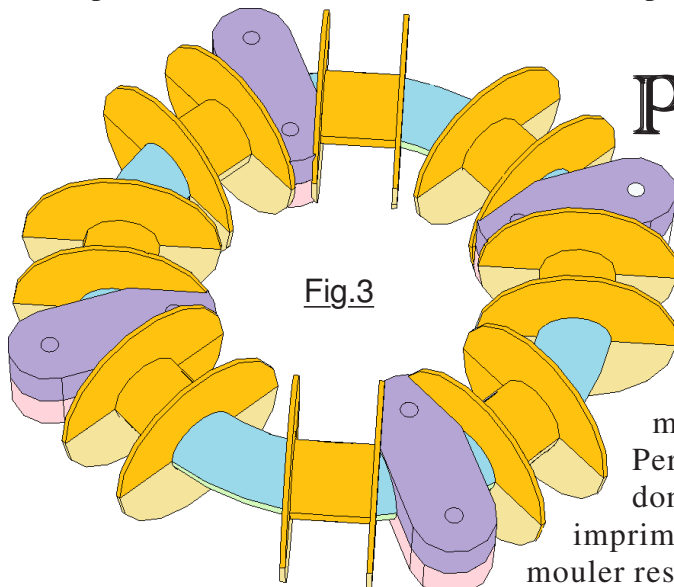


Par de courtes impulsions, on va alors alimenter les bobines dans l'ordre, et ainsi déterminer le sens de rotation. Ça c'est la théorie. Dans la pratique, ce concept simple se heurte à pas mal de difficultés. Alimentées sous 12V, les bobines sont traversées par un courant d'environ 2A. L'impulsion est courte et la bille doit être à proximité de l'enroulement. Si le magnétisme est suffisant, alors elle est attirée et accélère. Il faut que sa vitesse soit suffisante pour l'envoyer vers le prochain bobinage qui prend

alors le relais. Si la commutation des inducteurs est trop rapide, la rotation ne va pas "accrocher". Il importe donc entre la durée de chaque impulsion et le cadencement de

de trouver un compromis de commutation. Comme nos connaissances en électromagnétisme et en dynamique ne sont pas suffisantes pour déterminer un bon compromis par calcul préalable, un programme "outil" sur la carte Arduino NANO nommé [P03_Generer_un_signal_binaire.ino](#) permet en préambule d'observer l'attraction d'une seule bobine et de mettre au point l'électronique de commutation, car découper un courant de 2A sous 12Vcc n'est pas forcément élémentaire.

➤ **Un premier pas vers la pratique.**



Premier investissement, et pas des moindres, étudier le corps du "magnétron" pour pouvoir ensuite le concrétiser sur une imprimante 3D. Outre des deux demi-tours en bleu et vert sur la Fig.3, il faut leur ajouter les oreilles de fixation en violet et rose, ainsi que les seize joues de matérialisation des bobinages inducteurs. (*En beige et en orange.*) La première limitation à laquelle on se heurte correspond aux dimensions maximales possibles sur la machine de moulage. Personnellement, je possède une MicroDelta Rework dont le plateau de travail est circulaire pour un diamètre imprimable de 150mm. Il fallait donc que les deux pièces à mouler restent un peu en deçà de cette surface, car

il faut la place pour le cordon initial d'amorçage. Les fichiers pour deux éléments à mouler en 3D sont disponibles dans le dossier <Fichiers imprimante>. Vous disposez ainsi des fichiers de type **STL**, et surtout ceux de type **gco**. Ce didacticiel est accompagné de photographies réalisées durant le développement de ce petit projet. Ces dernières sont disponibles dans le dossier <Galerie d'images>. Consultez en particulier **Image 01.JPG** qui présente la machine en train de mouler l'une des deux pièces. On peut observer qu'il était pratiquement impossible de faire plus grand sur ce type de machine. Du coup on bénéficie d'un ensemble compact qui mobilisera peu de place.

02) Étude préalable de validité du concept.

E ngager des dépenses significatives sans avoir au préalable étudié au minimum la faisabilité est vraiment dangereux. Aussi, je ne me lance jamais tête dans le guidon, sans faire un minimum de vérifications. L'approvisionnement le plus couteux est celui de la bobine de fil émaillé servant à bobiner les inducteurs. Aussi il me semblait impératif de réaliser un enroulement "pour voir".

> Le domaine des ampères-tours.

L' alimentation des inducteurs se faisant en courant continu, la limitation en intensité consommée n'est due qu'à la résistance ohmique du bobinage. On se doute que plus le fil est gros, plus faible est cette limitation et forte l'intensité qui en résulte. Hors la grandeur du champ magnétique généré est proportionnelle au nombre d'**ampères-tours**. Par exemple une spire parcourue par un courant d'un ampère crée exactement le même champ magnétique que 100 spires parcourues par 10mA. Aussi, pour ne commuter que des courants faibles qui de plus seraient compatibles avec la "sortance" des broches binaires de l'ATme328 la tentation d'utiliser un fil fin est grande ... mais il faut les bobiner ces inducteurs et vous allez voir que c'est une sacré galère.

D isposant d'une quantité considérables de transformateurs basse tension de récupération, la première étape de cette opération d'évaluation a consisté à démonter la carcasse magnétique d'un petit transformateur 220V : Deux fois 12v 500mA. On aboutit à la réserve de fil gratuite montrée sur **Image 02.JPG** qui montre l'enroulement basse tension qui va servir à bobiner l'inducteur de validation. Bobiner, c'est enfantin dans le principe. On fait faire le tour du noyau à la réserve de fil. Mais dans notre cas, à chaque tour la grosse carcasse prismatique doit passer par le centre de l'ensemble. Autant dire que ce n'est pas une sinécure. ne vous attendez pas à un bel enroulement à spires jointives. Par utilisation de ce fil de 0,4mm de diamètre, pas moins de 425 spires ont été enroulée. En 12V le courant continu qui la traverse fait deux ampères. Toutefois, ce courant ne sera appliqué que le huitième du temps, arrivant à un courant moyen de 250mA parfaitement compatible avec le fil utilisé. La puissance consommée sera de 3W, aussi il ne faudra pas faire fonctionner cette machine en permanence, mais lui ménager des périodes de refroidissement. Sur **Image 03.JPG** on peut observer le

principe du bobinage. Il serait possible d'utiliser du fil plus petit. Par exemple du fil de 0,1mm de diamètre. On logerait alors 3400 spires par enroulement et le courant ne serait plus que de l'ordre de 200mA. **NON !** Trop galère.

Déjà qu'avec le fil de 0,4mm on va devoir se coltiner 3400 tournicotis pour les huit inducteurs. Alors on va en rester à cette solution "raisonnable". **ATTENTION : Avant de bobiner le premier enroulement, il faut assembler on l'avait deviné des deux demi-tors. Une fois le fil enroulé, l'ensemble devient indémontable. Aussi, avant de procéder au bobinage, il faut impérativement s'assurer que la bille peut se déplacer strictement sans problème sur les**



360° du tore de guidage. Dans ce but, il faut

impérativement éliminer la moindre petite bavure qui s'opposerait à la libre rotation de la bille. Quand le chemin de roulement est parfaitement lisse sur les deux demi-tores, alors on assemble les deux pièces et l'on peut commencer à bobiner. Le résultat sur la Fig.4 montre que l'on a pas obtenu du spire contre spire, mais ce "vrac" un peu désordonné convient toutefois sans inconvénient. Les deux pièces ont été moulées en PLA translucide, car on désire voir se déplacer la bille. Sur le dessus, des orifices de 4mm tels que **X** ont été répartis tout le tour sur le corps du tore pour éventuellement faciliter l'observation des mouvements des billes.

➤ Les autres bobinages du "magnétron".

Il est impensable d'imaginer que nous allons bobiner les enroulements avec la technique utilisée sur le démonstrateur et montrée sur la Fig.4 ainsi que sur [Image 3.JPG](#) dans la <Galerie d'images>. Déjà l'internaute "lambda" ne disposera pas de transformateur pour en récupérer le fil émaillé. Et surtout, passer 425 fois le gros cube qui accroche partout à travers le noyau de la machine serait infiniment trop rébarbatif. On va donc approvisionner une bobine de 1kg de fil émaillé de 0,4mm de diamètre par l'entremise du commerce en ligne. C'est le "composant" de loin le plus coûteux dans notre projet. Je ne suis pas du tout très malin pour chercher sur Internet, et vous trouverez probablement pour moins onéreux. Toutefois, je cite ici ma source pour celles et ceux qui seraient encore moins débrouillards que moi :

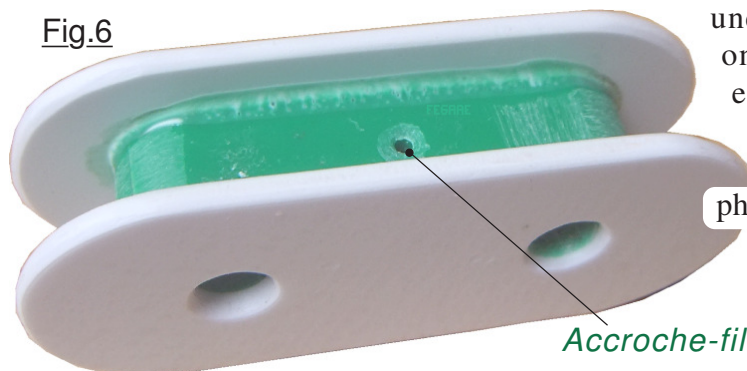
https://www.amazon.fr/dp/B09RWFNVZL?psc=1&ref=ppx_yo2ov_dt_b_product_details

Disposer d'une belle bobine est une chose ... s'en servir en est une autre.

Nous sommes ici dans l'obligation de créer un "outil" qui va grandement faciliter notre travail qui de toute façon va imposer de la patience, du calme, de la sérénité et surtout de la patience encore et encore. En effet, si une *navette* constitue la solution indispensable, elle nous inflige toutefois une "double pénalité" car avant d'entreprendre la réalisation d'un bobinage, il faut la remplir au préalable. On va en faire des tours et des tours. La préparation consiste à dérouler 25m de fil, et à les enrouler sur la *navette*. (Voir les calculs dans le cadre en bas de cette page.) Ensuite c'est cette dernière qui va environ 400 fois passer dans le noyau de l'ensemble et faire le tour par l'extérieur pour réaliser l'enroulement. Cette *navette* montrée sur la Fig.6 est dans la pratique



Fig.6



une simple bobine un peu allongée sur laquelle on enroule tout le fil à bobiner dont l'une des extrémités est immobilisée dans le petit trou central. Les deux autres trous ne servent à rien et sont purement esthétiques. Les deux photographies [Image 16.JPG](#) et [Image 17.JPG](#) présentent ce petit outil réalisé à la demande avec mes techniques habituelles de façonnage et d'assemblage du polystyrène choc.

Quelques petites évaluations.

Concrètement, le diamètre moyen du bobinage de la Fig.4 fait 24mm soit un périmètre de 75,4mm. Pour 425 spires, la longueur de fil enroulée avoisine 33m. On aboutit à une résistance interne d'environ 6Ω avec un courant de 1,5A sous 10V. La bobine comporte 850m de fils, largement de quoi fournir les 297m pour 9 inducteurs. ($33 \times 9 = 297$) La puissance dissipée sera de $1,5 \times 10 / 8 = 1,8W$ par bobine. Quand le "magnétron" sera entièrement câblé on analysera en détails et optimisera la gestion des commutations électriques. (10V au lieu de 12V dans les calculs car le TIP122 engendre un "deltaV" de 2V environ.

Sur <https://www.amazon.fr/SWG-Fil-cuivre-%C3%A9maill%C3%A9-souder/dp/B07QD4Y6VR> on trouve des bobines de 500g nettement moins coûteuses, mais la longueur de fil n'est pas indiquée. Pour celles et ceux qui le désirent, voici l'adresse du fournisseur pour les billes :

https://www.amazon.fr/gp/product/B07ZMM4BJK/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o06_s00?ie=UTF8&psc=1

➤ Étape n°1 : Concrétiser le magnétron.

Travail de patience, il conditionne l'avenir du projet. La seule façon de vérifier la viabilité du concept et de l'aspect matériel que nous lui avons donné, c'est de franchir trois étapes incontournables qui vont nous assurer (*Ou au contraire invalider !*) que l'on arrive bien à faire tourner une bille à une rapidité suffisante pour qu'elle simule une particule à haute énergie :

- Étape n°1 : Bobiner les huit enroulements. (*On se calme et l'on y va sans précipitation !*)
- Étape n°2 : Réaliser un circuit électronique de commutation des courants inducteurs.
- Étape n°3 : Élaborer un programme "outil" avec Arduino pour piloter l'interface de puissance et déterminer les chronogrammes qui arrivent à accélérer correctement le projectile.

Initialement on va devoir bobiner $425 \times 8 = 3400$ spires en passant la nourrice de fil dans le centre du circuit magnétron. C'est un travail assez fastidieux. Aussi, pour ne pas "projectiler" le dispositif par la fenêtre, il importe de s'y prendre avec méthode et surtout avec patience. Je vous conseille de limiter à un bobinage par jour le quota à ne pas dépasser. Commençons par "garnir" la navette. L'opération consiste à enrouler environ 36m de fil sur l'outil. Pour ma part, (*Voir Image 21.JPG*) j'ai vissé un petit piton dans le tronc d'un arbre mort dans l'espace extérieur de mon domicile. Puis, depuis ce point initial j'ai mesuré 36m en reportant environ sept fois au sol la longueur d'un "mètre à ruban de 5m". Comme montré sur la Fig.7 la *navette* a été munie d'une poignée constituée de deux boulons de diamètre nominal 5,5mm. On peut ainsi la tenir fermement avec la main gauche pendant que la main droite enroule le fil émaillé. On attache le fil émaillé sur le petit piton, on enfle un tournevis dans le centre de la bobine de cuivre comme le montre la Fig.8 et on déroule allègrement et dans la joie les 36m jusqu'au repère de longueur piqué dans le sol. On coupe le fil et sans le lâcher, on enroule le film plastique élastique autour de la bobine pour la sécuriser. Enfin on enfle l'extrémité du fil émaillé dans le petit trou central de la *navette* pour le bloquer, et on enroule les 36m autour du noyau de l'outil. Durant cette opération ne pas tirer sur le fil. Il suffit



Fig.7

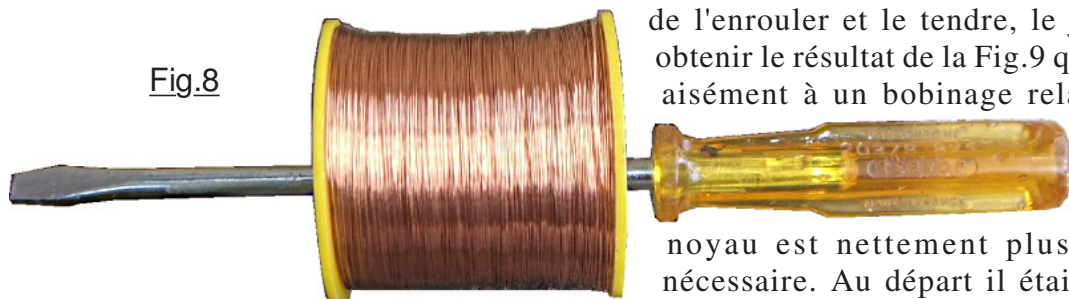


Fig.8

de l'enrouler et le tendre, le juste ce qu'il faut pour obtenir le résultat de la Fig.9 qui prouve que l'on arrive aisément à un bobinage relativement régulier. On constate que le volume possible d'enroulement sur le noyau est nettement plus important que celui nécessaire. Au départ il était difficile d'évaluer les dimensions idoines. Aussi c'est volontairement que la *navette* a été surdimensionnée. On peut noter que ce n'est pas un inconvénient vu qu'ainsi exagérée elle reste suffisamment petite pour passer dans le centre de la structure du cyclotron. Du reste, plus le noyau de la *navette* est important, et moins le fil sera cintré dans cet enroulement provisoire, ce qui est favorable à sa bonne santé. À ce stade on libère le fil émaillé et on retire les deux boulons qui servaient de poignée. On passe le fil dans le petit trou du flanc de l'une des joues d'enroulement. On en fait dépasser d'environ 50cm pour prévoir la liaison avec les circuits électronique de commutation et avec calme et pondération on bobine spire à spire jusqu'à épuiser le contenu de la *navette* dont 50cm des l'extrémités seront prévus pour la ligne de branchement extérieure. Durant cette opération, veiller à enrouler de façon homogène, le *spire contre spire* serait idéal, mais vu les circonstances on se contentera d'une régularité globale ressemblant à celle de la Fig.9 ci-contre. Quand avec patience et sérénité on a garni entièrement l'un des bobinages, on "cache" les deux fils de liaison en les enroulant entre deux inducteurs et en les immobilisant avec du ruban adhésif. Il ne reste plus qu'à recommencer sept fois dans les jours qui vont suivre. *Vive l'électromagnétisme !*

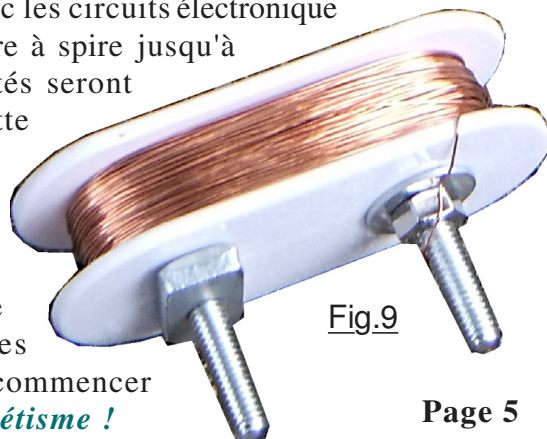


Fig.9

➤ **Bobiner les 35m de fil émaillé pour chaque inducteur.**

C'est de loin l'opération la plus indigeste de la réalisation de ce petit projet ludique. Ce chapitre va en détailler certains aspect qui méritent d'être soulignés. Toutefois, avant d'utiliser la *navette* de la Fig.9 sur laquelle les deux boulons de saisie ont été enlevés, revenons à l'assemblage de la structure. Les deux demi-goulottes ont été moulées en 3D. Ce modèle présente des difficultés particulières, notamment les joues des inducteurs qui ne font que 1mm d'épaisseur. Il en résulte des "dentelures" à la périphérie qui sont visibles sur les photographies. Il faut avec une lime éliminer toutes ces aspérités pour ne pas que le fil accroche lors du bobinage. Par ailleurs, comme indiqué sur [Image22.JPG](#) l'orientation du moulage en 3D privilégie un chemin de roulement situé vers le haut pour ne pas qu'il soit entièrement rempli de petites cloisons support, car le tore de circulation doit être parfaitement lisse. Du coup, on retrouve de telles cloisons support dans le volume qui sera occupé par le fil émaillé des inducteurs, laissant des aspérités lorsqu'elles sont enlevées. *Il sera donc important de limer ces traces résiduelles parasites.* Malgré l'orientation de la pièce au moulage, on trouvera comme visible sur [Image 23.JPG](#) de minuscules petites aspérités dans la goulotte de circulation des billes. Ces petits défauts ne sont pas très nombreux, mais il faut absolument les polir avec du papier abrasif. S'assurer de la circulation parfaite des billes quand on aura achevé cette opération. Par ailleurs, sur l'imprimante 3D on peut avoir une minuscule différence d'élongation sur **X** et sur **Y** engendrant une toute petite différence dans les cotes **Dx** et **Dy**. Même si cette différence est minime et inférieure à 0,1mm, il importe d'orienter le dessus et le dessous pour faire correspondre les élongations et mettre en phase les différences d'étirement. Lorsque l'orientation la plus favorable est trouvée, comme le montre [Image 24.JPG](#) on repère la correspondance. Ce n'est qu'en respectant

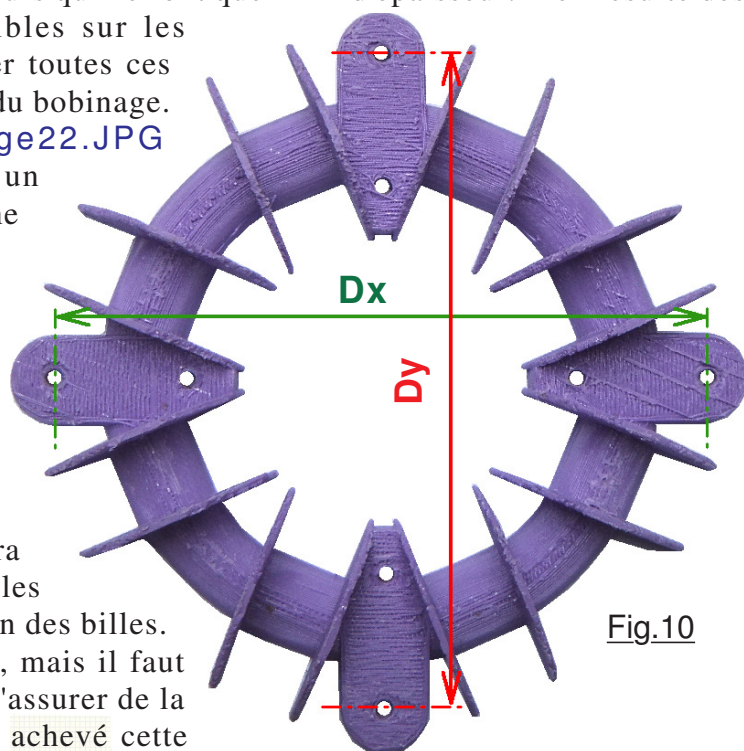


Fig.10

ce détail que les joues latérales des bobinages qui ne font qu'un millimètre d'épaisseur seront en parfaite correspondance verticale.

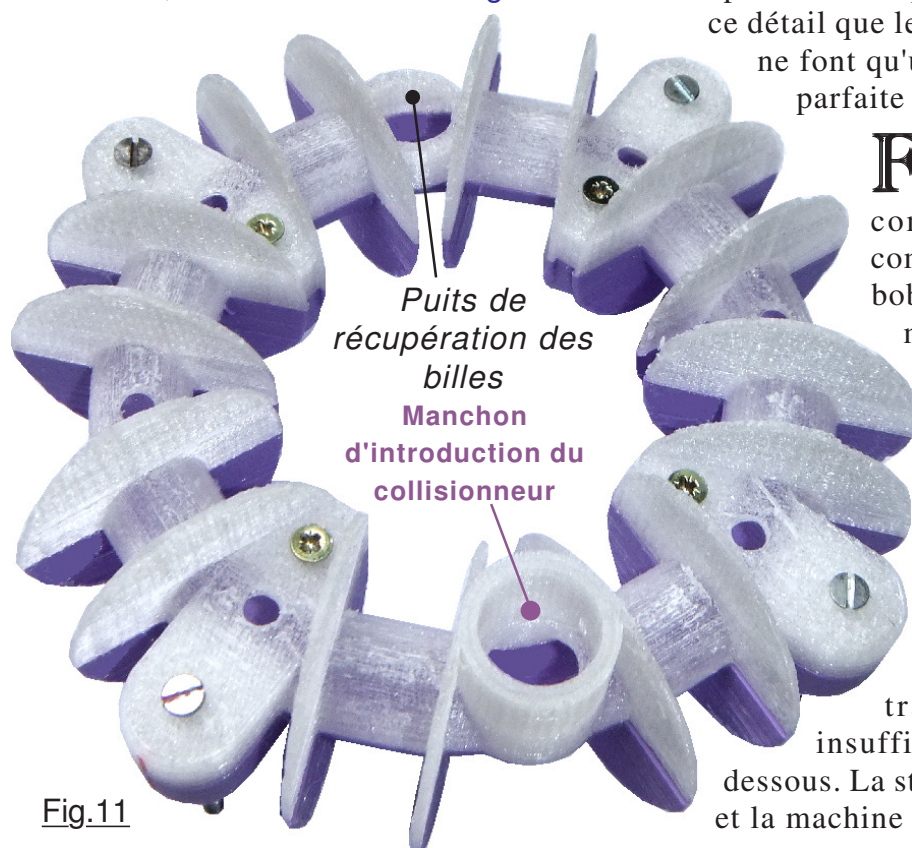


Fig.11

Force est de constater sur la Fig.11 qui représente la structure complètement assemblée avant de commencer les diverses opérations de bobinage, que contrairement à ce que montre la Fig.4 elle est devenue bicolore ! En fait, lorsque le support coudé du collisionneur à été collé à l'Araldite sur le dessus, un petit résidu de colle à coulé dans le passage des billes. Cet obstacle étant plus loin que le coude, il était impossible de l'éliminer. *Il a donc fallu tout recommencer à zéro.* Le filament translucide qui me restait était insuffisant pour mouler le dessus et le dessous. La structure inférieure est alors violette et la machine devient bicolore !

Toujours dans le cadre de la préparation avant les opérations de bobinage, il faut s'assurer que la bille circule parfaitement dans le tunnel du collisionneur. En particulier si vous optez pour la version inclinée avec les deux aimants de sustentation. À l'intérieur du manchon d'accouplement, il y a des cloisons support que l'on doit éliminer. C'est également vrai pour la version verticale de la Fig.19 si vous optez pour la solution sans aimants permanents. Avec une pince et un cutter on enlève ces cloisons support, puis avec une petite lime on élimine les résidus. Enfin, comme symbolisé sur la Fig.12 avec du papier abrasif enroulé on lisse parfaitement le conduit, qu'il soit coudé ou rectiligne. On s'assure de la parfaite circulation des billes dans le dispositif qui alors est pleinement validé.

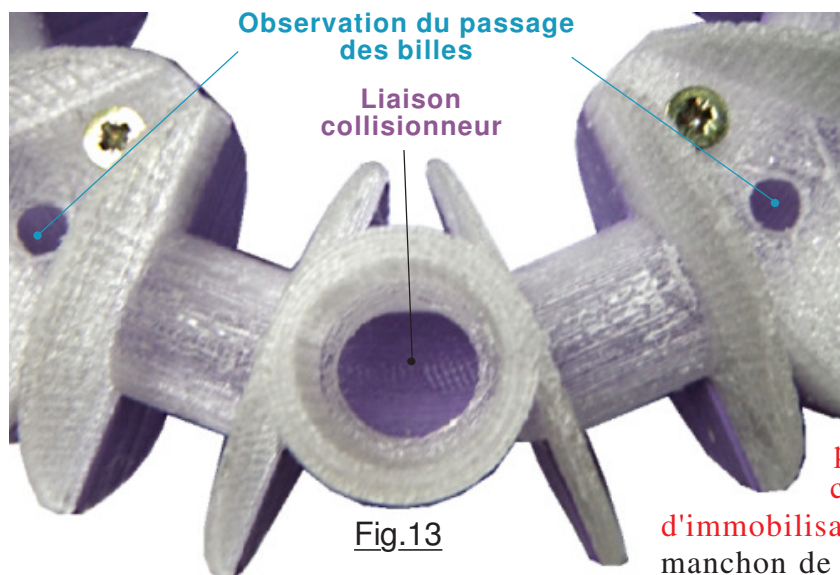


Fig.13

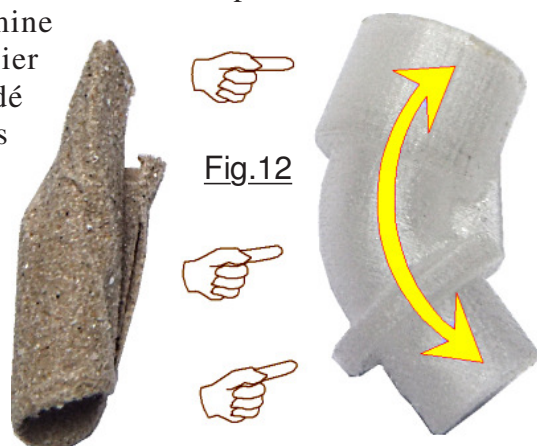


Fig.12

Assemblons la structure de la machine **après avoir totalement ébavuré le dessus et le dessous du tore, réalisé tous les trous d'observation du passage des billes dans leur chemin de circulation, et ceux de traversée des vis d'immobilisation.** On vérifie une dernière fois que le manchon de liaison du collisionneur est strictement

sans bavure comme sur la Fig.13 et que l'on peut facilement récupérer les billes avec un quelconque aimant permanent dans l'ouverture prévue à cet effet sur le côté opposé au collisionneur. À ce stade du projet on peut encore tout redéposer si c'est nécessaire. **Aussi, vérifier une dernière fois que les billes se déplacent parfaitement dans le tore.** Alors on peut commencer à bobiner.

Montré sur la photographie d'Image 25.JPG on utilise à convenance l'un des deux trous pratiqué au raz du noyau sur les joues de la bobine pour faire sortir le fil émaillé. On en fait dépasser environ quarante centimètres qui serviront à la liaison électrique vers le module électronique de commutation. Puis on enroule cette ligne électrique dans le voisinage de l'inducteur qui va être bobiné. On immobilise comme l'on peut, avec du ruban adhésif par exemple, ce fil qui ne devra pas "exister" durant les opérations d'enroulement du fil sur les bobines. Attention, à partir de ce stade la structure est indémontable, ou il faudrait débobiner tous les inducteurs ce qui reste totalement impensable.

Dans la pratique, enrouler les 35m de fil émaillé pour chaque inducteur s'avère bien moins indigeste que je ne l'avais supposé. Surtout garder le fil tendu durant toute l'opération.

Par utilisation de la navette, il faut moins d'une heure et demie par enroulement. Aussi, j'ai réalisé deux inducteurs par jour pour ne pas saturer. Lorsque un inducteur est terminé, j'enroule la deuxième extrémité avec la première et termine l'opération en collant cette sortie externe avec de l'Araldite comme sur Image 26.JPG.

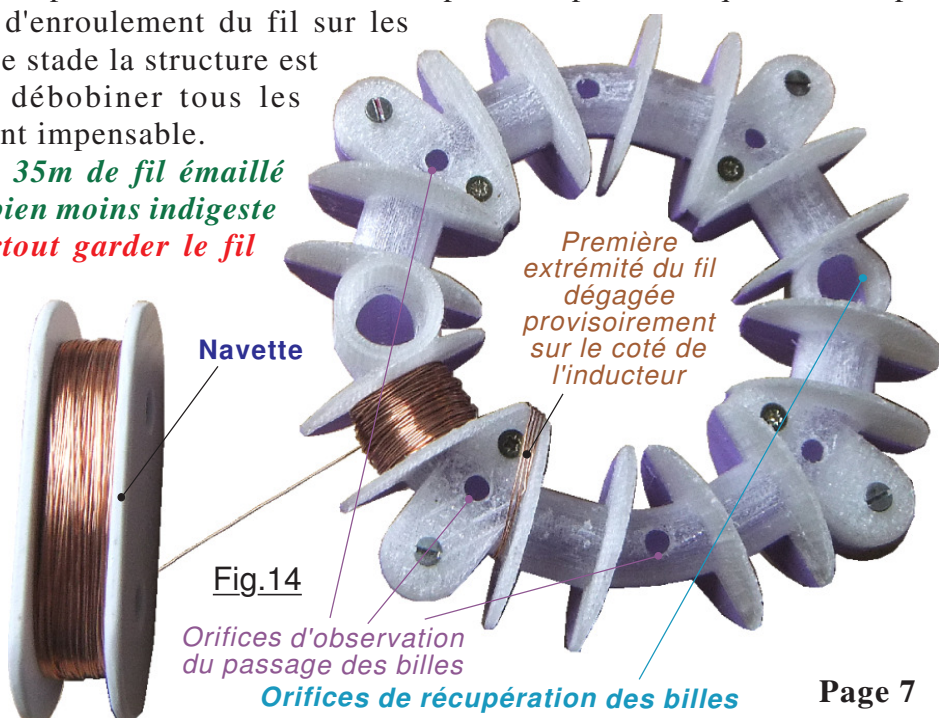


Fig.14

03) Le collisionneur.

Terme un peu "ronflant" pour désigner l'organe de cette machine étrange qui de loin est le plus mal agencé, alors que l'idée au départ était pourtant simple ... comme toujours quand on passe de la théorie à la pratique. Directement issu des dessins du "magnétron", il suffisait comme sur la Fig.15 de prévoir un entonnoir **1** avec un *électroaimant de "lévitation"*.

On alimente la bobine en 12V et le champ magnétique maintient dans le dispositif la bille cible **2** jusqu'à ce que l'automatisme coupe le courant au bon moment. Guidée verticalement par le corps supérieur **3** la cible tombe sur le chemin de roulement **4** jusqu'à ce que la "particule accélérée" ne vienne la frapper. C'est simple, facile à mettre en œuvre et surtout ... ça n'avait aucune chance de réussir ! Un calcul dérisoire aurait aisément prouvé cet échec idiot.

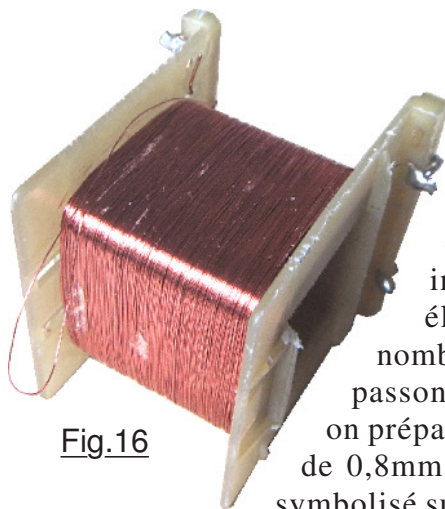
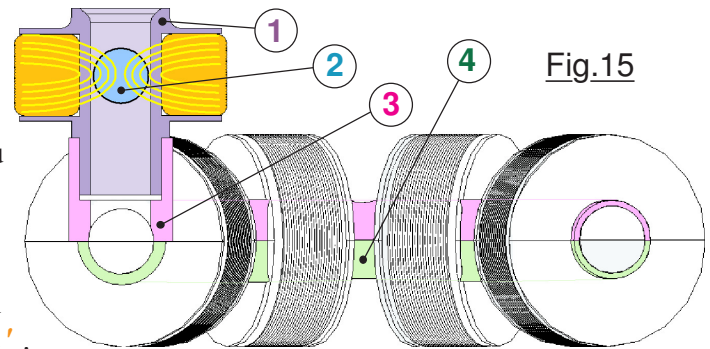


Fig.16

➤ **Réalisation du bobinage.**

Puisque nous sommes dans le domaine des ampères-tours, afin de tester cette idée simple, l'entonnoir avec des joues pour réaliser un bobinage électromagnétique a été moulé en 3D. Puis, sur la carcasse d'[Image 02.JPG](#) il restait l'enroulement primaire du transformateur, (*Voir la Fig.16*) autant s'en servir comme fil inducteur. Ce fil émaillé est fin comme un cheveu. Donc la résistance électrique sera plus importante et le courant électrique plus faible. Le nombre de tours compensera en termes de champ magnétique généré. Bref, passons de la théorie à la pratique. Avec [Image 04.JPG](#) et [Image 05.JPG](#) on prépare une ligne de sortie qui sera constituée d'environ 20cm de fil émaillé de 0,8mm de diamètre. Le fin cheveu serait vraiment trop vulnérable. Puis, symbolisé sur [Image 06.JPG](#) cette ligne fait un demi-tour autour du noyau avant de sortie à angle droit du flanc de la bobine. On va ensuite commencer à bobiner de façon à bloquer rapidement cette ligne bien contre le noyau. Attention, le fil est si fin que l'ensemble de l'enroulement primaire de l'ancien transformateur va permettre plus de 3272 spires. (*Si, si, si, je vous assure, je les ai comptées !*) Aussi, pour réaliser ce travail sans galérer, il faut ajouter un manche à la bobine comme sur [Image 07.JPG](#) et surtout transformer la carcasse de la Fig.11 en un dérouleur digne de ce nom. [Image 08.JPG](#) et [Image 09.JPG](#) sont là pour en témoigner. Quand on est presque à la fin, mais qu'il reste encore pas mal de fil sur la bobine débitrice, on installe la ligne de sortie comme montré sur [Image 10.JPG](#) également constituée de 20cm de fil de 0,8mm. L'extrémité de cette dernière a été découpée et étamée. Ici aussi on a environ un demi-tour autour du bobinage avant qu'elle ne sorte d'un côté, et qu'elle traverse de l'autre. On va alors terminer d'enrouler tout le fil qui reste et ainsi recouvrir entièrement cette ligne. Enfin, avec [Image 11.JPG](#) à [Image 13.JPG](#) on termine le bobinage bien sécurisé mécaniquement et électriquement.

➤ **Invalidation de la solution retenue.**

Vérifier le bienfondé de cette solution initiale est enfantin. On enfle le tenon de la bobine dans le manchon vertical prévu à cet effet sur le corps du dessus de la machine. Dès que l'on branche les deux fils de la bobine du collisionneur sur une alimentation de 12V, on constate que le courant consommé est assez discret, puisque l'ampèremètre accuse à peine 50mA. On en déduit avec brio que la résistance interne est de l'ordre de 240Ω. Mazette mais c'est méga trop ! je n'avais pas prévu une valeur aussi élevée. Pour la consommation c'est génial, mais pour les ampères-tours c'est une vraie catastrophe.



Ben Môa môa, je la trouve ridiculement petite la magnétron-truc du Nulentout. Je vais me faire la même en bien plus gros, et les bibilles seront remplacées par des boules de pétanque !

Soyons clair, avec un minimum de réflexion on pouvait le deviner sans pour autant en faire une thèse. En effet, les premiers essais montrent que déjà pour attirer la bille à l'horizontale, avec 850 ampères-tours on est limite limite. (2A avec 425 spires donnent bien 850Atr.) Alors à la verticale pour maintenir cette bille en lévitation, cette valeur était déjà amplement insuffisante. Dans notre cas c'est à peine $0,05 \times 3272 = 163\text{Atr}$. Une valeur insignifiante : Pas bon >>> **POUBELLE !**

> **Changement de stratégie.**

Deux approches sont possibles. Soit on persiste et on s'enlise, soit on change complètement de solution. Pour ma part, j'ai consacré trop de temps à réaliser cette belle bobine et j'ai développé une solution "débile", *mais qui confère à ma machine une esthétique d'exterminator. Aussi, je me moque de la complication qu'elle engendre et vais la conserver*. Si je vous la présente, c'est qu'elle me servira pour vous proposer une solution nettement plus raisonnable. Le premier élément d'ajustement consiste à incliner la rampe de l'entonnoir de 30° sur l'horizontale. (Voir la Fig.17) Ainsi pour Retenir en position la bille l'effort à fournir n'est plus que la moitié de son poids **P**. Comme cet effort ne peut pas être fourni par la bobine **B**, ce sont deux aimants très puissants placés latéralement qui vont générer le champ magnétique de sustentation. Quand on introduit la bille dans l'entonnoir **E**, avec son poids elle prend de la vitesse, et le champ magnétique permanent n'est pas suffisant pour l'empêcher de poursuivre son mouvement et de tomber. C'est la raison pour laquelle, avant de charger le collisionneur, l'opérateur à inséré une goupille **G** dans le guidage. La bille cible étant alors introduite dans la machine, l'opérateur retire la goupille et le champ magnétique permanent des deux aimants maintient la bille en place. Lorsque le magnétron a accéléré suffisamment la bille projectile, au bon moment l'automatisme alimente un court instant la bobine **B**. Cette dernière engendre un champ magnétique antagoniste à celui des aimants permanents et la bille cible tombe sur le chemin de roulement. La collision est alors inexorable. Personnellement je trouve cette solution bien sympathique. Toutefois elle présente un inconvénient rédhibitoire. Les aimants utilisés

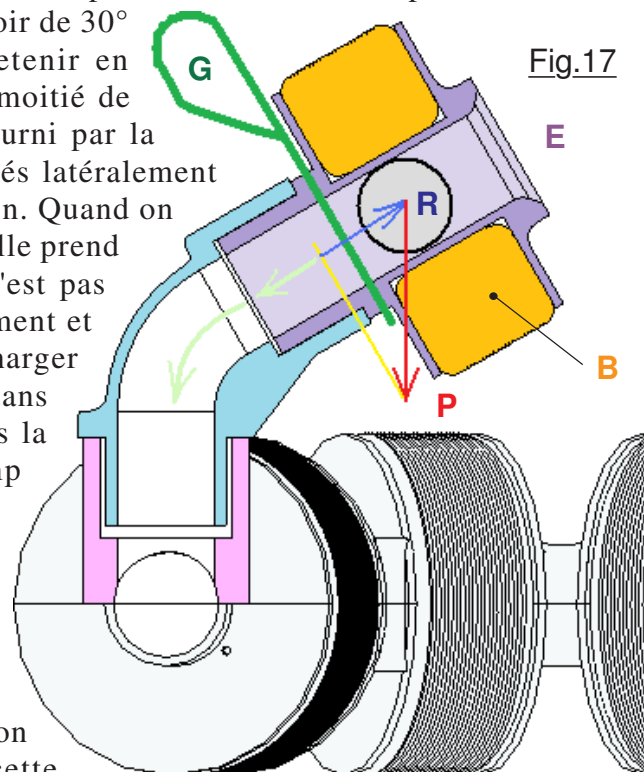


Fig.17

Le collisionneur personnel.

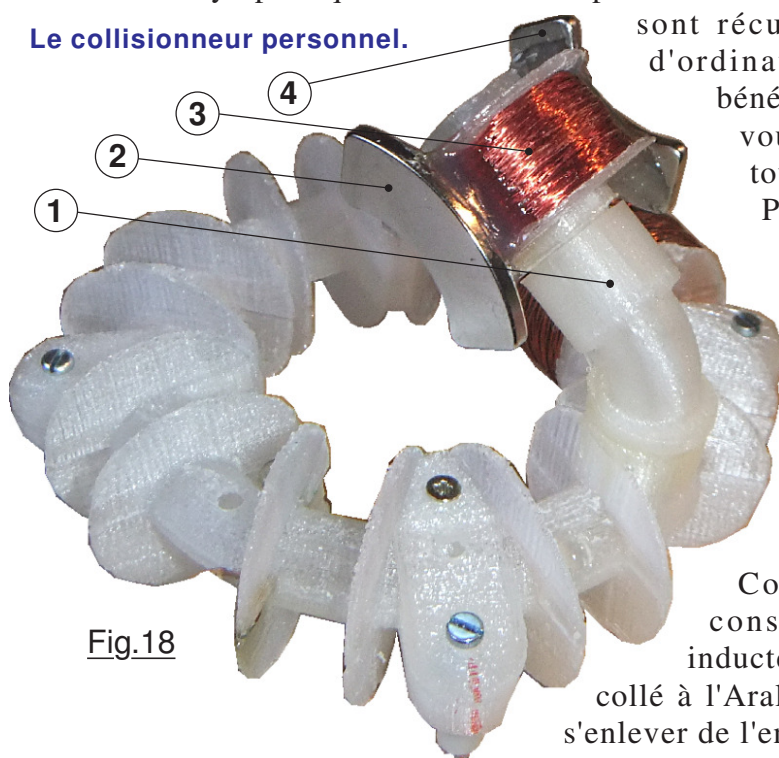


Fig.18

sont récupérés dans des anciens "disques durs" d'ordinateur, dont ne pourra probablement pas bénéficier le lecteur. Aussi, en page suivante je vous propose une solution plus simple, que toutefois vous devrez adapter ...

Pour information, la Fig.18 présente mon dispositif expérimental dont vous pouvez consulter les trois photographies commentées de la <Galerie d'images> [Image 18.JPG](#) à [Image 20.JPG](#) saisies en gros plan. En 2 et 4 on retrouve les deux aimants permanents "croisés" pour que leurs flux magnétiques soient de même sens le long du bobinage. En 3 on observe les 3272 spires de fil émaillé.

Comme le collisionneur serait une gêne considérable pour bobiner les sept autres inducteurs, à ce stade du projet il n'est pas encore collé à l'Araldite dans le manchon 1 et peut facilement s'enlever de l'ensemble de la structure.

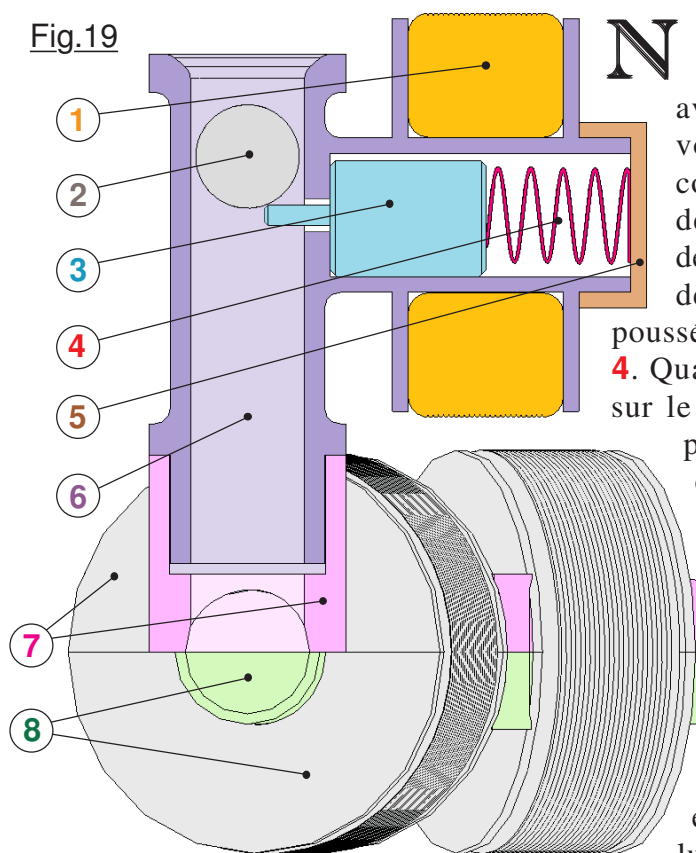
➤ Une solution "raisonnable" pour les internautes.

Raisonnaable suppose que l'ensemble des éléments sera relativement facile à approvisionner ou à réaliser en local. Raisonnaable impose d'en vérifier la validité et le fonctionnement assuré. Par ailleurs, vous trouverez dans le dossier <Fichiers imprimante> les fichiers en code graphique pour le [Bouchon.gco](#) et pour l'[Entonnoir vertical.gco](#) à mouler sur une imprimante 3D. Avant de commenter les essais effectués pour valider cette solution, consultez la Fig.19 ainsi que les explications associées sur le fonctionnement de ce petit sous-ensemble. Personnellement, je n'ai pas moulé l'entonnoir vertical. Je me suis contenté de bricoler un substitut en carton rigide pour y assembler avec force ruban adhésif ma bobine d'[Image 13.JPG](#) avec pour avantage une bonne fiabilité du test, puisque le dispositif a fonctionné du premier coup avec un bobinage d'à peine 163Atr. Cette solution est bonne et fonctionne sans problème. Il vous reste à résoudre deux petites difficultés. La première, trouver un ressort ... à chacun de faire au mieux. La deuxième difficulté va consister à réaliser le noyau plongeur **3** avec son aiguille servant de goupille. Pour ma part, je me suis contenté de scier un petit bout d'environ 12mm de longueur dans une barre de ferrite de 10mm de diamètre. C'était des "bâtons magnétiques" qui à l'époque des récepteurs de radio à transistors qui captaient en grandes ondes et en petites ondes. Ces barres qui pouvaient avoir jusqu'à 20cm de longueur concentraient les champs électromagnétiques rayonnés par les émetteurs radio disséminés sur le territoire, voir à l'étranger. Par exemple France Inter sur 170kHz.

Particularité de ces barres de ferrites, certaines étaient réalisées dans une poudre de fer doux fritté. Elles ont la particularité de se scier très facilement. De plus, elles présentent un trou central d'environ 0,5mm sur toute la longueur. En agrandissant cet orifice à 1,5mm, opération très facile, j'ai collé à l'Araldite un clou à ce diamètre raccourci à 18mm de long sous sa tête qui n'a pas été enlevée. Le total d'une masse très faible se fait attirer avec nervosité vers le centre de la bobine.

➤ Fonctionnement de la solution proposée.

Fig.19



Non, ce n'est pas la coupe du carburateur simple corps de votre V8 de 450cv qui vous sert à frimer avec votre décapotable lorsqu'il fait soleil et que vous allez bronzer. C'est la coupe transversale d'un collisionneur à noyau plongeur. On retrouve le corps de l'entonnoir **6** emmanché sur le demi-tore du dessus **7** associé au chemin de roulement **8**. Rien de bien nouveau. C'est le noyau plongeur **3** qui est poussé en permanence par le petit ressort de récupération **4**. Quand on introduit la bille cible **2**, elle s'immobilise sur le téton de **3** servant de goupille automatique. Le petit ressort **4** prend appui sur le bouchon **5** qui est collé à l'Araldite sur **6** au moment de l'assemblage, et surtout lorsque le bon fonctionnement de l'ensemble a été entièrement validé. Le petit ressort doit être sélectionné pour repousser de façon énergique le noyau plongeur **3** en s'opposant le moins possible à l'attraction de l'électroaimant lorsque la bobine **1** est alimentée en 12Vcc. L'avantage du dispositif, c'est que le noyau plongeur **3** est déjà en partie engagé dans le bobinage **1** et fait converger vers lui les lignes de force du champ électromagnétique.

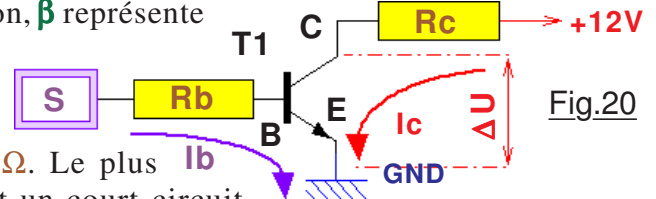
Noter que, l'aiguille servant de goupille traverse **6** dans un orifice de bien plus grand diamètre. En **1** vous remplirez la bobine avec du fil émaillé de 0,4mm de diamètre conduisant à un enroulement de résistance interne d'impédance analogue à celle des autres inducteurs. De ce fait l'électronique de pilotage devra commuter des courants d'amplitude identiques. Contrairement au prototype qui se contente d'un petit transistor, on va employer un composant plus "musclé".

04) La commutation de puissance.

Nous nous doutons qu'une sortie binaire de la carte Arduino est totalement incapable de commuter un courant de 2A. Il nous faut déterminer un amplificateur de commutation constitué généralement d'un transistor de puissance travaillant en régime Saturé / Bloqué.

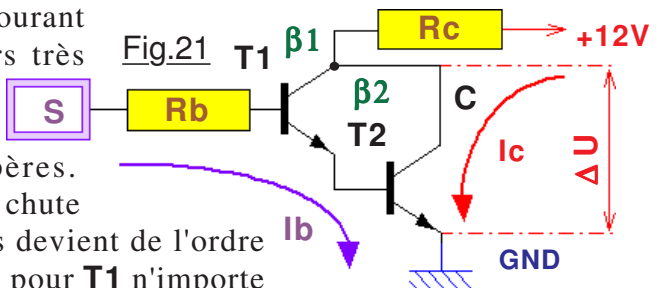
> Le mode "Saturé / Bloqué".

Incontournable lorsque l'on désire réaliser une interface de commutation, le transistor utilisé en mode "Saturé/Bloqué" s'impose naturellement. Considérons sur la Fig.20 le transistor **T1** de type NPN. Quand la sortie **S** du microcontrôleur est à "0", le courant **I_b** est nul et **T1** est alors non conducteur. On précise ce fait par le vocable **Bloqué**. Le courant **I_c** est nul et sur le collecteur **C** on retrouve les **+12V**. Lorsque **S** passe à l'état "1" la broche de l'ATmega328 se trouve à **+5V**. Le courant de base **I_b** est alors directement fonction de la résistance de limitation **R_b**. Le courant collecteur **I_c** est alors β fois le courant **I_b**. Par définition, β représente le **gain en courant** du transistor utilisé. Par exemple, si **I_b**=2mA et que β =20, **I_c** sera égal à $2 \times 20 = 40\text{mA}$. Toutefois, le courant collecteur est limité par la résistance de charge **R_c**. Supposons que **R_c** = 400Ω. Le plus grand courant qui pourrait la traverser en supposant un court-circuit entre **GND** et **C** serait de $12/400=0,03$ soit 30mA. Hors le courant de base est plus important que les 1,5mA qui suffiraient à provoquer ce courant. On dit alors que le transistor est **Saturé**. La chute de potentiel ΔU entre collecteur **C** et **GND** est faible et de l'ordre de 0,9V.



> La structure Darlington.

C'est la solution idéale lorsque l'on désire commuter des courants importants avec des signaux de commande dérisoires. Les transistors qui peuvent commuter des courants de plusieurs ampères en mode "Saturé/Bloqué" présentent des gains en courant β généralement très modérés. De l'ordre de 20 à 30, rarement plus. La structure Darlington consiste à chaîner deux transistors de même type comme décrit sur la Fig.21 le gain en courant global étant alors égal à $\beta_1 \times \beta_2$. On arrive alors très facilement à un gain en courant global très important. Du coup, avec quelques mA pour **I_b** on peut commuter des intensités de plusieurs ampères. L'inconvénient de ce montage, c'est que l'on double la chute de potentiel ΔU entre collecteur **C** et **GND** qui alors devient de l'ordre de 1,9V. Seul le transistor **T2** doit être de puissance, pour **T1** n'importe quel composant pour petit signal conviendra. Si la tension à commuter est négative, il suffit dans ce schéma de remplacer les transistors **NPN** par des éléments de types **PNP**.



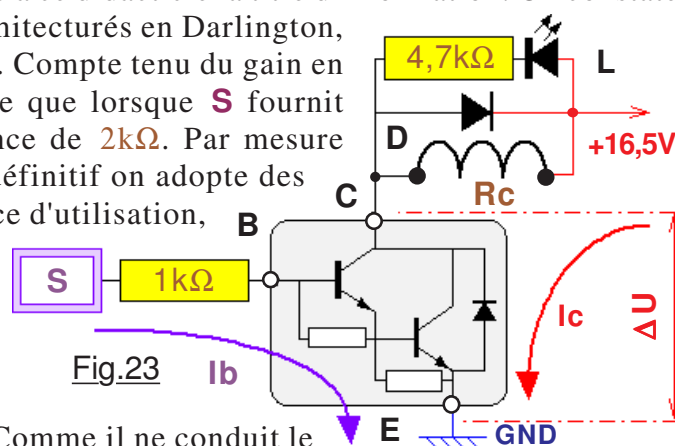
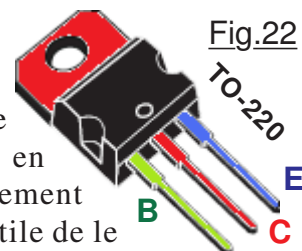
Un petit résumé sur la commutation par transistor.

Lorsqu'un transistor ne reçoit aucun courant dans sa base, il est en mode isolé. Le collecteur ne draine aucun courant, on dit qu'il est en mode "**bloqué**". Quand on injecte un petit courant dans la base, le collecteur laisse alors passer un courant beaucoup plus important. Le gain en courant est symbolisé par β ou par **hFE**.

- $I_c = I_b \times \beta$. (Quand le transistor n'est pas saturé.)
- Si **I_c** est inférieur au courant qui pourrait traverser le transistor, il passe en mode "**saturé**".
- La chute de tension ΔU en mode saturé est généralement faible et de l'ordre de 0,8V.
- La structure Darlington consiste à chaîner deux transistors de même type, le premier fournissant le courant de base à celui qui commute l'intensité de la charge.
- Le gain en courant d'une structure Darlington est égal au produit des gains en courant de chaque transistor du montage. $\beta = \beta_1 \times \beta_2$. La chute de tension en mode saturé reste généralement faible mais double par rapport à celle d'un montage simple. (Elle est de l'ordre de 1,6V.)
- La puissance dissipée par le transistor de commutation du courant **I_c** est égal au produit du courant collecteur par la chute de tension ΔU . $P = I_c \times \Delta U$.

➤ Le Darlington TIP122.

D'un coût très abordable dans le commerce en ligne, le choix c'est porté sur un composant hybride qui intègre deux transistors en mode Darlington et qui peut commuter sans problème jusqu'à 5A avec un gain en courant β de l'ordre de 1000. Le TIP122 peut dissiper jusqu'à 65W très largement au dessus des conditions présentes dans notre montage. Il sera totalement inutile de le munir d'un quelconque dissipateur de chaleur. La Fig.22 sur laquelle on notera que le collecteur est relié électriquement à la plaque métallique du boîtier présente son brochage. La fiche descriptive et d'utilisation de ce composant est jointe à ce didacticiel à titre d'information. On constate que l'encapsulation intègre les deux transistors architecturés en Darlington, ajoute deux résistances internes ainsi qu'une diode. Compte tenu du gain en courant de ce composant, un rapide calcul montre que lorsque **S** fournit +5V, l'ensemble est déjà saturé avec une résistance de 2k Ω . Par mesure d'optimisation, (Voir la Fig.23) sur l'assemblage définitif on adopte des valeurs pour **Rb** de 1k Ω . Comme le prévoit la notice d'utilisation, la chute de tension ΔU est d'environ 1,9V. Dans ces conditions, la bobine inductrice est parcourue par un courant approximatif de 2,75A. (Voir le développement dans le cadre situé en bas de cette page.) Durant la conduction en mode Saturé le transistor de puissance dissipe $2,75 \times 1,9 = 5,2W$. Comme il ne conduit le courant qu'un huitième du temps, sa dissipation moyenne sera d'environ 0,6W, une puissance très faible rendant totalement inutile un quelconque dissipateur de chaleur. C'est un avantage incontestable car on gagne ainsi beaucoup de place sur le circuit imprimé d'interfaçage. Les bobines inductrices chauffent notablement. Sans compliquer l'ensemble par une ventilation forcée, une limitation temporelle de l'usage de la machine avec des périodes de repos gérée par logiciel sera impérative. Enfin, est ajoutée une LED notée **L** pour visualiser l'état de pilotage de chaque inducteur.



➤ Réalisation du circuit imprimé de la commutation de puissance.

C'est l'Étape n°2 annoncée en haut de la page 5 de ce didacticiel. La plaquette cuivrée préperçée d'expérimentation retaillée aux dimensions idoines, regroupe les neuf circuits de commutation des enroulements inducteurs, c'est à dire les huit sections d'accélération de la "particule" et le bobinage du collisionneur. Pour mémoire, le collisionneur du prototype utilise un petit transistor de faible puissance, car l'enroulement ne consomme que 50mA. Par contre, logiquement vous allez bobiner du fil émaillé de 0,4mm de diamètre et l'enroulement exigera une impulsion de 2,75A. Aussi, contrairement aux photographies du prototype, le dessin du circuit imprimé que je vous propose donné en Fig.24 utilise neuf composants TIP122. La plaquette utilisée ne comporte coté cuivre que des pastilles encerclant les trous alignés au pas classique de 2,54mm. On remarque sur les deux dessins qu'un fusible de 3,15A permet d'isoler le +16,5V des bobines inductrices. Ce n'est pas à franchement parler pour protéger cette ligne contre les surintensités. Le but réel de se fusible consiste à ne pas soumettre à la "puissance" le circuit lors de certaines phases de mise au point du programme d'exploitation. Ainsi, si durant les essais primaires une sortie passait à l'état "1" de façon permanente, le bobinage incriminé ne risquerait pas une surchauffe rapide. (Il serait soumis à une puissance constante de 5,7W ce qui serait notable et préjudiciable au matériel.)

Un changement de stratégie alimentaire.

Les essais avec le programme de test P05_Generer_une_rotation.ino montrent que les meilleurs résultats sont obtenus avec des durées très faibles. Du coup pour avoir des inducteurs plus "nerveux", il faut alimenter le circuit de puissance en 16.5v qui peut être fourni par un bloc secteur à découpage proposant plusieurs tensions de sorties possibles de 12Vcc à 24Vcc. les enroulements présentent une impédance d'environ 6 ohm. L'intensité qui les traverse sera alors de 2,75A. La puissance dissipée par enroulement avoisinera la valeur moyenne de $2,75 \times 16,5 / 8 = 5,7W$. Il faudra impérativement ménager des périodes de refroidissement. (Noter que la bille aussi a tendance à chauffer.)

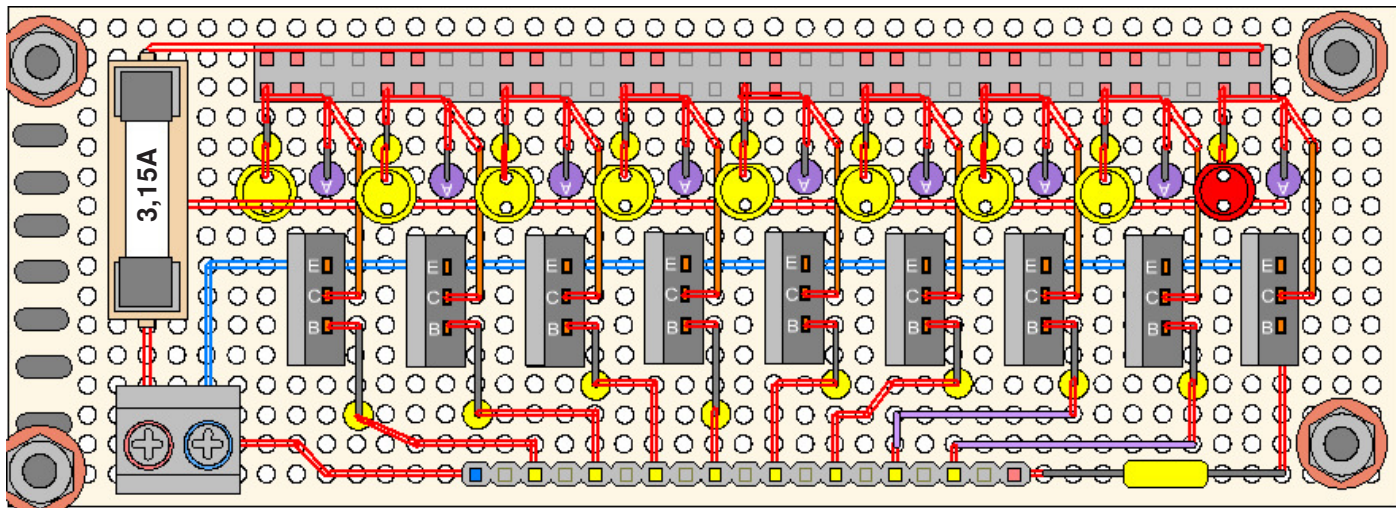
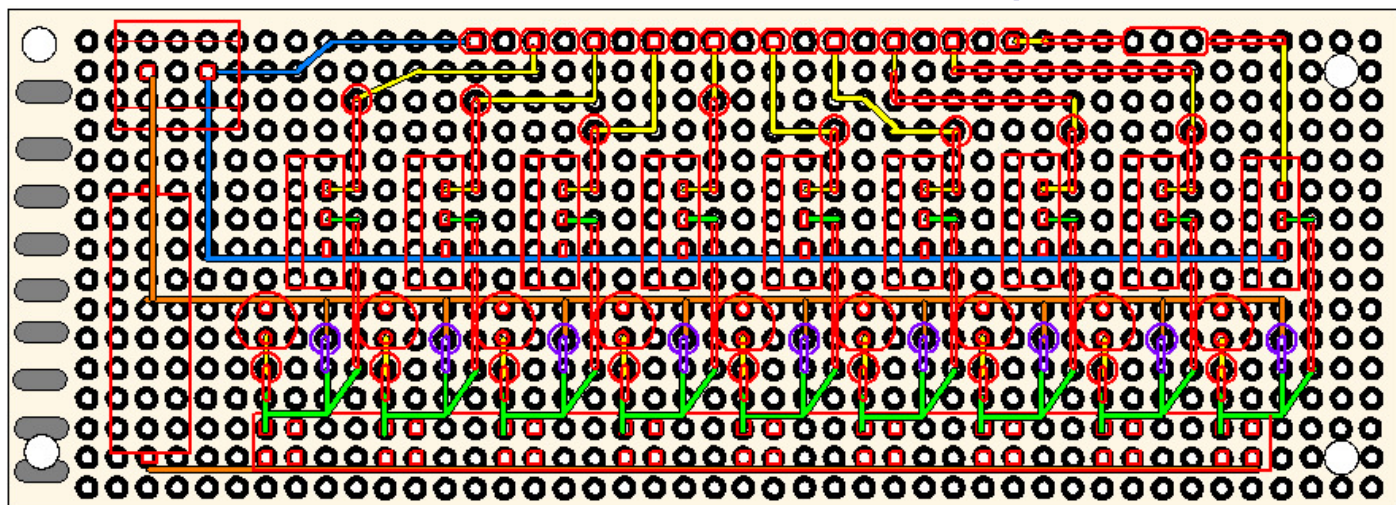
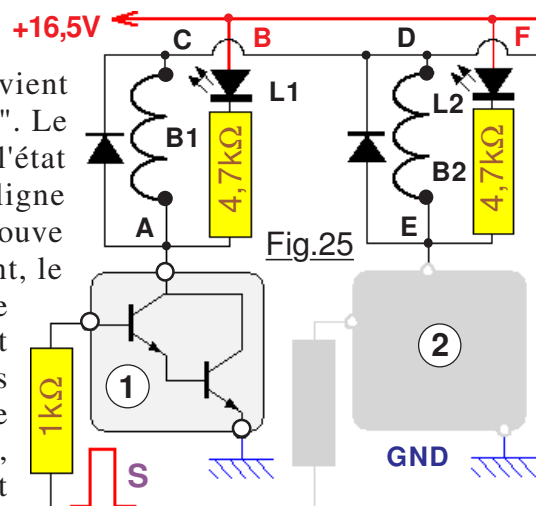


Fig.24

Circuit de commutation de puissance.



Quand le fusible est retiré et que le **+16,5V** est présent sur le circuit, on constate que toutes les LEDs de la "rampe lumineuse" s'illuminent alors qu'une seule sortie sur les neuf est à l'état "1". Ce comportement n'est pas anormal bien qu'il soit perturbant. Pour comprendre l'origine de cette curiosité, observons la Fig.25 qui décrit deux commutateurs voisins 1 et 2. Le Darlington 2 n'étant pas piloté son entrée étant à l'état "0", est en mode isolé et n'intervient pas électriquement. La sortie **S** qui pilote 1 passe à l'état "1". Le Darlington passe en état saturé et le point **A** se retrouve à l'état **GND**. Du coup, **L1** s'illumine par le courant qui traverse la ligne de **B** vers **A**. Comme **B1** ne fait que 6Ω le potentiel de **A** se retrouve en **C** et en **D** soit **GND**. Comme **B2** ne fait que 6Ω également, le point **E** à son tour est au potentiel de **GND**. Par voie de conséquences toutes les autres LEDs telles que **L2** vont s'illuminer suite au courant qui circule de **F** vers **E** puis chemine de **D** vers **C** et vers **A**. En conclusion, si on retire le fusible de son support et que le **+16,5V** alimente l'interface, dès que l'une des neuf sorties de commutation passe à l'état "1" pour alimenter l'un des inducteurs, les neuf LEDs de visualisation des divers états binaires s'illuminent et il ne faudra pas s'en étonner.



► La gestion des alimentations.

Bien que l'entrée **VIN** de la carte Arduino NANO peut être soumise à des tensions jusqu'à 20Vcc, j'ai préféré insérer un autre régulateur en amont. (*J'en avais quatre de disponibles, alors je me suis permis ce luxe.*) Fondamentalement il n'est pas indispensable et l'on peut s'en passer. Toutefois, l'usage de ce petit module d'un prix de vente raisonnable présente deux avantages qui sans révolutionner le développement de ce prototype n'en constituent pas moins un bénéfice bien utile :

- Ce régulateur va servir de barrière à toute impulsion parasite qui pourrait survenir de l'environnement électromagnétique avec commutations "brutales" de courants instantanés relativement importants et de plus sur des inductances.
- Le petit module utilisé incorpore un afficheur qui permet de visualiser à convenance la tension injectée en entrée du module, et celle que l'on peut ajuster en sortie.

Pour information je l'ai approvisionné sur :

https://www.amazon.fr/gp/product/B00GKEKJW4/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o08_s00?ie=UTF8&psc=1

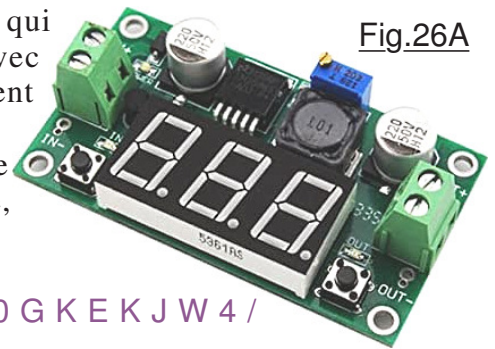


Fig.26A

Par exemple sur les deux photographies d'[Image 27.JPG](#) et d'[Image 28.JPG](#) l'ensemble technique est terminé et l'on observe sur "le tableau de maitrise" l'orifice de passage du tout petit tournevis qui sert à ajuster librement la tension de sortie. Une valeur de l'ordre de 8Vcc sera parfaite. Le potentiomètre est de type multi tours et l'on peut facilement ajuster finement la valeur.

Deux sources d'alimentation en énergie à partir du secteur alternatif 220V sont prévues. La première consiste à utiliser un bloc alimentation à découpage du commerce qui peut proposer en sortie une tension de l'ordre de 16,5VCC. Ce type de module assure toutes les sécurités imposées par les contraintes européennes, et présente un rendement excellent. Ce type de produit existe en de multiples variantes et à des tarifs très variables. Choisissez l'un de ces modèles sachant que le mien

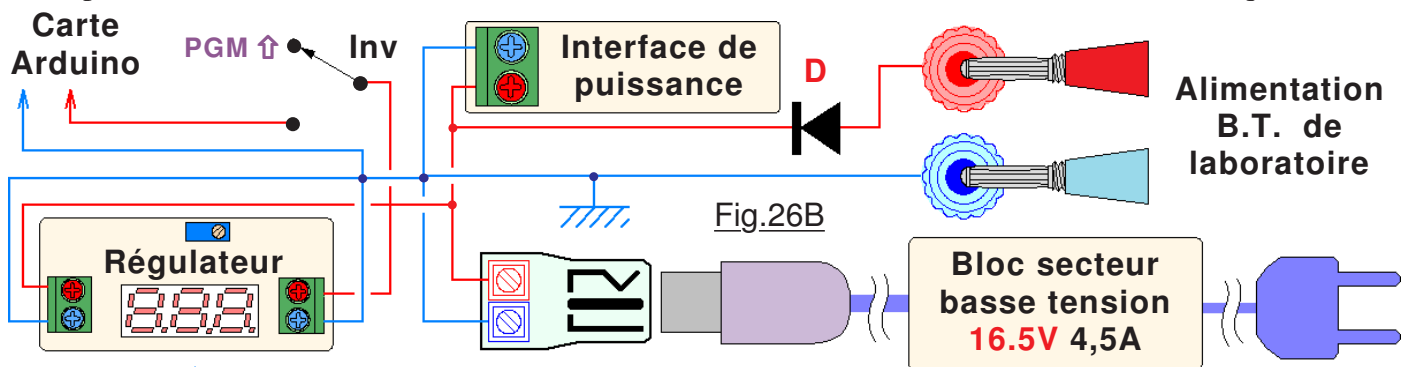


Fig.26B

permet de sélectionner des tensions de sortie entre 12 et 24V avec une intensité possible de 4,5A. La deuxième possibilité envisagée consiste à mettre à contribution une petite alimentation basse tension de laboratoire dont on peut ajuster la tension de sortie à convenance. Dans ce but deux prises pour fiches banane de 4mm sont prévues sur la plaque supportant les divers boutons de commande destinés à l'opérateur. On peut observer ces deux douilles implantées sur la machine avec [Image 29.JPG](#) et d'[Image 30.JPG](#) de la <Galerie d'images>. En particulier sur [Image 30.JPG](#) on constate que l'extrémité de la douille noire pour GND est proche du petit boulon de fixation du pied en caoutchouc. Toutefois, il n'est jamais totalement exclu qu'une erreur de branchement conduise à une inversion de polarité. Les Darlington dans ce cas passeraient en court-circuit franc. Si le fusible saute, alors l'alimentation de laboratoire peut fort bien débiter une intensité suffisante pour détruire le petit module de la Fig.26A et la carte Arduino par effet de cascade. Aussi, comme montré sur la Fig.26B une diode de protection **D** a été insérée sur la borne positive. Un composant de type 1N4007 ne conviendra pas, car l'intensité qui traverse cette diode est importante. Aussi, le choix c'est porté sur une BYW29-100 qui peut redresser jusqu'à 8A. Comme je ne savais pas quelle serait l'importance de l'échauffement, cette dernière de boîtier TO220AC est immobilisée sur un petit radiateur. Comme le montre la Fig.27 elle est un peu éloignée du statif de la machine et assemblée sur ce dernier sur une rondelle plate large. Les deux photographies d'[Image 31.JPG](#) et d'[Image 32.JPG](#) présentent deux vues rapprochées de l'implantation de cette diode sur le corps de la machine qui sur ces images est pratiquement assemblée.

TO220AC

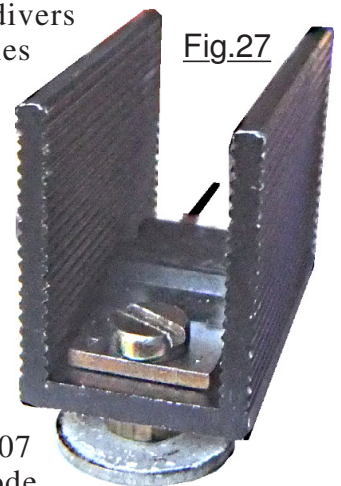
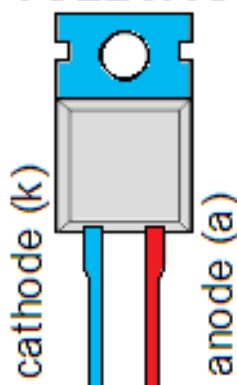


Fig.27

NOTE tardive : Des essais poussés montrent que la diode **D** ne chauffe pratiquement pas, le radiateur de la Fig.27 n'est pas du tout indispensable.

05) Les affectations des broches de la carte Arduino NANO.

Cette implantation reprend pour le codeur rotatif et pour l'afficheur OLED la répartition déjà adoptée sur d'autres applications à base d'Arduino NANO, simplifiant ainsi la rédaction du programme d'utilisation, ainsi que l'étude du circuit imprimé supportant la carte du microcontrôleur. Comme on peut le constater sur la Fig.28 on a mobilisé deux entrées analogiques pour les deux boutons poussoir. Il serait facile de gérer ces deux derniers sur une seule entrée. Toutefois, dans cette application il n'y a pas vraiment à optimiser. Du coup les plages de seuils de détection sont plus étendues, augmentant d'autant l'immunité aux éventuels parasites. C'est d'autant plus justifié que l'on commute à "fortes intensités" des bobines magnétiques, phénomène propice à la génération de perturbations électromagnétiques.

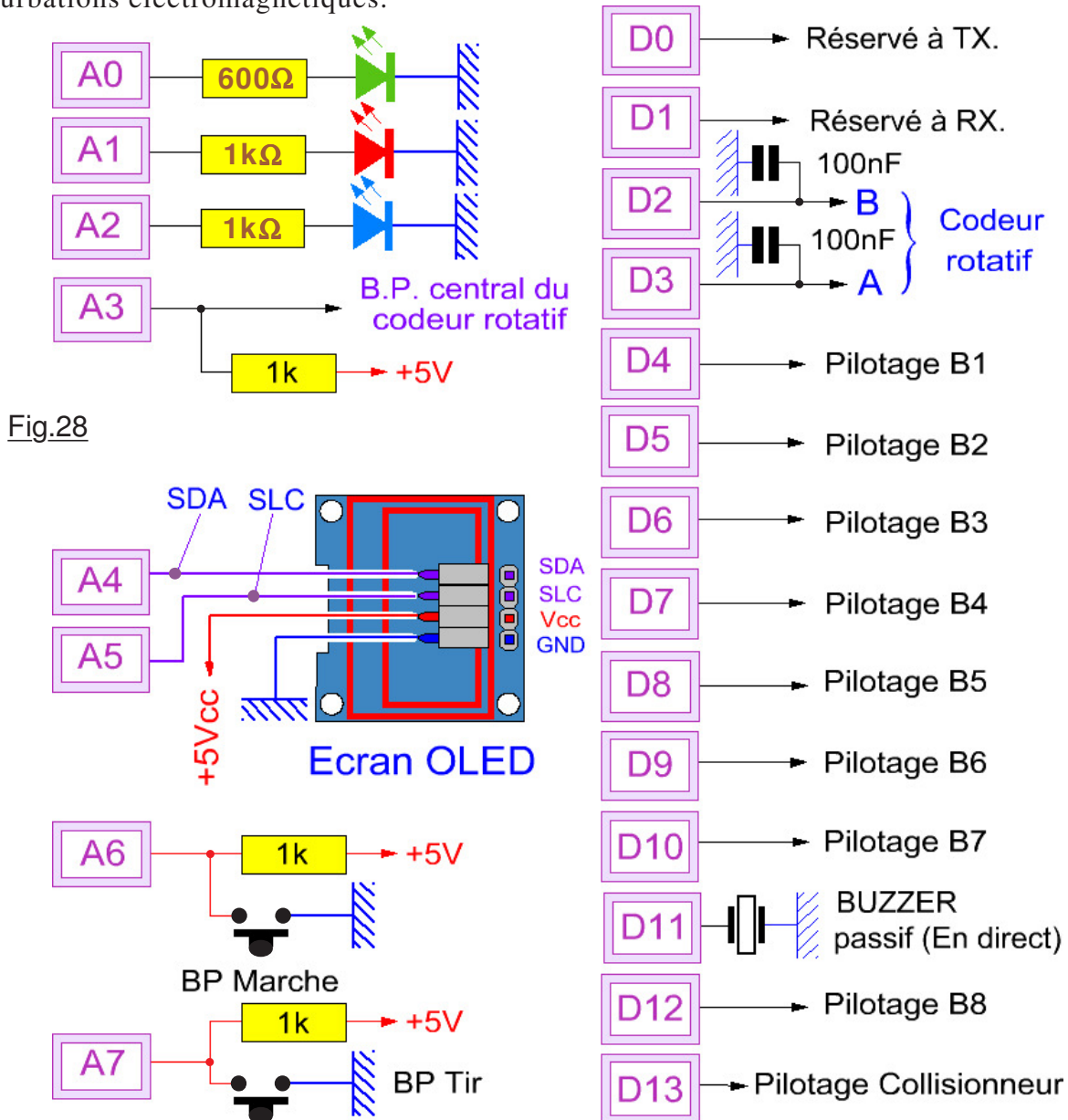


Fig.28

L'expérience a montré que l'impédance du bouton central du codeur rotatif étant trop élevée, des faux clics étaient détectés. Cette impédance a été diminuée en interposant une résistance de 1kΩ entre A3 et le +5Vcc. De même que pour éliminer les faux rebonds de commutation sur le codeur rotatif, deux condensateurs de 100nF sont ajoutés entre A, B et GND. On peut naturellement se demander pourquoi les huit inducteurs n'ont pas été tous connectés à des broches voisines. On remarque un élément "perturbateur" en D11. C'est un BUZZER passif qui pour des facilités de programmation utilise de la PWM, D12 et D13 ne pouvant pas générer ce type de signal. C'est la raison pour laquelle le petit bruiteur a été intercalé, ce qui du reste ne complique en rien la programmation. Le câblage des trois LEDs est conçu pour laisser à la conception le choix entre un composant triple à cathode commune, ou à trois témoins lumineux indépendants. C'est au moment de l'élaboration du circuit imprimé que le choix de trois diodes a été effectué.

➤ Réalisation du circuit imprimé de la carte Arduino NANO.

C'est l'Étape n°3 annoncée en haut de la page 5 de ce didacticiel. Une plaquette cuivrée préperçée d'expérimentation retaillée aux dimensions requises regroupe les divers composants qui équipent le cœur de gestion de la machine. Il est évident qu'à ce stade du projet tout n'est pas déterminé. Je ne puis être certain par exemple que le Buzzer sera effectivement utilisé. On va donc commencer par réaliser le circuit imprimé et le tester avec `P04_Testeur_le_CI_NANO.ino` prévu à cet effet. L'utilisation de ce petit outil logiciel est précisée en tête de listage du programme.

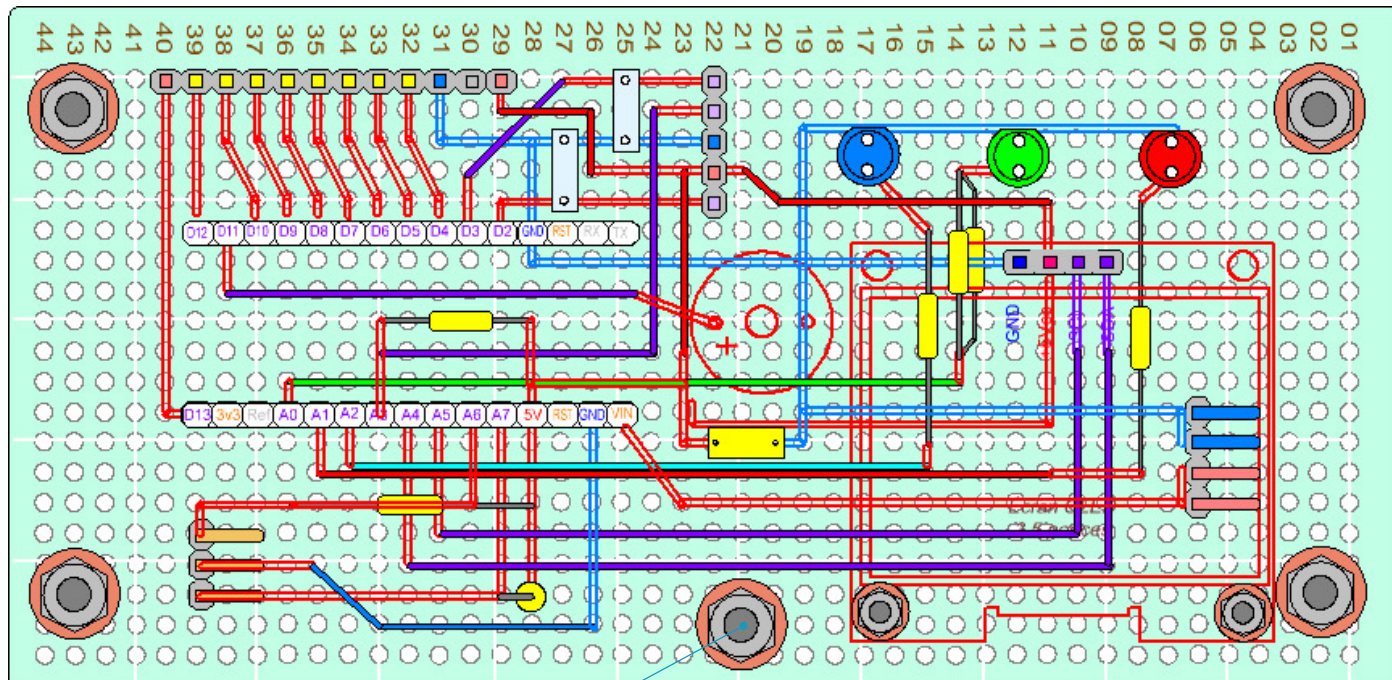
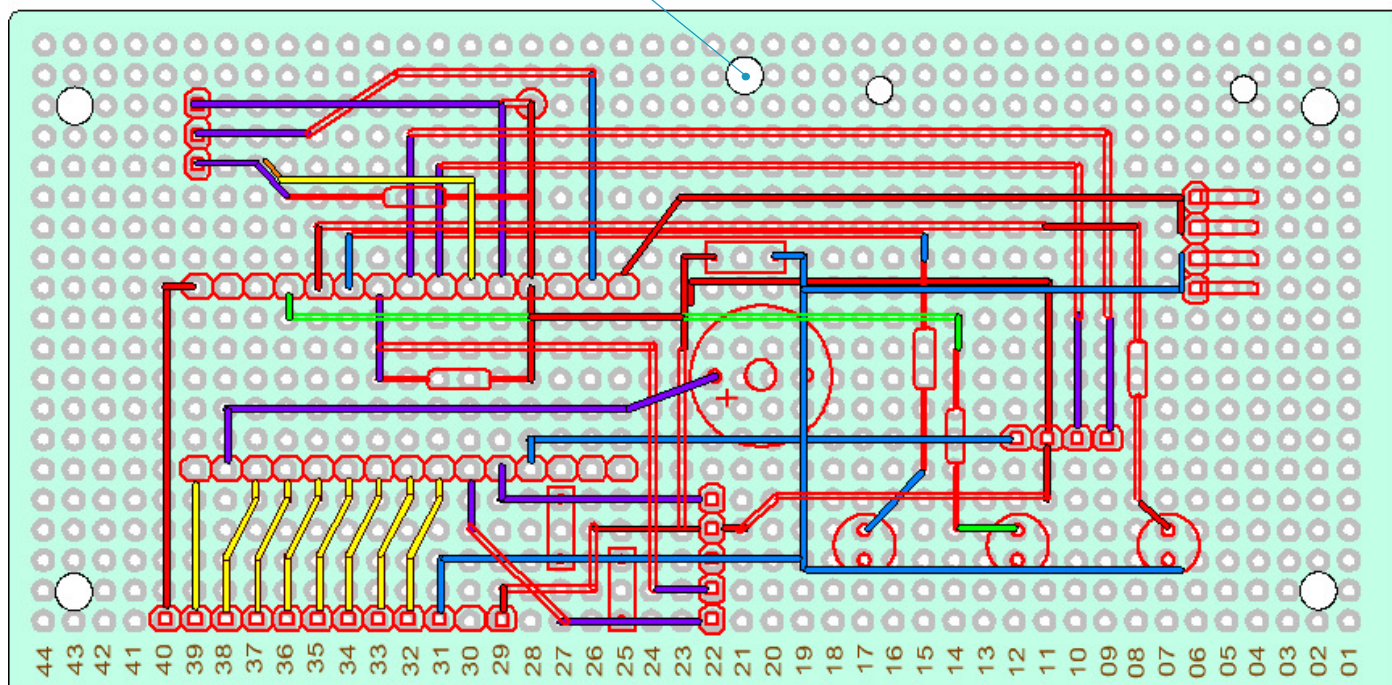


Fig.29 *Finalement ce trou n'a pas été utilisé.*

Circuit de gestion de la machine.



Avant d'envisager de développer le programme final d'exploitation de cette petite machine ludique, il importe de valider le concept et de tester l'accélération de la bille par usage du logiciel outil `P05_Generer_une_rotation.ino` prévu dans ce but. Toutefois, avant de passer à la suite "naturelle" de ce didacticiel, il me semble opportun d'ouvrir ici un chapitre "de transition" sur les nombreuses étapes concrètes qui conduisent à l'élaboration matérielle de l'ensemble, de son assemblage et du câblage général des diverses lignes d'alimentation et d'interconnexions entre les modules électronique qui équipent ce prototype. Le logiciel final suivra ...

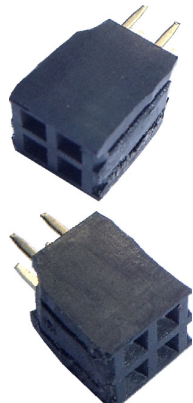
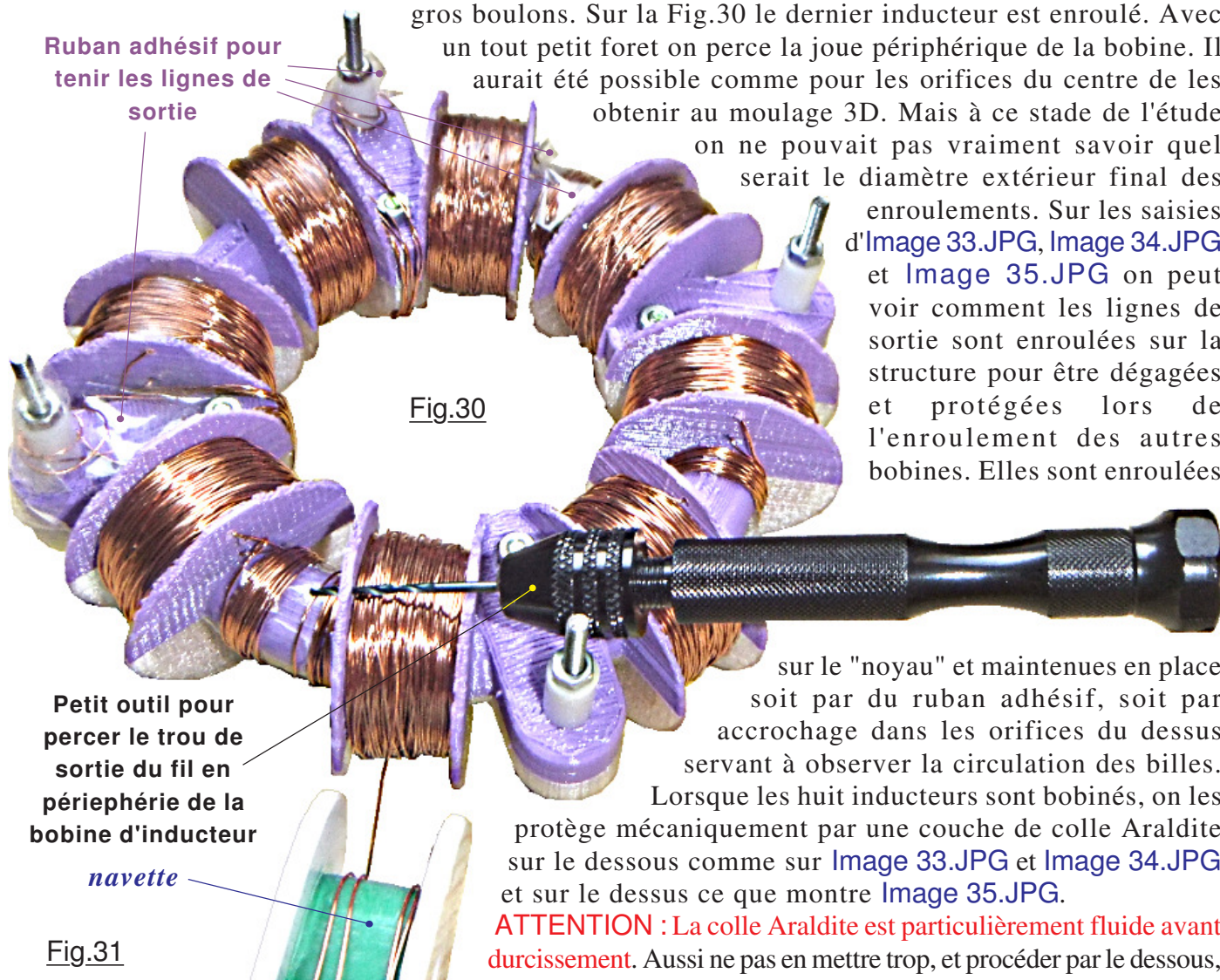
06) Des explications et des dessins pour la concrétisation du matériel.

Bien que la technique pour bobiner les inducteurs a déjà été abordée, ainsi que l'élaboration des divers circuits électroniques, il me semble important d'y revenir pour détailler certains aspects pratiques. Autant agencer cette petite expérience reste simple, car techniquement elle n'est pas bien complexe, autant celles et ceux qui manquent de pratique en électronique et en "usinage" trouveront, je l'espère, dans ces lignes des conseils qui leur faciliteront grandement le travail. Avant de passer aux circuits imprimés, revenons sur la réalisation du "magnétron".

➤ Première phase du projet : La structure des inducteurs.

Les deux demi tores de la Fig.11 sont assemblés par les huit boulons ϕ M3 dont quatre utilisent des vis F90 de longueur 45mm sous tête servant de support via les colonnes. (*Entretoises.*) On va à ce stade bobiner les huit inducteurs. Il ne faut surtout pas mettre en place le collisionneur qui encombrerait la zone de passage de la *navette* approvisionnée de la Fig.9 et libérée des deux

gros boulons. Sur la Fig.30 le dernier inducteur est enroulé. Avec un tout petit foret on perce la joue périphérique de la bobine. Il aurait été possible comme pour les orifices du centre de les obtenir au moulage 3D. Mais à ce stade de l'étude on ne pouvait pas vraiment savoir quel serait le diamètre extérieur final des enroulements. Sur les saisies d'[Image 33.JPG](#), [Image 34.JPG](#) et [Image 35.JPG](#) on peut voir comment les lignes de sortie sont enroulées sur la structure pour être dégagées et protégées lors de l'enroulement des autres bobines. Elles sont enroulées

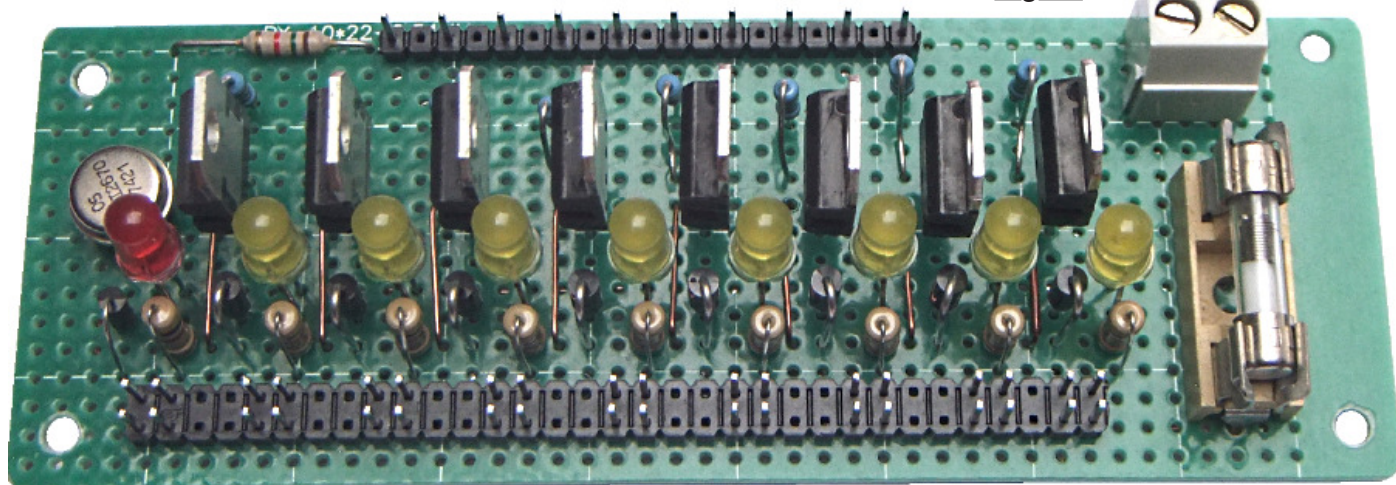


Dérrouler ensuite les huit sorties et en torsader les fils comme sur [Image 36.JPG](#) qui sont étamés à leur extrémité en vue du soudage sur les connecteurs. Avant étamage il faut éliminer l'émail. Le plus simple consiste à le racler avec une lame de rasoir à plat. Puis, préparer les petits connecteurs dont la Fig.31 présente deux exemplaires. Ils sont extraits à partir d'une barrette femelle de contacts HE14 double rangées. Pour en séparer des unités à quatre lyres, un cutter ne sera pas commode, car il faut couper des deux cotés, mais le centre reste bien rigide. Le plus simple consiste à serrer la barre dans un étau protégée par deux mordaches en bois tendre. Puis, avec une scie à métaux on sectionne sans hésiter à la verticale d'une lyre. Il suffit ensuite avec un cutter d'éliminer les plus grosses bavures et les neuf connecteurs peuvent être disponibles comme par exemple sur [Image 37.JPG](#). **Page 17**

➤ Deuxième phase du projet : L'interface de puissance.

Circuit imprimé relativement simple à réaliser, il apporte peu de commentaires. Les différentes étapes qui conduisent à sa concrétisation sont présentées avec les photographies commentées d'[Image 38.JPG](#) à [Image 41.JPG](#). Lorsque le circuit imprimé sera entièrement achevé il ressemblera à celui de la Fig.32 sauf que le petit transistor NPN sera remplacé par un Darlington TIP122 comme précisé sur le dessin de la Fig.24 en page 13.

Fig.32



➤ Troisième phase du projet : Le module de contrôle de la machine.

Cruciale, cette étape consiste à réaliser le circuit imprimé qui supporte le microcontrôleur ATmega328 qui gèrera la machine par l'entremise d'une petite carte Arduino NANO insérée dans deux lignes de connecteurs HE14. Ce petit circuit imprimé assez universel qui pourrait fort bien équiper d'autres projets intègre pas mal de composants "ordinaires" dont le bruitier et un afficheur graphique OLED, plus la liaison avec un codeur rotatif. Le réaliser ne doit pas présenter de difficulté pour qui sait convenablement souder et interpréter les dessins de la Fig.29 donnée en Page 16. Pour vous aider dans cette phase cruciale, les nombreuses photographies d'[Image 42.JPG](#) à [Image 49.JPG](#) sont commentées dans le dossier <Galerie d'images>. Noter que les trois LEDs prévues pour la visualisation des états du système peuvent avoir des rendements très différents. Par exemple sur le schéma de la Fig.28 la résistance de limitation de courant initiale était de $1k\Omega$. Mais son éclairement étant insuffisant, on constate sur [Image 49.JPG](#) qu'une résistance de $1,5k\Omega$ a été soudée en parallèle ce qui donne au final la valeur annoncée de 600Ω .

L'assemblage des deux lignes de contacts **X** et **Y** qui supportent la carte NANO Arduino doit présenter une orientation verticale soignée. Pour assurer la correspondance parfaite avec les picots du connecteur de la carte électronique, personnellement je commence par corriger le

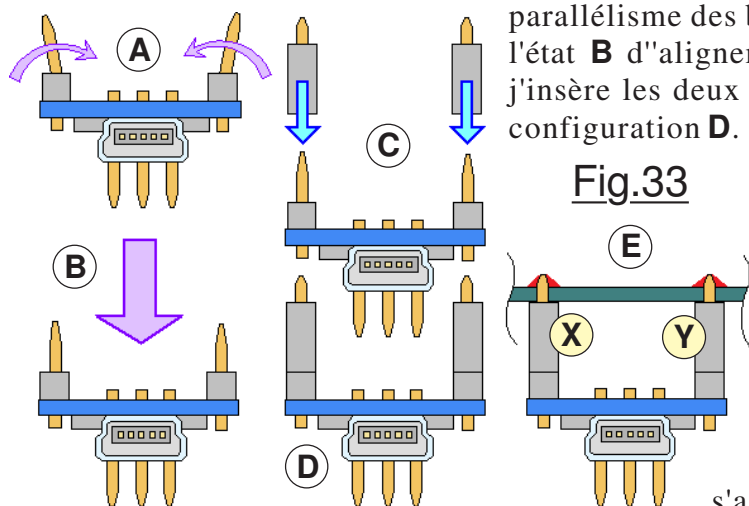


Fig.33

parallélisme des broches comme en **A** de la Fig33 pour aboutir à l'état **B** d'alignement rigoureux des trente broches. Puis en **C** j'insère les deux lignes de connecteurs HE14 pour aboutir à la configuration **D**. L'ensemble est ensuite positionné sur le circuit imprimé. On retourne le tout comme en **E** et l'on soude les quatre picots d'extrémité. Les deux lignes **X** et **Y** étant alors parfaitement placées, on enlève la carte électronique NANO Arduino puis on achève le soudage de toutes les autres broches.

Pour toutes les étapes de la réalisation de ce circuit, chaque soudure est vérifiée avec une loupe à fort pouvoir grossissant pour s'assurer qu'il n'y a pas de contact interdit avec

les éléments voisins, et que la soudure présente un aspect visuel correct. Un contrôle permanent à chaque étape est le gage d'un fonctionnement "immédiat" et fiable.

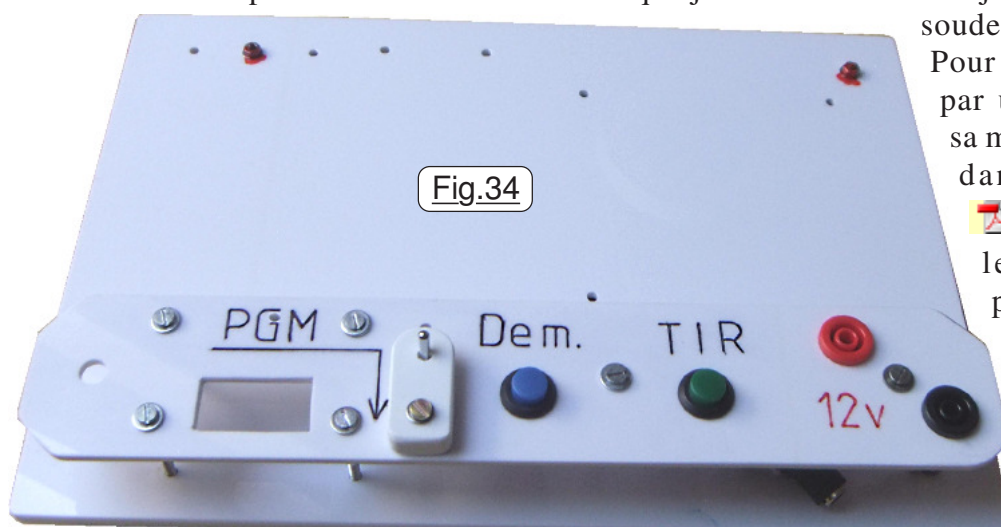
➤ Quatrième phase du projet : Créer la structure de la machine.

Composée d'un statif très rigide étudié pour un minimum d'encombrement et d'un petit tableau de pilotage, cette structure rassemble mécaniquement l'intégralité des composants de la machine et de leurs interconnexions. Réduits à leurs plus simples expressions puisque composés de deux plans rectangulaires, ces deux éléments sont élaborés à partir de plaque de polystyrène choc de 3mm d'épaisseur. C'est un matériau que j'affectionne et dont j'abuse, car il se travaille et se

soude particulièrement facilement. Pour ne pas encombrer ce tutoriel par une foule d'explications sur sa mise en œuvre je vous propose dans un document complet

[Travailler du polystyrène choc.pdf](#)

le résumé des techniques pour réaliser entièrement des coffrets personnels. Dans notre cas ce sera bien plus élémentaire, car le plus compliqué consistera à

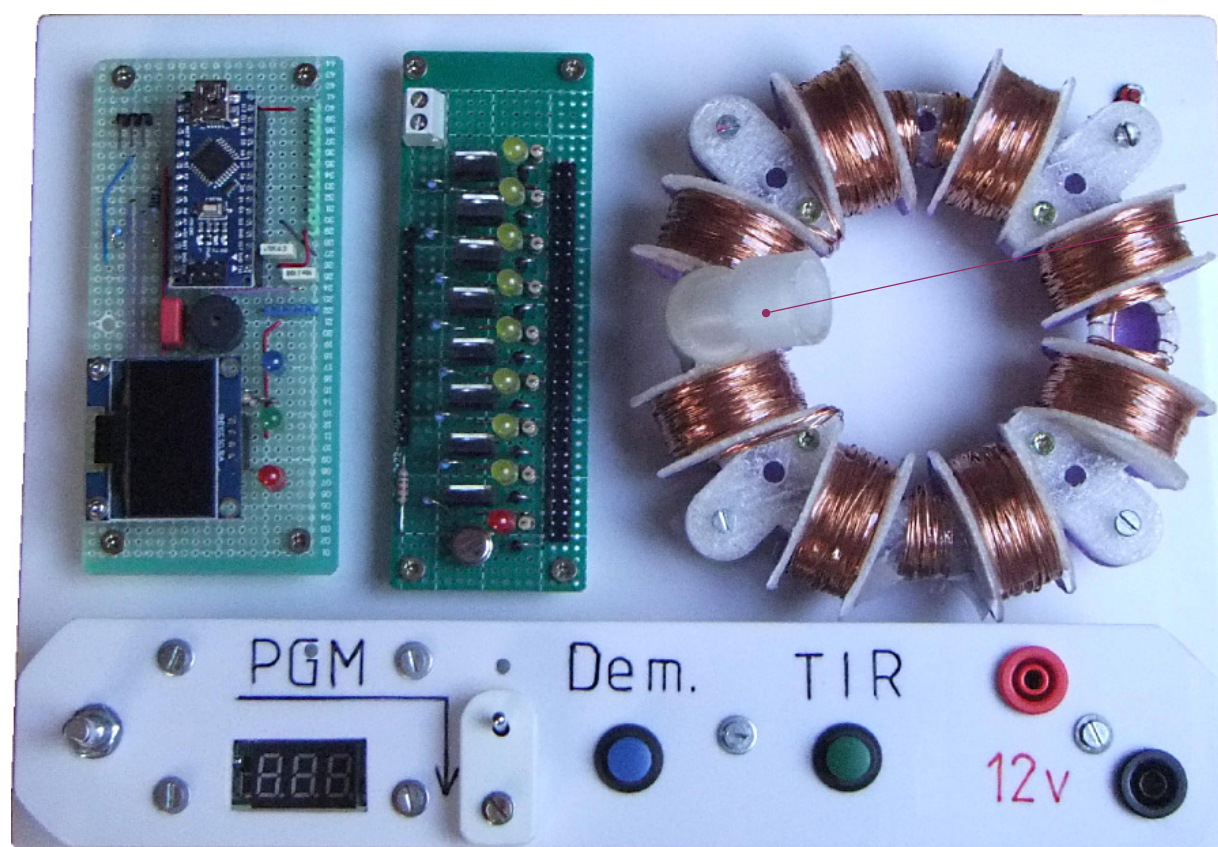


souder deux plaques face contre face pour créer le statif rigide. Ce document existe, je ne le modifie pas, contentez-vous d'y puiser les informations qui vous concernent.

Façonner le statif.

Suite à une étude papier pour déterminer les dimensions les plus modestes possibles compatibles avec un câblage aisé, on arrive à la forme d'un rectangle de 190mm x 265mm. La Fig.35 présente l'assemblage des divers éléments de la machine qui laissent une place suffisante entre chacun pour loger les lignes de câblage, et en particulier celles qui véhiculent des courants importants.

Sur [Image 50.JPG](#) on note que l'ensemble repose sur des pieds en caoutchouc de hauteur 8mm. Surtout, sur [Image 51.JPG](#) on constate que pour minimiser l'encombrement sur le dessous les écrous et les têtes de vis sont "effacés" dans des chambrages. C'est sur [Image 52.JPG](#) que l'on



Chez vous le manchon sera vertical.

Fig.35

voir une vue d'ensemble. Notons au passage que le caoutchouc interdit un serrage efficace des petits boulons ϕ M3 de liaison. On se contente de serrer modérément pour assurer la liaison complète. Puis, ce que montre la Fig.36 on freine l'assemblage avec du vernis à ongles par exemple. Il en sera ainsi pour les deux douilles de fiches bananes d'Image 29.JPG et d'Image 30.JPG.

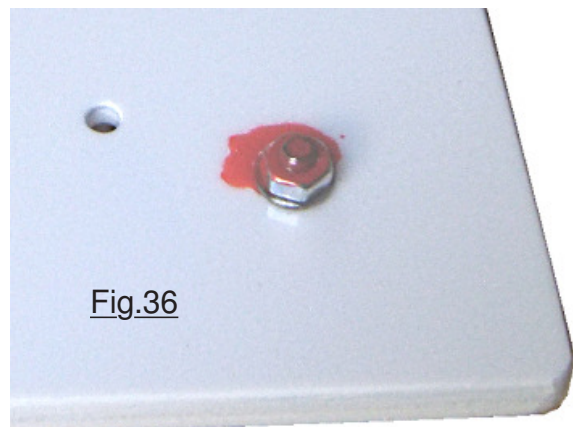


Fig.36

D pour réaliser le statif, on commence par tailler les deux plaques qui seront assemblées face contre face. Puis on repère avec précision tous les trous de fixation des divers éléments de la machine. Ensuite, on en perce deux diagonalement opposés sur l'une des plaques. L'autre étant parfaitement alignée, on les "contre-perce" bien en face l'un de l'autre. On assemble provisoirement les deux éléments avec des boulons ϕ M3 pour ne pas qu'ils puissent se décaler. On perce alors tous les autres trous à 3mm sur les deux plaques. Enfin, on sépare les deux plaques, et sur l'une d'elle on réalise les chambrages en agrandissant les trous au diamètre de 10mm. (*Attention les trous de fixation pour les pieds en caoutchouc ne sont pas chambrés.*) Pour terminer la réalisation du statif, on "tartine" avec du diluant cellulosique la face concernée de la plaque qui contient les chambrages et l'on soude les deux éléments en s'inspirant du chapitre **Technique d'assemblage pour deux plaques soudées en surface** du document cité en page précédente. Les deux plaques étant soudées et bien durcies, on lime alors les quatre tranches pour qu'elles soient bien plates, on réalise des petits chanfreins et le statif est pratiquement achevé.

T erminer cette pièce principale consiste à souder au bon endroit le petit bossage qui montré sur Image 53.JPG va servir à surélever la douille de branchement du 16,5Vcc dont la Fig.37 présente le bridage par une petite plaque métallique. Les deux trous de passage des vis ne sont pas chambrés, car, comme pour celui de la diode BYW29-100 ces deux éléments n'avaient initialement pas été envisagés. Ils ont été ajoutés après collage des deux plaques du statif. Image 54.JPG et d'Image 55.JPG complètent ce descriptif.

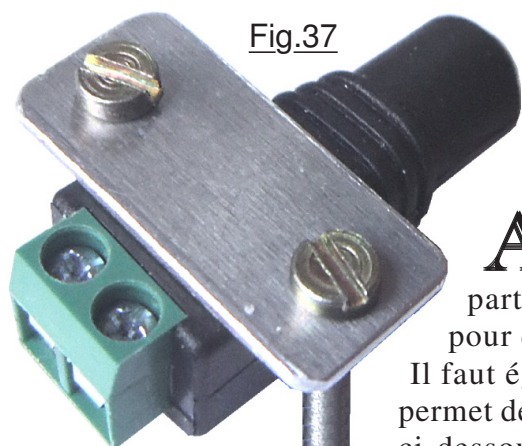


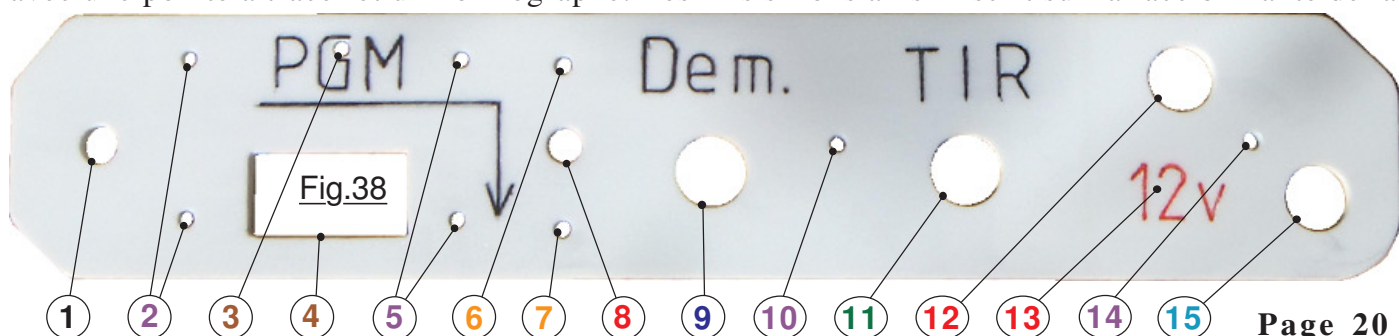
Fig.37

Façonner le petit tableau de maitrise.

A utre facette importante du projet, de son esthétique dépend en grande partie l'agrément d'utilisation de la machine. En particulier il importe de soigner la précision des trous circulaires pour que les éléments traversent la plaque avec un minimum de jeu.

Il faut également apporter son attention à l'usinage de la lumière 4 qui permet de voir l'affichage du petit module régulateur. La Fig.38 présentée ci-dessous montre la plaquette terminée avec le repérage des divers

orifices. En 2 et 5 on trouve le passage des vis longues F90 de 40mm de longueur totale. Elles servent d'entretoises pour soutenir l'élément sur le statif, et simultanément assurer la liaison du petit module de régulation. Deux autres vis identiques en 10 et 14 supportent l'autre coté du petit tableau de bord. Sur la Fig.39 l'ensemble a été provisoirement assemblé pour vérifier les non interférences ainsi que le montage facile des divers éléments. Sur cette vue qui reprend les repères de la Fig.38 on voit que pour simplifier l'opération les vis 2, 5, 10 et 14 sont placées la tête dessous. Le petit bossage d'Image 53.JPG n'est pas encore collé. Les belles inscriptions ont été gravées avec une pointe à tracer et un normographe. Les fins sillons ainsi inscrit sur la face brillante de la



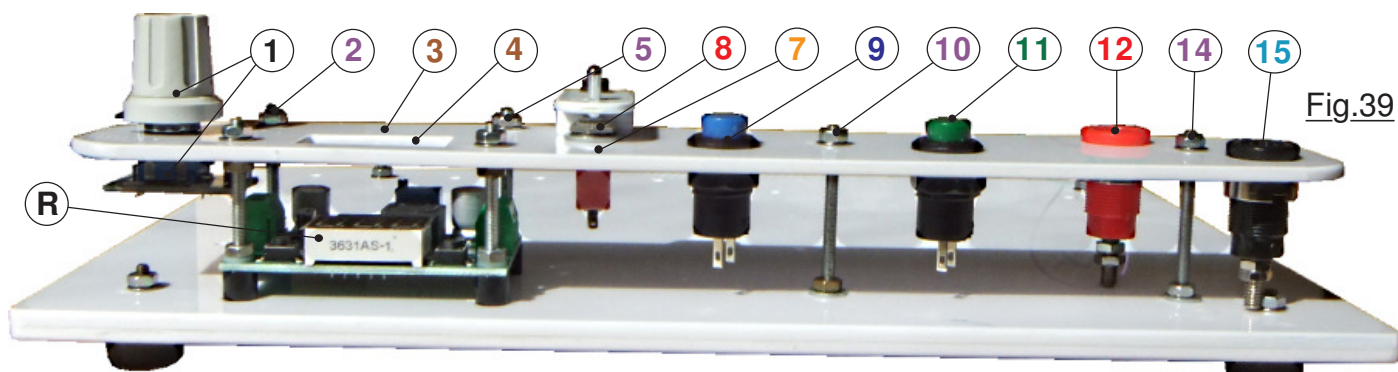
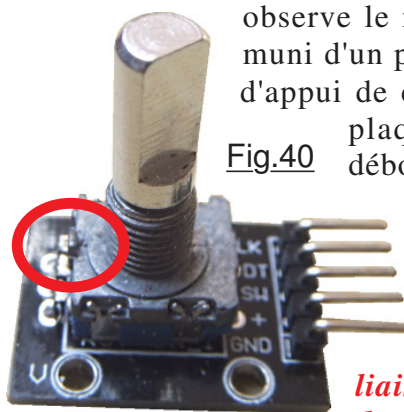


Fig.39

plaque sont définitivement "gravées dans le marbre". Ces inscriptions ont été surchargées par utilisation d'un stylo feutre permanent. Ce n'est que par la suite que la tension d'alimentation est passée de 12V à 16,5V et il n'était plus possible d'en changer la gravure. Ce n'est pas bien pénalisant et l'on fera avec. En **1** se trouve l'orifice de centrage du codeur rotatif. Quand on observe le médaillon de la Fig.40 on constate que le corps du codeur rotatif est muni d'un petit ergot pour l'empêcher de tourner. Cet ergot dépasse de la surface d'appui de ce composant. Il importe de prévoir un orifice dans l'épaisseur de la plaque, l'[Image 56.JPG](#) montre qu'il est préférable qu'il ne soit pas débouchant pour des raisons purement esthétiques. La profondeur de perçage fait environ 2mm. En **3** se trouve l'orifice qui permet de passer un petit tournevis pour ajuster la tension de sortie du régulateur **R** et en **4** l'ouverture d'observation de son afficheur numérique.

Fig.40



ATTENTION : Si on consulte l'encadré jaune et rouge de la Page 30 on est averti qu'il est interdit *d'alimenter VIN simultanément avec la liaison Mini-USB de programmation de l'ATmega328 ou le régulateur de la carte NANO sera détruit !* Hors durant le développement du

programme d'exploitation il faudra à la fois utiliser la ligne de dialogue USB pour téléverser le logiciel, et appliquer les 16,5Vcc pour alimenter en puissance. Il serait dommage que durant cette phase de développement qui englobait des heures et des heures et qui s'accompagne de très nombreuses manipulations, que malencontreusement l'opérateur bascule inopinément l'inverseur de coupure de **VIN** gravé PGM. C'est la raison pour laquelle sur le schéma électrique de la Fig.27 en Page 14 l'**Inverseur** dans la position **PGM** permet de couper l'alimentation de sortie du **Régulateur**. Pour éviter tout basculement malencontreux de cet inverseur en mode programmation, un bloqueur mécanique montré sur les deux vues de la Fig.41 est prévu. Sur [Image 57.JPG](#) à [Image 59.JPG](#) le bloqueur est en position normale pour l'utilisation de l'accélérateur de particules. *Dans cette configuration il est interdit de brancher sur la carte Arduino NANO la prise mini-USB de téléchargement des logiciels d'exploitation.* Sur [Image 60.JPG](#) et sur la Fig.42 la petite pièce d'interdiction de basculement de l'inverseur est dans la position impérative quand on développe les programmes ou que l'on téléverse le code binaire. On peut noter au passage qu'immobiliser le bloqueur sur le tableau de pilotage pour l'usage normal de la machine n'est pas un impératif. En effet, si par mégarde on bascule l'inverseur dans l'autre position il ne se passera pas grand chose mis à part que la carte Arduino NANO ne sera plus alimentée et la machine restera inerte. Cette possibilité a toutefois été adoptée, car elle permet d'avoir une solution de rangement du bloqueur tout en ayant sa disponibilité permanente. Vous pouvez vous contenter de ne pas percer le trou de passage de la vis sur la plaque du tableau de maîtrise et ranger cet accessoire ailleurs.



Fig.41

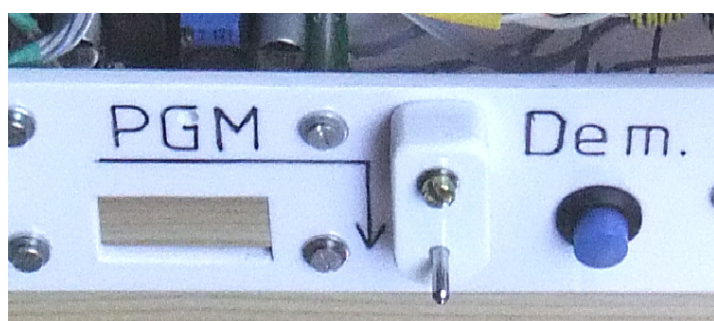
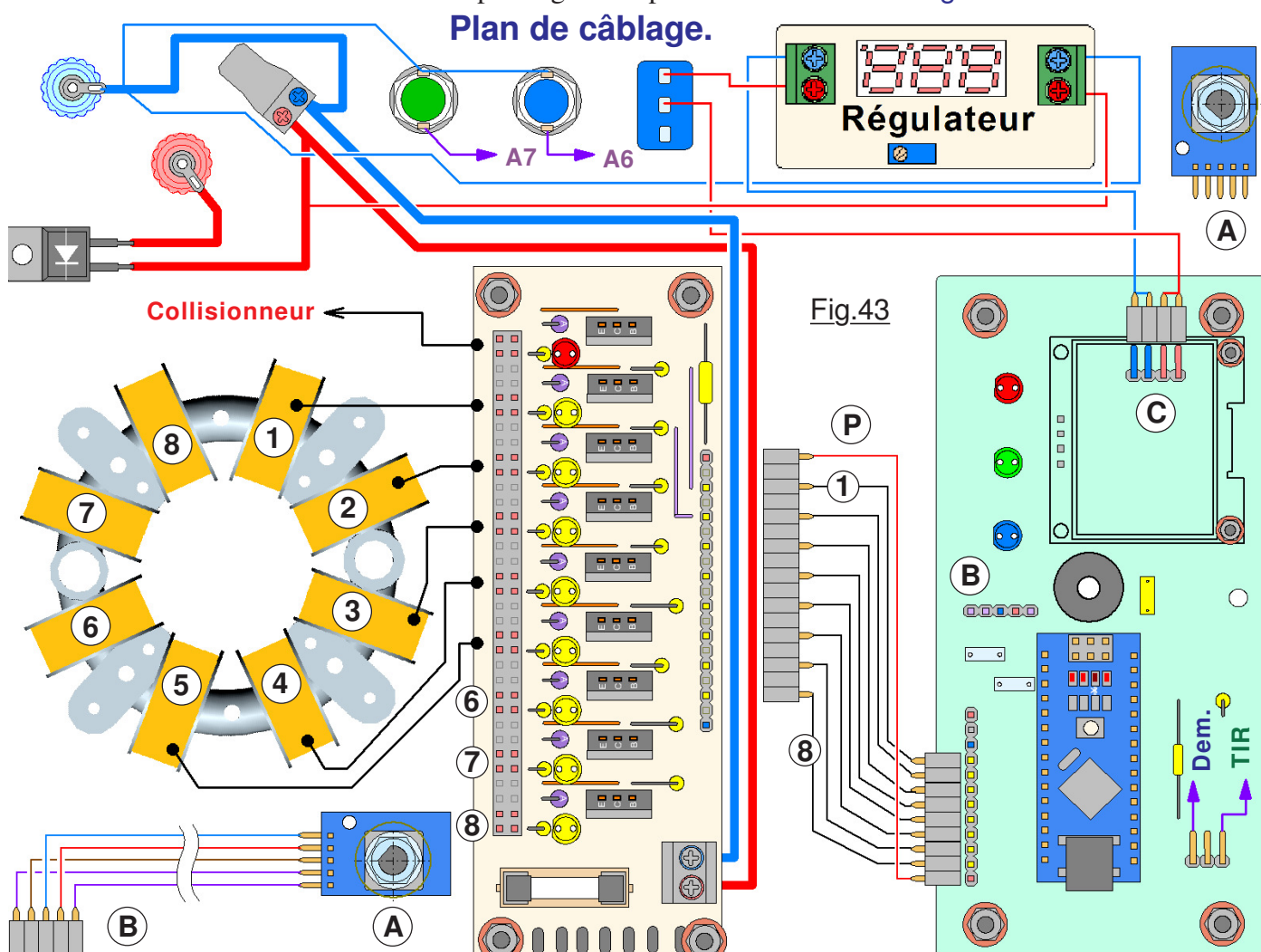


Fig.42

➤ Cinquième phase du projet : Liaison entre les modules électriques.

U ltime facette du projet avant de passer à l'étude du logiciel d'exploitation, cette opération est presque l'une des plus facile, surtout si l'on procède avec méthode et dans l'ordre. L'action la plus délicate consiste en réalité à souder les petits connecteurs doubles sur les neuf lignes de liaison avec les bobines des inducteurs. Sur [Image 61.JPG](#) ces petits éléments dont la technique d'élaboration a été abordée avec la Fig.31 ont été insérés sur la rampe HE14 double du circuit imprimé d'interfaçage alors que sur [Image 62.JPG](#) le travail le plus délicat qui consiste à gratter l'émail, à étamer le fil et à les souder est achevé. (Voir les explications en bas de la Page 17.)

Remarquez que sur le **Plan de câblage** donné Fig.43 les lignes qui véhiculent les "courants importants" de 2,75A sont repérés par des traits plus larges que les autres lignes d'alimentation de la carte Arduino ou des liaisons de pilotage. On peut observer sur [Image 63.JPG](#) le tableau de



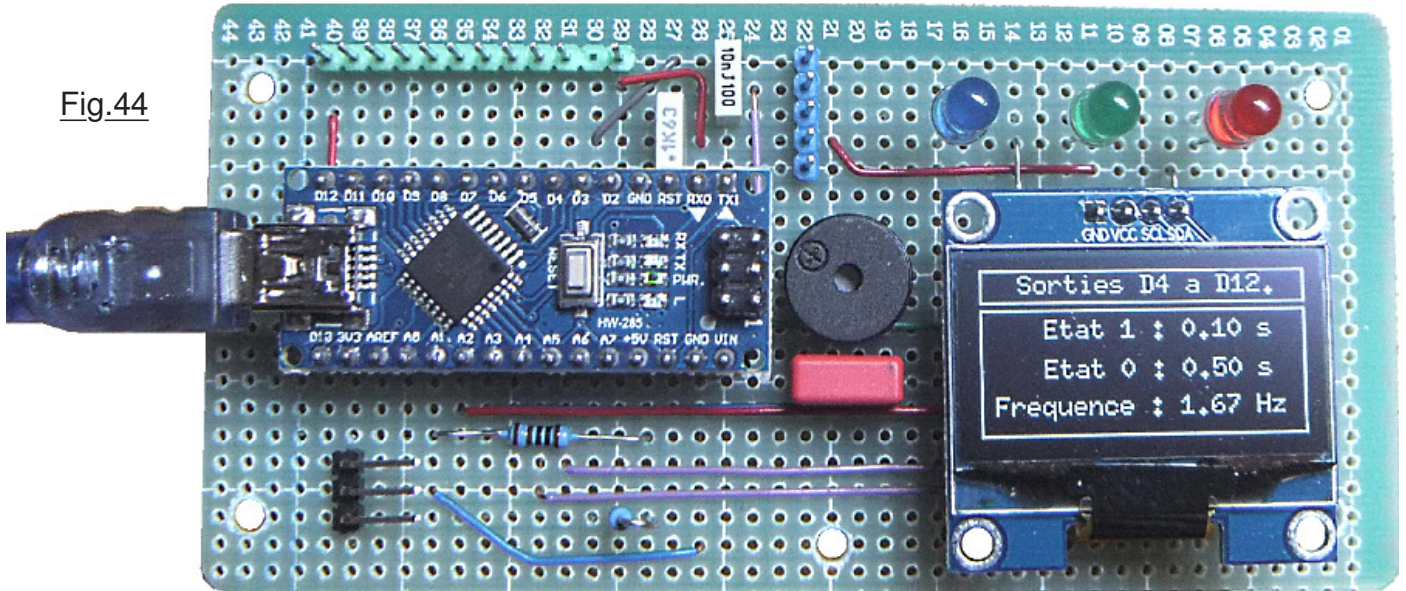
maitrise en cours de câblage. Les petits fils sont réalisés avec des limandes plates de raccordement dans les tours des ordinateurs de bureau. On sépare les fils, on les torsade, à intervalles réguliers on serre la tresse avec de la gaine thermo rétractable et l'on obtient la belle ligne **L** d'[Image 63.JPG](#) qui relie le **Régulateur** au connecteur **C**. Sur [Image 64.JPG](#) on a un autre exemple pour lequel la gaine thermo rétractable est remplacée par une petite ligature réalisée avec du petit fil électrique rigide. C'est la liaison de Pilotage **P**. On y observe également le départ de la ligne **B**.

E nfin il reste à installer le collisionneur pour que la machine soit complète. Le manchon coulé en 3D présente un petit jeu quand on insère le total dans le chambrage vertical du corps de la machine. Aussi, j'ai enroulé un ruban de papier sur le tenon mâle de façon à ce que l'emboîtement se fasse à frottement doux avec un léger serrage. L'ensemble est ainsi parfaitement positionné. Pour assurer une liaison rigide et définitive, une petite couche de colle Araldite à été déposée le long du joint sur un tiers de tour environ. C'est sur [Image 65.JPG](#) que l'on peut admirer le résultat final. Il reste à réaliser les logiciels qui seront téléversés sur la carte Arduino pour créer le programme d'exploitation dont dépend la qualité opérationnelle de la machine.

07) Logiciel outil pour tester l'accélération correcte des billes.

Jusqu'à présent on a foncé la tête dans le guidon pour réaliser le matériel. Ce n'est que lorsque ce dernier est complètement assemblé et opérationnel que l'on peut raisonnablement développer les programmes qui animeront la machine. Donc, jusqu'à ce stade on n'a pas encore vérifié le bienfondé des solutions adoptées. C'est précisément maintenant que l'on va téléverser des outils disponibles dans le dossier **<Les programmes Arduino>**. La phase initiale consiste à téléverser les petits programmes qui servent à vérifier le circuit imprimé cœur du système et à faire connaissance avec le module graphique OLED. pour ces opérations inutile de relier les sorties vers le circuit d'interfaçage, le circuit de la Fig.44 fonctionnant en autonome. On teste dans l'ordre les petits

Fig.44



démonstrateurs **P01_Test_de_textes.ino**, **P02_Graphismes_et_textes.ino** et surtout l'outil **P03_Tester_le_CI_NANO.ino** qui permet de vérifier intégralement la carte imprimée de la Fig.42 son utilisation étant indiquée en tête de listage.

Carte de la Fig.42 fiable, on peut alors commencer les essais dynamiques avec l'outil **P04_Generer_un_signal_binaire.ino** qui va nous permettre de trouver les valeurs des paramètres critiques. Pour cette approche expérimentale on ne branche qu'un seul inducteur sur la sortie binaire **D13**. (Image 66.JPG) À l'usage de ce programme on arrive assez rapidement à la conclusion que l'impulsion de pilotage des enroulements devra être relativement courte. Pour ces essais l'état "0" doit faire environ sept fois celui du "1" pour simuler le temps qui sera consommé dans les autres inducteurs. L'échauffement de la bobine sera ainsi réaliste. Avec **P05_Generer_une_rotation.ino** on déduit que la durée des état "0" devra être très courte ou nulle. C'est avec le démonstrateur nommé **P06_Accelerer.ino** que l'on va déterminer la séquence qui sera utilisée pour effectuer un cycle complet, c'est à dire un lancement de la bille cible en rotation sur plusieurs tours. À la fin d'un tel cycle il y aura collision avec le projectile si **TIR** est validé. Dans tous les cas à la fin d'un cycle la machine se placera en configuration de repos et d'attente d'une consigne opérateur.

Résultats obtenus :

Globalement avec le démonstrateur le lancement en rotation de la bille cible est correct, à condition naturellement que le statif soit bien horizontal et que la tension soit bien de 16,5Vcc. Toutefois, il arrive de temps en temps, bien que ce soit relativement peu fréquent, que la bille reparte dans le sens contraire de sa rotation initiale. Pour expliquer ce phénomène, considérons la Fig.45 sur laquelle l'inducteur **1** a lancé fortement la bille dans le sens de la flèche verte. Pui, au moment où l'inducteur **2** est alimenté, la bille se trouvant entre **2** et **3** est donc fortement attirée en sens inverse. Elle repart alors dans le sens de la flèche rouge et la rotation est perturbée voir erratique.

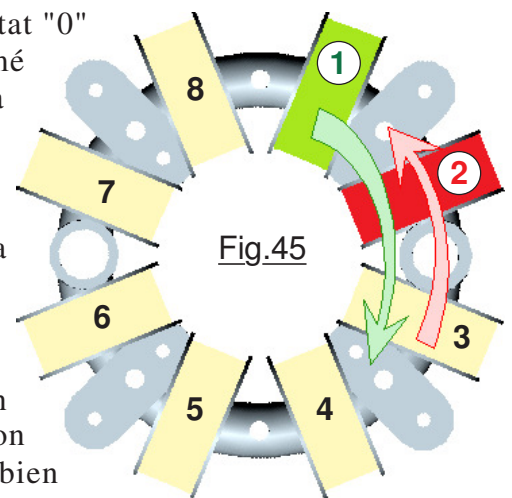
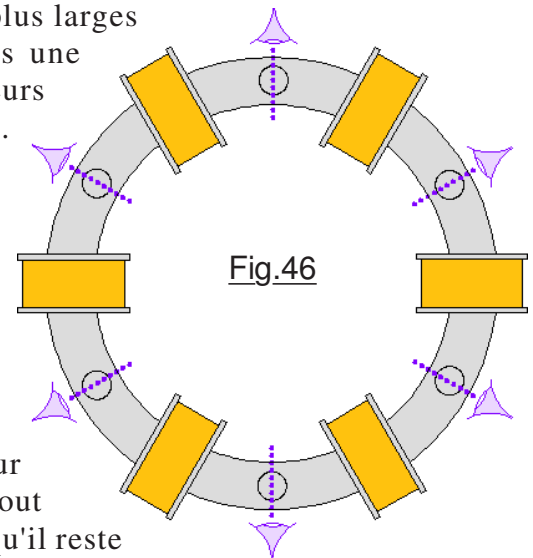


Fig.45

Conclusions :

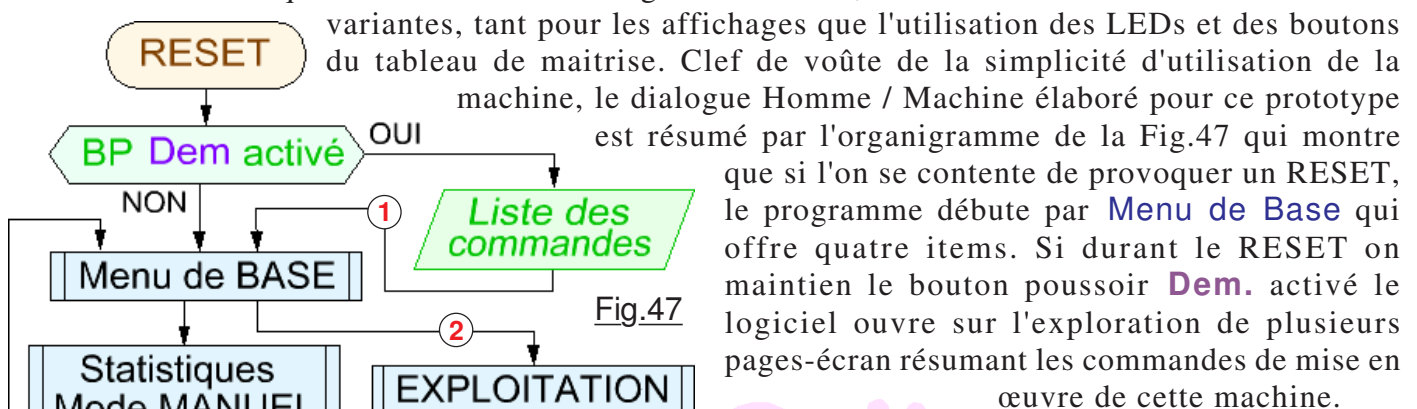
Deux solutions sont alors envisageables. La première consiste à prendre en compte ce phénomène et à le refuser. **Il faut alors repartir de zéro.** La parade consiste à placer un capteur de position des billes entre chaque inducteur. Comme les accélérations restent franches, j'envisagerais dans ce cas de ne placer que six inducteurs, quitte à les faire un peu plus larges pour bobiner plus de fil. On s'orienterait dans ce cas vers une géométrie proche de celle de la Fig.46 sur laquelle les capteurs de position de la bille cible sont symbolisés par des yeux violets. Il ne s'agit que d'un vague schéma, car il resterait à déterminer la nature des capteurs qui ne doivent pas gêner la circulation des billes. Des cellules à effet Hall peuvent être placées à l'extérieur du tore, mais il reste à vérifier qu'elles détecteraient bien la bille et qu'elles ne seraient pas perturbées par le magnétisme des inducteurs. *(Normalement quand le capteur serait testé, tous les enroulements seraient inertes.)* On peut aussi envisager des barrières optiques dont l'axe serait horizontal. Deux trous seraient percés en position radiale pour laisser passer par exemple le faisceau d'une diode LASER. Tout cela reste bien théorique et devrait être validé, sans compter qu'il reste encore à placer trois oreilles pour l'immobilisation de l'ensemble sur le statif.



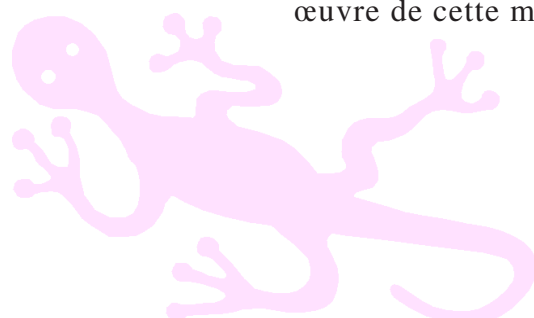
Probablement que ce type de solution conduirait à une vitesse de circulation plus grande de la bille dans le tore ... mais ça reste à concrétiser et surtout à prouver ! Franchement je n'en ai pas le courage, car il faudrait réétudier les pièces moulées, se recolter le bobinage des inducteurs etc. Aussi pour ma part je vais me contenter de la solution imparfaite qui consiste à en rester à la solution actuelle qui globalement permet de belles collisions. Ce n'est qu'une petite machine ludique. Le vrai plaisir est de l'étudier et de la réaliser, et si parfois son fonctionnement se montre un peu erratique ... il suffit alors de recommencer un cycle de plus !

08) Les protocoles d'utilisation de la machine.

Aussi belle et fonctionnelle soit une machine, si son agrément d'utilisation n'est pas bien pensé elle ne sera pas appréciée et de ce fait rapidement oubliée. Des manipulations nécessaires à sa mise en œuvre et du plaisir généré par le dialogue homme/machine dépend directement la qualité opérationnelle de cette dernière. C'est la raison pour laquelle prendre du temps pour élaborer la stratégie d'utilisation des divers boutons et des écrans affichés est un impératif. Les choix effectués et décrits dans ce qui va suivre ont été longuement muris, avec de nombreux essais et tests de



Ben môamôa je trouve qu'elle est riquiqui la machine magnétron truc de Nulentout. Ma mienne à moi elle sera plus puissante et pour les billes je vais utiliser des boules de pétanque. Elle va faire BOUM ma inductotrucmachin !



➤ Comportement sur RESET avec appui sur le bouton poussoir Dem.

Lorsque l'on effectue un redémarrage du programme tout en maintenant actif **Dem.** la page de la Fig.48 est affichée sur le petit écran OLED. Ce type de page-écran résume les commandes utilisables en fonction de l'état du système. Bien que laconiques, ces écrans seront généralement suffisants pour ne pas avoir à se plonger trop souvent dans la notice d'utilisation. Vous avez compris que lors du redémarrage dans **Ce MENU** les deux boutons poussoir seront royalement ignorés. C'est la **Rotation** du codeur incrémental qui va

f a i r e

circuler les pages d'informations Fig.48 à Fig.50 sur le petit écran OLED. Enfin, c'est le **BPC** qui va faire sortir le programme en **1** de l'organigramme de la Fig.47 pour "brancher" le traitement sur le **Menu de BASE**. Sur les divers textes qui seront affichés, **BPC fait référence au Bouton Poussoir Central du codeur rotatif.**

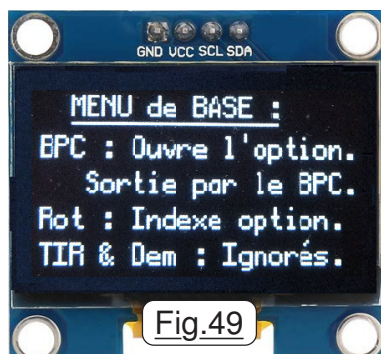


Fig.49

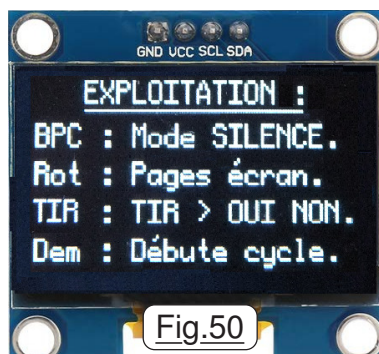


Fig.50

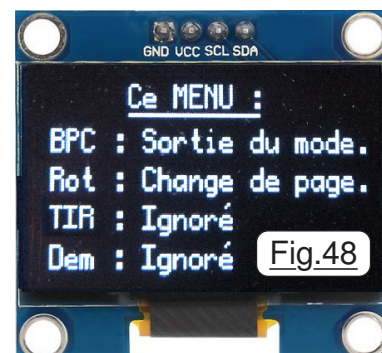


Fig.48

➤ Comportement sur RESET. (Ou de la sortie de la liste des commandes.)

L'ouverture de cette page écran qui affiche le menu principal d'utilisation de la machine pointe l'item **EXPLOITATION**, car les trois autres possibilités sont secondaires. Ainsi, cliquer sur le **BPC** à ce stade fait passer à l'utilisation "standard" de l'appareil dont les commandes seront détaillées plus avant. En tournant le bouton du codeur incrémental dans un sens ou dans son inverse, le curseur qui

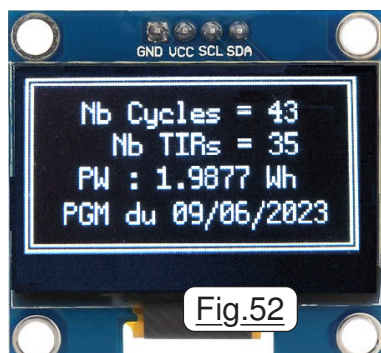


Fig.52

pointe les items se déplace vers le haut ou vers le bas avec un phénomène de "recirculation sur les butées virtuelles". Cliquer sur le **BPC** quand **Statistiques** est

indexé ouvre la page de la Fig.52 qui présente diverses informations concernant "le vécu" de la machine depuis le dernier effacement des données préservées en mémoire non volatile EEPROM du microcontrôleur. Tous les cycles que l'on va déclencher avec le BP **Dem.** seront comptés. Dans notre cas il y en a eu 43. Toutefois, on peut déclencher le processus d'accélération de la "particule cible" à

l'aide de **Dem.** sans que le collisionneur ne soit validé par le BP **TIR**. Dans l'exemple de la Fig.52 il n'y a eu que 35 collisions, c'est à dire huit accélération "à vide". Lorsque le logiciel est en mode **EXPLOITATION**, le programme mesure en permanence la consommation de la machine, le tableau de la Fig.53 précisant les valeurs des intensités consommées mesurées directement sur le secteur alternatif 220V. C'est à partir de ces mesures relativement précises que le logiciel évalue l'énergie consommée **PW** et la mémorise en permanence en mémoire EEPROM. Toutefois, l'utilisateur peut décider sur des critères qui lui sont propres de remettre à zéro ces valeurs enregistrées.

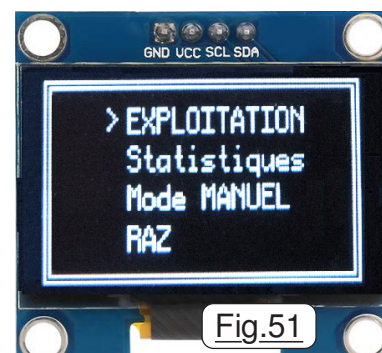
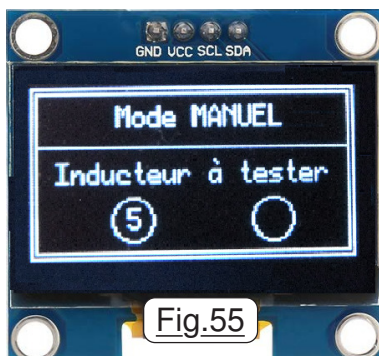
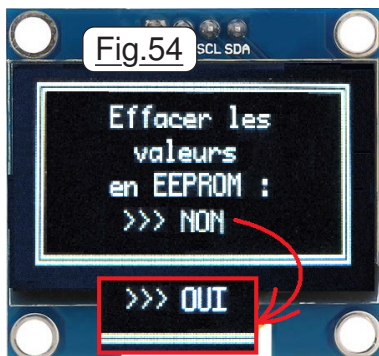


Fig.51

VEILLE avec LED bleue	5,8mA.	Fig.53
Idem + régulateur allumé	6mA.	
Ajout de la LED verte	6,2mA.	
Ajout de l'affichage OLED	6,3mA	
		Total : 1,32W
Durant un cycle avec énergie 16,5V 96mA soit 21,12W		
Un cycle dure 6S. Donc 0,0352 Wh consommé par cycle. (1)		
En VEILLE l'échantillonnage est effectué toutes les 3 secondes soit 0,0011 Wh par échantillonnage. (2)		

Fig.53

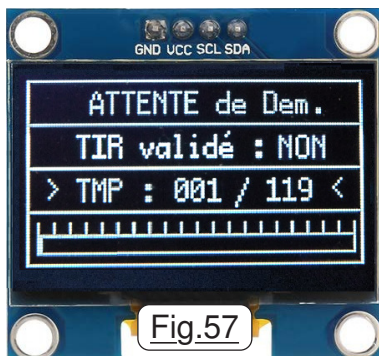
(1) Calcul :
 $21,32 * 6 / 3600$
 (2) Calcul :
 $1,32 * 3 / 3600$



désigner l'un quelconque des neuf bobinages électromagnétiques. Lorsque c'est un chiffre qui est visualisé, le BP **TIR** génère un BIP sonore d'avertissement d'erreur. L'activation au contraire de **Dem.** déclenche l'alimentation en puissance de l'inducteur désiré. Si c'est **C** qui est affiché dans le petit cercle, réciproquement le **Dem.** génèrera le BIP sonore d'erreur alors que l'activation du BP **TIR** provoquera l'alimentation en puissance de l'inducteur du collisionneur. Dans les deux cas la durée de l'impulsion fait 2 secondes. La LED bleue s'allume si c'est un inducteur accélérateur. C'est la verte qui s'allume pour le collisionneur. Durant le BIP sonore d'erreur la LED rouge s'allume dans le cas "des inducteurs d'accélération".

09) Le comportement d'EXPLOITATION de la machine.

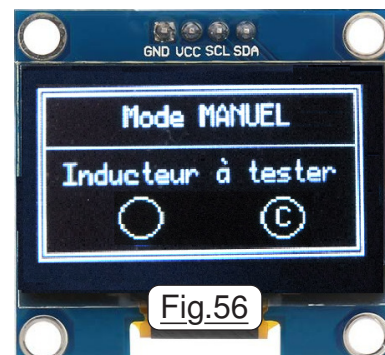
H eureusement pour nous, il se trouve que sur le prototype ou sur votre version de la machine, l'inducteur du collisionneur dans les deux cas doit recevoir une impulsion d'énergie pour faire tomber la bille projectile en fin d'un cycle de rotation. C'est donc le même programme qui peut se télécharger sur les deux versions, inutile de prévoir un logiciel spécifique pour chaque type de machine. C'est à partir du tableau de bord relativement rudimentaire de la Fig.34 que l'on va gérer entièrement le cyclotron et son collisionneur. La sortie du **Menu de BASE** avec passage en **2** de



C'est précisément le but de la fonction **RAZ** de la Fig.51 qui ouvre l'écran de la Fig.54 avec au départ l'option **NON**. En tournant le bouton du codeur Rotatif on fait alterner les deux opposés, le **OUI** étant superposé dans l'encadré rouge. La sortie de ce mode se fait en standard avec le **BPC** et il y a retour au **Menu de BASE**. **ATTENTION : Si en sortie de ce mode c'est l'option OUI qui est présente à l'affichage, les trois données de Statistiques seront forcées à zéro sans avertissement.**

➤ Le mode MANUEL.

S imple outil pour la mise au point ou la maintenance, quand on valide l'item **Mode MANUEL** de la Fig.49 on active une fonction secondaire qui débute par un écran qui ressemble à celui de la Fig.55 sauf que le chiffre affiché dans le petit cercle est le ①. Ce chiffre désigne le numéro de l'inducteur sur lequel on va agir. On peut incrémenter ou décrémente à convenance cette valeur en tournant le bouton du codeur **Rotatif**. Il y a recyclage des valeurs quand on arrive aux "butées logicielles". Toutefois, la grandeur ne passera pas directement de 8 à 1 ou de 1 à 8 mais transitera par l'information **C** de l'écran Fig.56 qui fait allusion au



Collisionneur. On peut par cette procédure

l'organigramme de la Fig.47 ouvre l'écran de la Fig.57 de la fonction **EXPLOITATION**. Comme le précise l'organigramme, mis à part le déclenchement d'un **RESET**, il n'y a pas possibilité de sortir de ce mode de fonctionnement. C'est du reste, de tous les programmes que j'ai été amené à créer à ce jour, le seul et l'unique où la routine **void loop() {EXPLOITATION();}** fait appel à la procédure **void EXPLOITATION()** dont on ne revient jamais ! Cette particularité informatique méritait d'être soulignée. En arrivant dans ce mode, la LED bleue est allumée signalant que le programme attend une action sur le BP **Dem.** Comme le BP **TIR** n'a pas encore été cliqué, l'option de collision est à **NON**.

Toute action sur ce bouton poussoir inversera la valeur de cette option. L'écran "primaire" affiche également la valeur de la température des bobinages des inducteurs. Nous savons que chaque déclenchement d'un cycle va en augmenter leur température. La valeur, qui machine froide débute à la grandeur 1, peut augmenter jusqu'au maximum "toléré" de 119. Cette valeur numérique indiquée est purement formelle. C'est un rapport entre la température ambiante au démarrage de la machine et un échauffement déterminé expérimentalement où un refroidissement sera déclenché.

➤ Comportement thermique de la machine.

Chaque fois que l'on déclenche un cycle d'accélération, la LED bleue s'éteint et le texte **ATTENTE de Dem.** est immédiatement remplacé par **Cycle en cours.** durant toute cette procédure. La LED verte s'illumine alors durant le cycle d'accélération. Puis la machine repasse en attente, la LED bleue étant à nouveau allumée. On constate que l'information **TMP** a augmenté de six unités. Par exemple sur la Fig.58 quatre cycles ont été déclenchés presque en cascade. Le thermomètre à ruban accuse cette variation. Si on laisse la machine sans nouvelle intervention sur **Dem.** lentement le ruban lumineux diminue de longueur, car toutes les trois secondes la valeur de **TMP** diminue d'une unité. Si on clique sur **Dem.** de façon consécutive sans laisser de "temps morts" sur le système, après environ 24 cycles sans repos le thermomètre affiche 119 valeur qui est considérée comme une

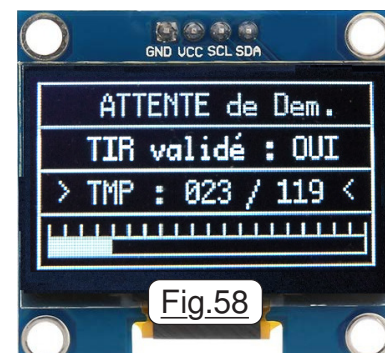


Fig.58

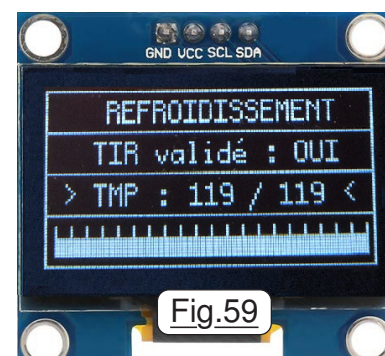


Fig.59

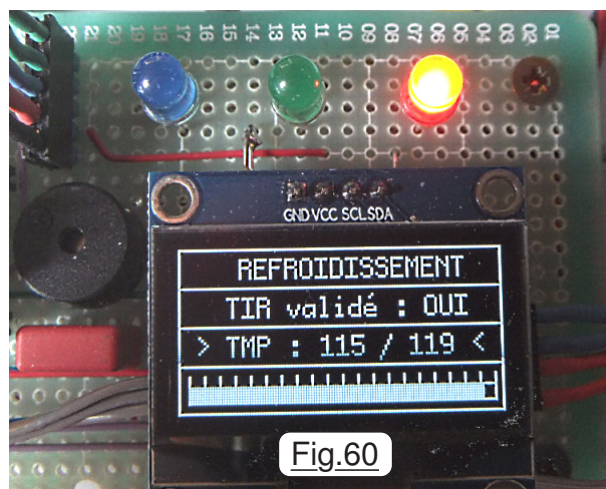


Fig.60

"maximale autorisée". Cette limite a été choisie expérimentalement. Les bobinages inducteurs sont encore relativement tièdes, et le fil émaillé des enroulements pourrait supporter facilement beaucoup plus. En revanche, le corps du tore étant en PLA, il me semble logique de s'en tenir à des élévations de température modérées. Lorsque la limite critique est atteinte, le texte **Cycle en cours** est immédiatement remplacé par **REFROIDISSEMENT** comme sur la Fig.59 et la LED rouge s'allume ce que montre la Fig.60 pour laquelle la baisse de température a commencé.

Tant que le ruban ne sera pas revenu à la valeur de 1 pour **TMP** (Comme sur la Fig.57) la machine est inerte et aucune action sur le tableau de maîtrise ne sera prise en compte. Pour reprendre le contrôle il faut patienter durant six minutes ... ou effectuer un RESET mais dans ce cas je ne vous conseille pas d'exagérer avec l'utilisation du bouton poussoir **Dem.**

➤ Utilisation du bouton poussoir **TIR**.

C'est une simple bascule de type OUI / NON pour le déclenchement d'une collision à la fin d'un cycle. Quand on clique sur le bouton poussoir **TIR** l'effet est assez discret. Le seul effet immédiat est de changer la valeur de l'affichage de la ligne d'état **TIR** qui sur la Fig.61 est mise en évidence dans le médaillon rouge. Si l'état de ce paramètre est **OUI**, en activation de **Dem.** alors la fin d'un cycle se terminera par l'alimentation de l'inducteur durant 500mS et si le bruiteur est validé un son spécifique sera émis durant cet intervalle de temps. Si le collisionneur a été chargé avec une bille, cette dernière sera lâchée comme projectile dans le tore de circulation de la bille cible.

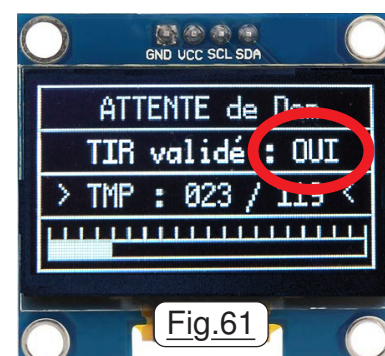


Fig.61

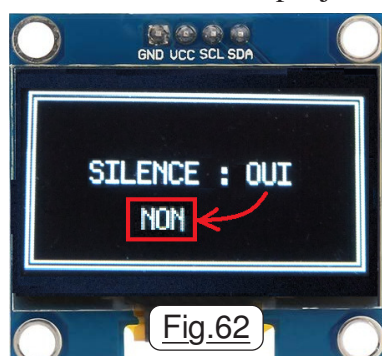


Fig.62

➤ Effet du **BPC** le bouton poussoir du codeur rotatif.

Tout clic sur le **BPC** génère un BIP sonore pour attirer l'attention de l'opérateur. Puis, durant deux secondes la page écran qui était affichée est remplacée par celle de la Fig.62 précisant l'état du mode **SILENCE**. Si **NON** est affiché, la séquence d'un cycle sur l'accélérateur de particule sera accompagnée d'un sifflement dont la tonalité devient de plus en plus stridente, terminée également par un son relativement grave si une collision est consignée.

➤ L'utilisation du codeur incrémental en mode EXPLOITATION.

Faire tourner dans un sens ou dans l'autre le bouton du codeur incrémental à pour effet de faire recycler sur l'écran OLED trois pages différentes et un "écran noir". Dans l'ordre croissant, c'est à dire que le codeur est tourné dans le sens horaire, on obtient l'écran initial de la Fig.57, puis celui de la Fig.63, suivi de celui de la Fig.64 et enfin l'écran tout noir. Lorsque l'écran est tout noir, en complément la LED bleue est éteinte. La machine est alors en configuration "sombre" entièrement sombre, sauf si l'afficheur du régulateur de tension secondaire est validé. La page de la Fig.63 précise le nombre de cycles et le nombre de collisions qui ont été déclenchés depuis la mise sous tension de la machine ou

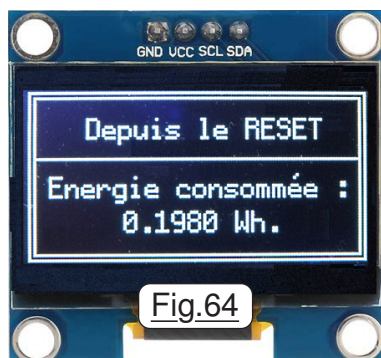


Fig.64

depuis le dernier RESET effectué manuellement avec le petit bouton de la carte Arduino NANO. Il ne faudra pas confondre avec l'information de la Fig.52

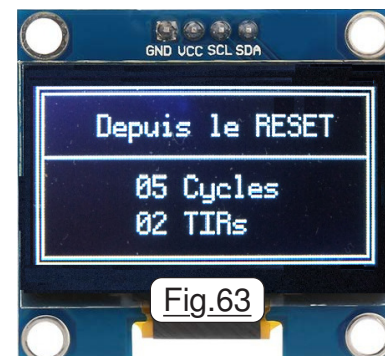


Fig.63

ou toutes les séquences sont cumulées jusqu'à ce que l'on valide éventuellement une RAZ en mémoire EEPROM. De façon analogue, la page de la Fig.64 indique l'énergie électrique qui a été consommée par la machine sur le secteur alternatif 220V depuis la mise sous tension de la machine ou depuis le dernier RESET. Notez au passage que si vous laissez la machine en attente avec affichage de cet écran, la valeur

augmente progressivement de 0.0011 Wh toutes les trois secondes car même en veille elle prélève sur le bloc alimentation une petite dose d'électricité. (Et oui, c'est le principe de Lavoisier !)

10) La machine simplifiée.

Lorsque la séquence complète pour générer un cycle avec collision a été au point, je me suis rendu compte, mais un peu tard, qu'au final le codeur rotatif, l'écran graphique OLED ainsi que le petit bruiteur ne sont pas du tout indispensables. Il suffit de cliquer sur le bouton poussoir TIR pour valider ou non le collisionneur. C'est la LED verte qui précise alors son état. Quand la LED bleue s'allume, on clique sur le bouton poussoir DEM. et on déclenche un cycle. Enfin quand la LED bleue s'éteint et que la rouge s'allume, c'est que la machine est en surchauffe et que le logiciel passe en pause pour attendre le refroidissement. Aussi je vous propose un programme d'exploitation prévu pour une machine simplifiée. Il n'y a strictement rien à changer au matériel et au câblage. Il suffit de ne pas souder le bruiteur et de ne pas brancher le codeur rotatif ni insérer l'afficheur OLED sur son support. Par la suite, vous pourrez toujours compléter la machine et téléverser les deux programmes P00_Initialiser_EEPROM.ino suivi après son activation par P09_EXPLOITATION_de_la_machine.ino. Le programme "du pauvre" se trouve donc dans la liste des dix démonstrateurs et est désigné par P10_Machine_MINIMALE.ino. Il suffit que ce logiciel soit téléversé sur la carte Arduino pour que la machine soit directement utilisable. Il n'y a pas, comme c'est impératif de le faire pour P09_EXPLOITATION_de_la_machine.ino d'inscrire en EEPROM les textes avec P00_Initialiser_EEPROM.ino du dossier <Outils du programmeur>. Notons au passage que le programme simplifié est compatible avec une machine complète, c'est à dire que s'il est utilisé avec un ensemble "de luxe", le matériel ne risque rien. Les éléments tels que le codeur rotatif, l'écran OLED ou le bruiteur sont tout simplement ignorés.

Comportement de la machine simplifiée.

- Le bouton poussoir TIR valide ou muselle le collisionneur. C'est la LED verte qui précise la valeur de la consigne. Si le TIR est validé, elle est allumée. Si elle est éteinte le collisionneur est suspendu.
- La LED bleue allumée signale que la machine est en attente d'une consigne opérateur.
- Le bouton poussoir Dem. déclenche une séquence d'accélération qui se termine par une collision si la LED verte est allumée.
- Si le bruiteur est branché sur la carte électronique, alors la séquence d'un cycle sur l'accélérateur de particule sera accompagnée d'un sifflement (Comme sur la machine complète.) dont la tonalité devient de plus en plus stridente, terminé également par un son relativement grave si une collision est consignée. Sur cette version le mode SILENCE n'est pas émulé on s'en doute.

11) Inscription des informations en mémoire non volatile EEPROM.

L'optimisation d'un programme passe par le logement en mémoire non volatile EEPROM des nombreux textes qui sont générés pour animer le dialogue Homme / Machine d'un ensemble géré par une carte Arduino. Si le système est relativement complexe, les messages textuels seront nombreux. L'un des moyens les plus efficace pour minimiser le code binaire généré par le compilateur C++ consiste quand c'est possible à ranger les chaînes de textes en EEPROM. Ce ne sera envisageable que si les données préservées en permanence sur l'ensemble laissent de la place. Dans notre cas les données à mémoriser sont négligeables :

- Energie totale consommée : Octet 1016 à 1019.
- Nombre de TIRs effectués : Octet 1020 et 1021.
- Nombre de cycles effectués : Octet 1022 et 1023.

Il est donc possible d'inscrire l'intégralité des textes affichés sur l'écran OLED en mémoire EEPROM. **ATTENTION : Le logiciel P09_EXPLOITATION_de_la_machin.ino fait appel à ces données.** Aussi, pour qu'il puisse se dérouler correctement et ne pas afficher des incohérences, il faut au préalable téléverser P00_Initialiser_EEPROM.ino et surtout l'activer. Cet outil force

```
PTR = 0 Effacer les
PTR = 11 valeurs
PTR = 18 en EEPROM :
PTR = 29 >>>
PTR = 33 OUI
PTR = 36 NON
PTR = 39 Mode MANUEL
PTR = 50 Inducteur à
PTR = 61 tester :
PTR = 70 Nb Cycles =
PTR = 82 Nb TIRs =
PTR = 92 PGM du
PTR = 99 Wh.
PTR = 103 EXPLOITATION
PTR = 115 Statistiques
PTR = 127 Mode MANUEL
PTR = 138 RAZ
PTR = 141 REFROIDISSEMENT
PTR = 156 ATTENTE de Dem.
PTR = 171 TIR validé
PTR = 181 : > TMP : / 119 <
PTR = 203 PW :
PTR = 208 Ce MENU :
PTR = 217 BPC : Sortie du mode.
PTR = 238 Rot : Change de page.
PTR = 259 Tir : Ignoré
PTR = 271 EXPLOITATION :
PTR = 285 BPC : Mode SILENCE.
PTR = 304 Rot : Pages
PTR = 316 écran.
PTR = 322 TIR : TIR > OUI NON.
PTR = 342 Dem : Dé
PTR = 350 bute cycle.
PTR = 361 MENU de BASE :
PTR = 375 BPC : Ouvre l'option.
PTR = 396 Sortie par le BPC
PTR = 413 Rot : Indexe option.
PTR = 433 TIR & Dem : Ignorés.
PTR = 453 Depuis le RESET
PTR = 468 Cycles
PTR = 475 TIRs
PTR = 480 SILENCE :
PTR = 491 Energie consommée
PTR = 508 Cycle en cours.
```

Fig.65

ADRS	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	0A	0B	0C	0D	0E	0F
0000	E	f	f	a	c	e	r									
0016	r	s	e	n		E	E	P	R	O	M	:	>	>	>	
0032		O	U	I	N	O	N		M	o	d	e		M	A	N
0048	E	L		I	n	d	u	c	t	e	u	r		à		t
0064	s	t	e	r	:		N	b		C	y	c	l	e	s	
0080	=		N	b		T	I	R	s	=			R	e	v	
0096	P	G	M			d	u		E	X	P	L	O	I	T	A
0112	I	O	N		S	t	a	t	i	s	t	i	q	u	e	s
0128	o	d	e		M	A	N	U	E	L		R	A	Z		R
0144	R	O	I	D	I	S	S	E	M	E	N	T	A	T	T	E
0160	N	T	E		d	e		D	e	m	.	T	I	R		v
0176	a	l	i	d	é	:			>		T	M	P	:		
0192					/		1	1	9		<	P	W	:		
0208	C	e		M	E	N	U	:		B	P	C	:		S	
0224	o	r	t	i	e		d	u		m	o	d	e	.	R	o
0240	t	:		C	h	a	n	g	e		d	e		p	a	
0256	g	e	.	T	I	R	:		I	g	n	o	r	é	E	
0272	X	P	L	O	I	T	A	T	I	O	N	:		B	P	C
0288	:		M	o	d	e		S	I	L	E	N	C	E	.	
0304	R	o	t	:		P	a	g	e	s		é	c	r	a	
0320	n	.	T	I	R	:		T	I	R		>		O	U	
0336	I		N	O	N	.		D	e	m	:		D	é	b	u
0352	t	e		c	y	c	l	e	.	M	E	N	U		d	e
0368	B	A	S	E	:		B	P	C	:		O	u	v		
0384	r	e		l	'	o	p	t	i	o	n	.		S	o	r
0400	i	e		p	a	r		l	e		B	P	C		R	o
0416	:		I	n	d	e	x	e		o	p	t	i	o	n	
0432	.	T	I	R		&		D	e	m	:		I	g	n	
0448	o	r	é	s	.		D	e	p	u	i	s		l	e	R
0464	E	S	E	T		C	y	c	l	e	s		T	I	R	s
0480	S	I	L	E	N	C	E	:		E	n	e	r	g		
0496	i	e		c	o	n	s	o	m	m	é	e	C	y	c	l
0512	e		e	n		c	o	u	r	s

Fig.66

toute la zone EEPROM à zéro, les données numériques listées en bleu ci-avant seront donc annulées à ce stade de l'élaboration de la machine. La Fig.65 reprend une partie de l'affichage qui s'effectue sur le Moniteur de l'IDE lorsque le programme d'écriture des textes est validé. Dans le dossier <Outils du programmeur> est mis à votre disposition le logiciel Lister_EEPROM_en_texte.ino qui présente en Fig.66 le contenu EEPROM sous la forme d'un tableau.

12) Présentation de la carte Arduino NANO.

Oups ... mais j'ai complètement oublié de vous présenter la vedette principale du film ! je fais allusion ici à la minuscule carte Arduino NANO. Présentée sur la Fig.67 cette petite chose peut remplacer totalement une carte UNO tout en étant vraiment très petite. On la trouve à des tarifs très variables dans le commerce en ligne, mais des clones dont le fonctionnement est sans reproche sont disponibles pour quelques Euros port compris. Par exemple j'ai commandé un groupe de cinq sur :

https://www.amazon.fr/gp/product/B078S8BJ8T/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o01_s00?ie=UTF8&psc=1

Naturellement il n'est pas du tout obligatoire d'en approvisionner cinq d'un coup, mais comme j'en utilise souvent sur de multiples petites applications, j'ai pris de l'avance !

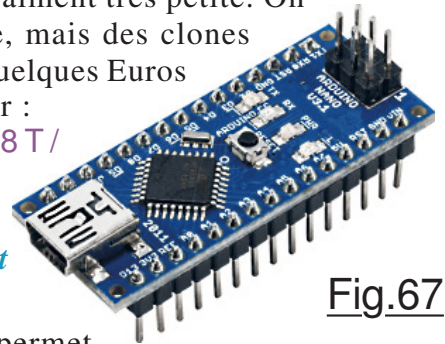


Fig.67

À ce coût elle est moins onéreuse qu'un ATmega328 seul, et permet vraiment d'effectuer tout ce que l'on peut traiter avec une platine Arduino UNO. Des recherches sur la toile préviennent que des clones de cette carte issus de Chine ne sont pas compatibles pour dialoguer avec l'IDE. Ce point s'est avéré exacts mais sur d'autres sources. Les cartes *dont l'adresse est précisée ci-dessus* ont fonctionné sans problème dès leur premier téléchargement. (Quand je réceptionne de tels composants, immédiatement pour les valider je transfère un petit programme outil qui fait clignoter à 10Hz la LED en sortie 13.)

Alors, vu le prix d'achat de cette toute petite carte, qui est plus que compatible avec une Arduino UNO, franchement, si ce n'est pas pour enficher en gigogne sur un quelconque SHIELD, à mon sens il ne faut pas hésiter. Les cinq exemplaires commandés ont fonctionné parfaitement et ont été livrés très rapidement. Que désirer de plus ?

Particularités de la carte NANO :

- Elle présente deux entrées analogiques **A6** et **A7** en plus des six de la carte UNO. Ces broches référencées 20 et 21 ne peuvent servir qu'en entrée et ne possèdent pas de résistance PUL-UP.
- L'entrée **VIN** peut servir à alimenter la carte qui intègre un régulateur 5Vcc. La tension peut aller de +6V à +20V sur cette broche. (Le négatif étant branché sur **GND**.)



ATTENTION : Pas de VIN simultanément avec la liaison Mini-USB de programmation ou le régulateur de la carte NANO sera détruit !



NOTE IMPORTANTE : *Tout programme développé pour cette carte qui utilise les deux entrées analogiques **A6** et **A7** ne sera plus compatible avec les cartes UNO qui ne les possèdent pas et c'est le cas de l'application de ce petit projet ludique.*

➤ Composants spécifiques.

Spécifié dans le didacticiel, le logiciel d'exploitation prévoit l'usage d'un petit bruiteur de type passif. À toute fin utile, je vous livre l'adresse où j'ai approvisionné ce type de composant. (Vous remarquerez qu'il est difficile de trouver des adresses où on ne livre qu'un seul composant ... et c'est souvent plus coûteux.) :

ATTENTION : Cette référence correspond à des composants polarisés dont la Fig.68 en **B** précise la broche positive, l'autre devant aller sur **GND**. Notons au passage que *ce composant passif ne respecte pas l'écartement standard au dixième de pouce*, il faudra "finasser" un peu au moment de réaliser le circuit imprimé.

https://www.amazon.fr/gp/product/B01KO3MD4S/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o04_s00?ie=UTF8&psc=1

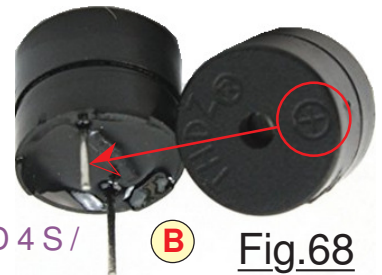


Fig.68

Pour les résistances et les LEDs il y a tellement de sources sur les étagères du commerce en ligne, qu'il me semble inutile de préciser ici mes sources d'approvisionnement. Il est probable que le rendement de vos diodes électroluminescentes ne sera pas équivalent à celui de mon prototype. Aussi, avant de souder la résistance de limitation de courant je vous suggère fortement de faire un essai préalable pour sélectionner la valeur idoine.

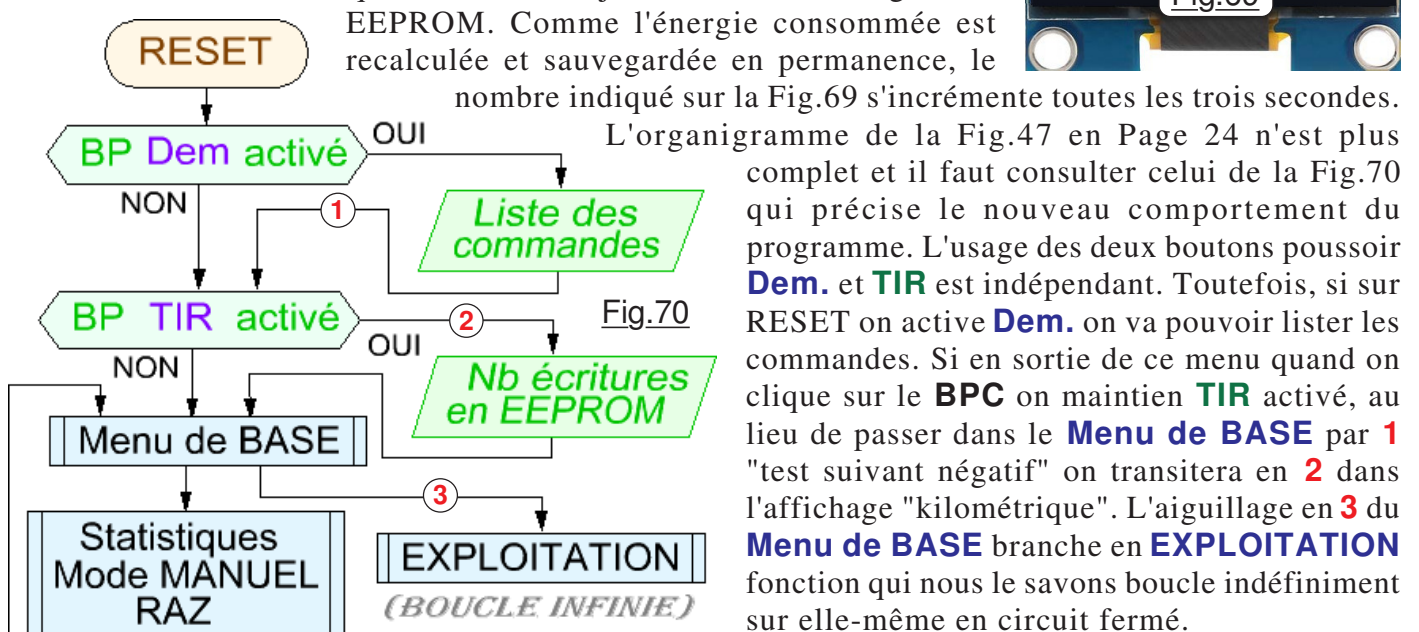
13) L'usure de la mémoire non volatile EEPROM.

Dernière minute pourrait s'intituler *ce chapitre* qui *ne concerne véritablement que les programmeurs sur Arduino*. Il ne faut pas confondre mémoire vive, (RAM) et mémoire EEPROM. La mémoire vive peut être écrite et lue à l'infini sans subir de dégradation. Ce n'est pas tout à fait le cas avec la mémoire non volatile EEPROM. On peut la lire à l'infini, comme pour la RAM, mais par contre le nombre de cycles d'écriture est limité. Les concepteurs de circuit intégrés garantissent environ 100000 écritures. Ensuite la mémoire ne sera plus considérée comme fiable. Une valeur aussi élevée peut sembler colossale, alors pourquoi aborder ce chapitre ?

Dès que notre Cyclotron collisionneur est sous tension, notamment en attente d'une commande de l'opérateur, toutes les trois secondes l'énergie électrique consommée est mise à jour et sa valeur est inscrite dans quatre octets EEPROM. Donc, un simple calcul montre que l'on aura atteint le seuil critique de 100000 écritures en 300000 secondes soit environ 83 heures. Ce n'est pas une valeur aussi gigantesque que ça, surtout si l'on laisse la machine en attente sur de longues périodes.

➤ **Le compteur kilométrique.**

C'est bien parce qu'il reste beaucoup de place en mémoire de programme que je me suis amusé à ajouter la fonction de surveillance de l'usure de l'EEPROM. N'oublions pas que le but de ce projet est purement ludique, la programmation d'Arduino participant au charme. Profitant de cette abondance, chaque échantillonnage toutes les trois secondes mettant à jour la quantité d'énergie absorbée sur le secteur alternatif donne lieu à une écriture en EEPROM. Non précisé en Page 28 la consommation de 0.0011 Wh toutes les trois secondes est ajoutée durant tous les écrans en attente d'une commande opérateur y compris en MANUEL. Toutes ces écritures ainsi que celles durant l'activation des cycles d'accélération sont comptabilisés. L'écran de la Fig.69 indique le nombre total de fois que sont mises à jours les données logées en



Quelle sera la conduite à tenir si laissant trop souvent notre machine en attente, la valeur fatidique atteint les 100000 considérés comme critiques ? La réponse à cette question existentielle est facile : Il suffit de déplacer la zone des données en EEPROM pour pointer des *cellules inutilisées qui de ce fait conservent intégralement leur potentiel*. Dans ce but on passera en revue toutes les instructions de type `eeeprom_read_word(...)`, `eeeprom_read_float(...)`, `eeeprom_read_dword(...)`, `eeeprom_write_float(...)` etc en changeant les valeurs des pointeurs comme proposé en exemple ci-dessous :

- Les octet 1012 à 1015 sont déplacés en 1000 à 1003.
- Les octet 1016 à 1019 sont déplacés en 1004 à 1007.
- Les octet 1020 et 1021 sont déplacés en 1008 et 1009.
- Les octet 1022 et 1023 sont déplacés en 1010 et 1011.

14) La réalisation des petits manuels.

Faisant partie intégrante de mes didacticiels, généralement des petits livrets accompagnent le tutoriel. Dans ces livrets au format A5 on trouve souvent le manuel d'utilisation du projet, un autre document sur l'agencement du logiciel etc. Par exemple, pour ce projet de Machine de Turing Autonome, le programme utilise un afficheur dont la bibliothèque fournie met à disposition des protocoles très performants. Encore faut-il pouvoir les mettre en œuvre correctement. Pour celles et ceux qui chercheront à appréhender le logiciel qui anime la machine, le petit livret décrivant **U8glib** me semble indispensable. Que ce soit pour un livret informatique ou un manuel d'utilisation du prototype, dans tous les cas il importe de s'y prendre correctement pour imprimer et assembler le petit.

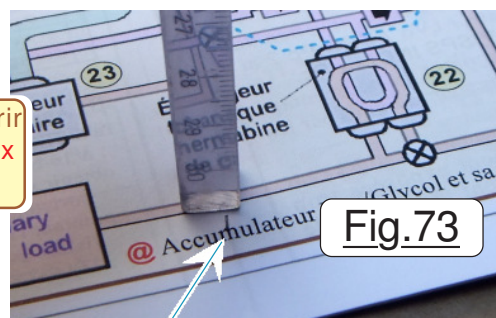
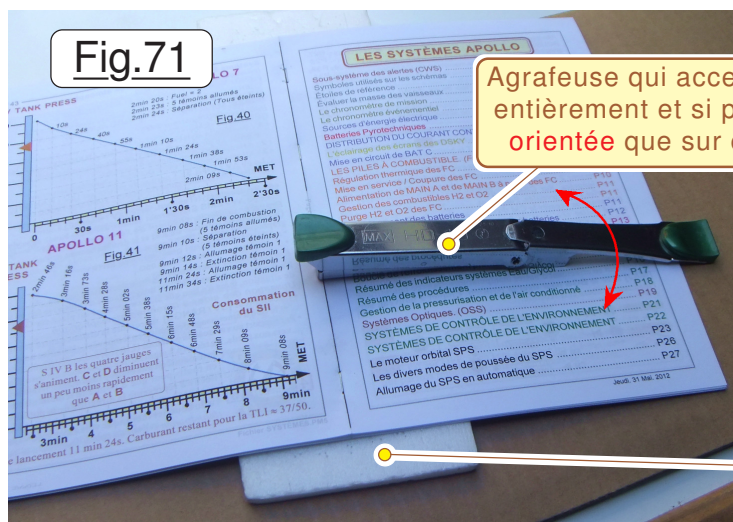
➤ Réalisation matérielle d'un petit livret au format A5.

Agencé à un format A5, les faibles dimensions de ce manuel en font un document parfaitement adapté à son usage. Pas trop petit, les dessins et schémas sont de dimensions suffisantes, pas trop gros, il trouve facilement sa place dans un tiroir de rangement. Les fichiers tels que **Bibliothèque U8glib.pdf**, **NOTICE.pdf** sont prévus pour être imprimés RECTO/VERSO. Il importe donc de choisir du papier d'épaisseur "normale" pour ne pas que l'encre ne traverse. **Papier recyclé méga écolo** s'abstenir ! Personnellement je commence par imprimer toutes les pages impaires. Puis, paquet de feuilles replacé sur le bac à papier de la machine **CORRECTEMENT ORIENTÉ ET DANS LE BON ORDRE** je fais imprimer toutes les pages paires. Pour cette phase il me semble moins risqué d'opérer page par page, et vérifier à chaque tentative que deux A4 n'ont pas été "aspirés" par le mécanisme qui tracte les feuilles sous les têtes d'impression. Vous ne perdrez ainsi qu'une seule épreuve, alors que si vous engagez l'opération pour toutes les feuilles ... c'est tout le paquet qu'il faudra entièrement réimprimer. Bien réfléchir quand on replace le paquet dans le bac de la machine, car les pièges sont nombreux. (*Inverser le haut et le bas, face sur le dessus qui n'est pas la bonne, pages entassées dans l'ordre incorrect ...*)

Éventuellement tester avec une feuille brouillon en mode économique noir et blanc. Puis, quand tout est imprimé, réaliser l'assemblage est relativement élémentaire :

- 1) Commencez par plier toutes les pages en deux. (*Et si possible du bon coté !*)
- 2) Trouvez une plaque de polystyrène ou du carton bien classique. (*Voir Fig.71*)
- 3) Positionnez les pages bien à plat et surtout bien les unes cadrées sur les autres.
- 4) Avec une petite agrafeuse qui accepte de s'ouvrir complètement mettre en place quatre "crochets".

ATTENTION : Quand on appuie sur l'agrafeuse il faut bien la tenir latéralement car elle veut se décaler sur les cotés. Du coup comme montré en Fig.72 l'agrafe est mal enfoncée et se plie. Quand une agrafe s'est tordue, la retirer avec un cutter et en placer une deuxième exactement au même endroit. Le deuxième essai sera le bon ...



- 5) Retourner le livret **sur un support rigide** et fermer les agrafes à la main avec un outil quelconque. Dans mon cas j'utilise une règle de section carrée comme montré sur la Fig.73 sur laquelle à peine visible on voit un coté de l'agrafe non encore replié.

Notez que pour vous faciliter la tâche les pages sont numérotées verticalement au centre pour repérer plus facilement l'ordre d'assemblage. Gutembérisez bien les amis ...

15) En termes de conclusion.

An'en pas douter, cette réalisation arrivée à son terme ne bouleversera pas notre vie de tous les jours. Difficile de prétendre en outre qu'elle s'avère indispensable dans le cadre de nos loisirs, c'est pratiquement l'inverse. Quand on se sera fait plaisir à la faire fonctionner dans diverses conditions, on finira par la ranger précieusement au fond de l'étagère la plus haute dans l'armoire des "plaisirs oubliés". Avant de poursuivre cette petite élucubration d'adieu, il me semble très important de souligner le fait que la bobine de fil émaillé de la Fig.5 qui contient 1kg de cuivre est un très très mauvais choix. En effet, elle intègre 850m de fil alors que nous allons n'en utiliser au maximum qu'environ 324. (36m x 9) Vous trouverez facilement dans le commerce en ligne des fournisseurs qui proposent des références bien plus raisonnables.

Posséder cette superbe merveille de technologie du futur n'est absolument pas le but de ce projet. Le vrai bénéfice réside dans le chemin parcouru pour arriver à la faire fonctionner. En particulier, cette route ludique nous aura fait côtoyer le domaine de l'électromagnétisme, avec pour corolaire le concept des Ampères-tours. On a pris conscience de l'importance d'installer une diode "de roue-libre" pour éviter les surtensions qui se produisent à la coupure d'alimentation d'une inductance. On a surtout appris à utiliser un circuit Darlington pour faire une interface qui potentiellement pourrait commuter facilement 8A à partir du pilotage d'une petite sortie binaire d'ARDUINO. Enfin le programme d'utilisation met en œuvre un afficheur graphique, un codeur rotatif, un bruiteur passif etc. En compilant le programme [P09_EXPLOITATION_de_la_machine.ino](#) on constate que seulement 18192 octets soit à peine 59% de l'espace disponible pour logger les instructions est consommé. C'est vraiment peu. Pour ma part, un "vrai programme" va encombrer jusqu'à 99% des emplacements, voir plus ! Du coup, logger les textes en EEPROM n'aurait pas du tout été nécessaire. Si j'ai opté pour cette approche un peu plus technique, c'est uniquement pour vous la présenter et ainsi consolider vos acquis en langage C++. Bref, si l'ensemble par lui-même ne chamboulera pas notre laboratoire et notre collection de petites machines ludiques, en conduire l'étude et la mise au point restera une pure et très enrichissante expérience. Que souhaiter de plus ?

Les regrets.

C'est par pure tradition que je termine mes tutoriels par ce genre de rubrique et qu'il fallait bien trouver quelque chose à regretter ou à critiquer. L'ensemble est cohérent et compact. Il fonctionne globalement assez bien. Toutefois, si c'était à refaire, je m'orienterais vers une solution telle que celle suggérée en Fig.46 de la Page 24, c'est à dire asservir la cadence d'accélération en détectant la position de la bille dans le tore de guidage. Alors si le cœur vous en dit et que l'aventure vous tente ... pourquoi pas ?

Chères lectrices, chers lecteurs, cette longue présentation arrive à son terme. Tout à une fin, mis à part l'Univers, et arrive forcément un moment où il faut raisonnablement considérer que "le voyage d'agrément" est terminé.

Je souhaite intensément que certaines et certains oseront s'engager dans la réalisation d'un clone, je ne doute pas de leur réussite. Surtout, je vous souhaite à toutes et à tous de trouver dans ces lignes le plaisir de la découverte. Si d'aventure vous engagez vos heures de liberté dans une telle réalisation et que vous rencontriez une difficulté, les amis du forum pourront probablement vous aider. Dans le pire des cas, vous pouvez me contacter sur : michel.droui@laposte.net et dans les limites de mon temps de libre, c'est avec grand plaisir que je tenterai de vous dépanner. Je vous souhaite à toutes et à tous agréable lecture et que ces machines fantastiques du SERN puissent vous faire rêver ...

Chaleureusement : Nulentout.

