

Réaliser entièrement un bras manipulateur expérimental

Par Nulentout : Jeudi 12 Décembre 2019.

Révolution qui passe complètement inaperçue du public, les imprimantes 3D changent radicalement le monde du bricolage, et en particulier celui des loisirs. Bien que cette technologie n'en soit encore qu'à ces balbutiements, tout au moins pour les machines non professionnelles, l'éventail des possibilités qu'elles offrent est vertigineux. Pouvoir "si facilement" créer n'importe quelle petite pièce mécanique sans posséder une seule machine d'usinage est enthousiasmant au possible. Vous imaginez dans le monde de la petite robotique ludique le parti que l'on peut tirer de telles machines. Heureux sont les possesseurs privilégiés d'une telle imprimante 3D ouvrant à 360° le champ des applications envisageables.

Ayant osé franchir le pas, j'ai donc craqué pour une **Micro Delta Rework** acquise en KIT à assembler soi-même. Outre une différence de prix significative par rapport à ce produit entièrement monté, fédérer tous ces éléments pour aboutir à une machine complète est particulièrement agréable et pas vraiment compliqué. Bien que le volume des pièces possible reste relativement discret, c'est l'une des machines Qualité/Prix est le meilleur sur le marché. Reste à la mettre en œuvre, démentiel, l'entreprise n'est pas anodine non plus. Naturellement, il serait possible de se contenter d'imprimer des objets dont les modèles sont directement disponibles sur la toile. Forcément on est tenté de commencer par là, ne serait-ce que pour arriver à se convaincre que notre machine fonctionne très bien. Ceci dit, *le vrai bénéfice de cette technologie réside dans l'aptitude à créer ses propres modèles ... c'est autrement plus délicat !*

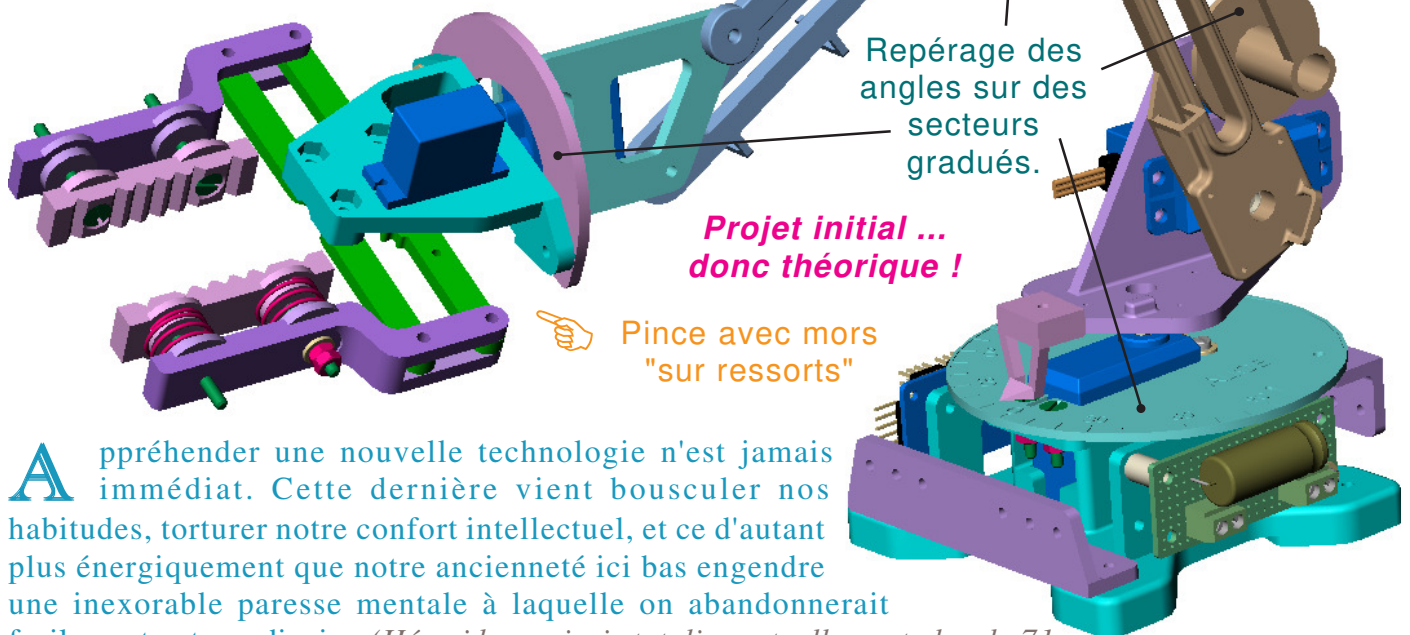


Fig.1

Appréhender une nouvelle technologie n'est jamais immédiat. Cette dernière vient bousculer nos habitudes, torturer notre confort intellectuel, et ce d'autant plus énergiquement que notre ancienneté ici bas engendre une inexorable paresse mentale à laquelle on abandonnerait facilement notre ordinaire. (*Hé oui les amis, je totalise actuellement plus de 71 printemps, à cet âge le cerveau commence à accuser une certaine tendance à l'hystérésis !*) La première approche qui semble la meilleure consiste à se gaver d'informations glanées sur Internet. Puis passer à l'action en testant avec des pièces simples et voir ce que ça donne sur la machine. Cette méthode n'est pas vraiment efficace, car *elle masque une réalité complexe à*

laquelle on sera forcément confronté dès que l'on va vouloir créer des ensembles "utiles". Aussi, la meilleure façon d'appréhender une technologie, c'est de *foncer tête baissée* dès que l'on a saisi les grandes lignes de cette dernière, *dans un vrai projet*. C'est une voie incontestablement difficile. Je suis toutefois convaincu que c'est la plus formatrice de toutes, car elle oblige à des efforts considérables, qui sont d'autant plus consentis avec docilité, que l'idée d'aboutir à une réalisation séduisante motive intensément et évite de ce fait un abandon prématuré dès que l'on commence à se heurter "au réel". Aussi, il me restait à m'engager dans un vrai projet, avec de la mécanique, (*Plein plein plein puisque le but réside dans la réalisation des pièces mécaniques qui le composent.*) de l'électronique et de l'informatique à base d'Arduino. Les ingrédients étant listés, il restait à trouver une application robotique pour réunir cette "trilogie" dans une recette bricoludique appropriée.

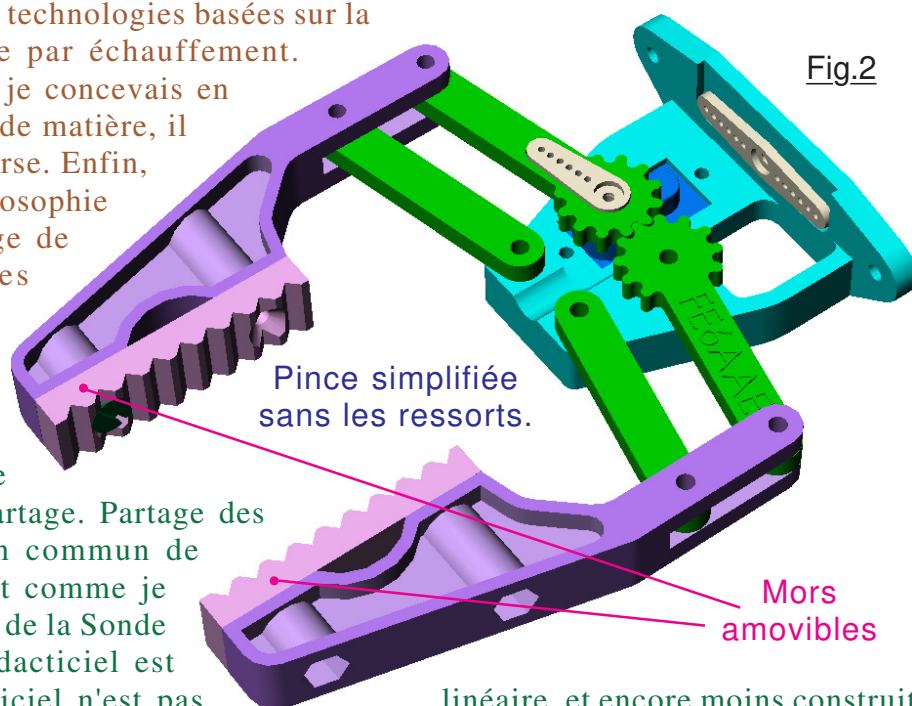
Pourquoi un bras manipulateur de plus, alors que des ensembles disponibles pour l'impression 3D sont presque légion sur Internet ? Plusieurs raisons ont motivé ce choix. Désirant "depuis toujours" posséder un petit bras manipulateur, l'idée d'en concevoir un personnel dont les pièces seraient imprimées s'est imposée de façon presque naturelle. Il m'aurait été relativement facile de concevoir un appareil à base de pièces en métal, travaillant ce matériau sans difficulté particulière. Passer à une technologie "moulée" impose des contraintes particulières liées aux imprimantes 3D. Aussi, concevoir entièrement une telle petite machinerie remplit à merveille l'objectif de la découverte des spécificités que présentent les technologies basées sur la dépose d'un fil rendu malléable par échauffement.

Contrairement aux éléments que je concevais en vue d'un usinage par enlèvement de matière, il faut maintenant raisonner à l'inverse. Enfin, un bras manipulateur est par philosophie une machine robotisée, qui exige de l'électronique pour piloter les moteurs et de l'informatique pour générer les mouvements. *C'est dit, nous avons les ingrédients, il ne reste plus qu'à cuisiner ...*

Fondamentalement, le but de ce didacticiel réside dans le partage. Partage des difficultés rencontrées, mise en commun de l'expérience acquise. Exactement comme je l'avais proposé pour la réalisation de la Sonde Martienne JEKERT dont le didacticiel est disponible sur ce site, ce didacticiel n'est pas

lorsque tout est terminé et que les solutions ont fait leurs preuves. Au contraire, les chapitres sont renseignés au fur et à mesure du développement, avec pour conséquences la rencontre d'écueils qui imposent des changements de stratégie et remettent en cause les solutions déjà "débroussaillées". C'est donc une approche expérimentale que j'engage dans ces pages, conduite au fur et à mesure que je tente des manipulations, et essais après essais cherche à aboutir à un ensemble cohérent. Il y aura forcément des remises en cause. C'est parti pour l'aventure et les embrouilles ...

Comme pour tous mes didacticiels, je vous fournis l'intégralité des éléments dont vous pouvez avoir besoin si la tentation est grande et que vous décidez de franchir le pas. Bien entendu ce "KIT" contient le didacticiel, toutes les explications indispensables, les photographies et les dessins utiles et surtout les fichiers informatiques pour la carte Arduino et on s'en doute ... les fichiers indispensables pour créer les pièces sur une imprimante 3D. Rassurez-vous, quelle que soit l'imprimante dont vous avez l'usage, les fichiers de type **STL** seront compatibles, il y a belle lurette que des *formats* se sont *standardisés*. Pour que vous puissiez avec certitude aboutir, je propose deux variantes pour la pince. Sur la Fig.1 la machine n'existe encore que dans la mémoire électronique d'un logiciel de dessin 3D. La pince dispose de ressorts pour des raisons exposées plus avant. Il se trouve que je pratique la récupération à outrance et le recyclage permanent. Les quatre ressorts sont particuliers, puisque issus d'un appareil quelconque qui allait à la casse.



D'un diamètre particulier, d'une raideur spécifique, rien ne prouve qu'il vous soit possible d'en trouver dans le commerce. Aussi, le projet est complété d'une variante montrée sur la Fig.2 dont la pince présente des doigts rigides. Notez au passage que pour rendre cette variante plus polyvalente, si vous enlevez des deux **Mors**, la pince devient plus large et surtout peut saisir au centre des objets de forme cylindriques.



Hé Totoche, il serait un peu temps de passer au vif du sujet car avec ton préambule qui n'en finit pas comme une PUB télévisée, tu vas finir par lasser les lectrice et les lecteurs !

- Oups ! Elle a raison la petite salamandre, passons immédiatement au tutoriel !

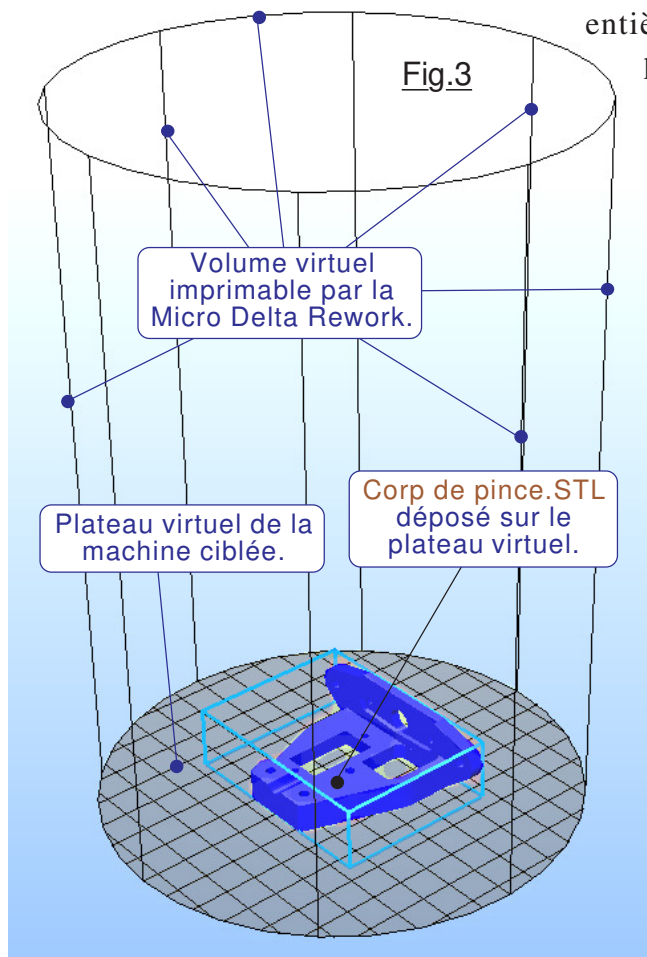
1) Les étapes d'une réalisation par impression 3D.

Évidemment, tout ce qui suit suppose que vous disposiez par un moyen ou par un autre de la possibilité de mettre en œuvre une imprimante 3D qui sera chargée de "mouler" les pièces mécanique de la machinerie envisagée. La première phase consiste à concrétiser sur du papier la merveille qui a germé dans votre cerveau. Vous griffonnez quelques croquis, les modifiez, les améliorez, gomez, balancez à la poubelle le total car ce n'est pas bon du tout. On recommence, et arrive un moment où les "crobars" ressemblent à "du réalisable". C'est à partir de cette phase initiale, que vos idées doivent passer de votre mental aux mémoires électroniques de nos machines informatiques. Autrement dit, il faut **créer des pièces volumiques virtuelles** (Nommée aussi *Maquettes.*) en utilisant un logiciel dédié quelconque. Il en existe plusieurs gratuits sur Internet fournissant vos "**volumes virtuels**" sous forme de fichier de type **STL**. Ce sont ces fichiers qui définissent les formes et les dimensions des pièces à créer. Par exemple les Fig.1 et Fig.2 sont des assemblages de pièces volumiques virtuelles créées et visualisées avec un tel logiciel de conception assistée par ordinateur. C'est à partir de ce logiciel que sont générés les fichiers des pièces individuelles au format STL. Puis la pièce à obtenir étant

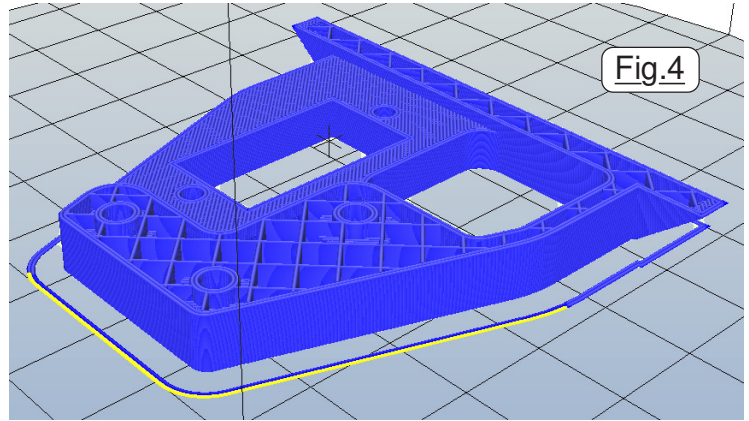
entièrement déterminée, il faut la soumettre à un autre

programme qui sera chargé de la placer dans le volume virtuel de l'imprimante que vous utilisez. Par exemple sur la Fig.3 le volume de la machine est cylindrique, car il s'agit de représenter celui de la **Micro Delta Rework**. Sur le plateau virtuel est déposé le **Corps de pince.STL** qui sera "moulé" par la machine. J'utilise personnellement un grand classique, (*Gratuit également sur Internet.*) nommé **Repetier-Host** parfaitement adapté aux débutants. Dans un tel programme, quand on charge un fichier de type STL, on voit la pièce créée dans le "concepteur 3D" miraculeusement se poser sur le plateau de l'imprimante 3D virtuelle.

Il n'est pas question de vous apprendre à maîtriser ces divers programmes, de nombreuses vidéos sont disponibles en ligne. **On se contentera du minimum pour que vous puissiez imprimer les divers éléments mécaniques.** J'insisterai surtout sur les particularités de conception, d'orientation des pièces sur la machine virtuelle, les ajustements conseillés. (*Attention : Je ne suis surtout pas un spécialiste de l'impression 3D ... puisque je découvre ! Je n'ai à ce jour imprimé qu'une seule pièce. Les paramètres que je proposerais seront ceux qui sur ma machine auront donné de bons résultats ...*)



Lorsque la pièce à imprimer est déposée sur la machine virtuelle dont on ne symbolise que le volume "imprimable", il reste encore à définir les innombrables déplacements que devra effectuer *la buse d'extrusion* pour, déposer après déposer, finir par obtenir un volume. Cette opération d'une complexité phénoménale est nommée *Le Tranchage*. Heureusement pour nous, des programmes spécifiques sont associés à *Repetier-Host* pour réaliser cette analyse "démentielle" et générer un code spécial de type **gcode**, ou éventuellement **gco** qui sera téléchargé sur l'imprimante. Les fichiers de type **gcode** existent depuis l'avènement des machines numériques pour l'usinage industriel. *Ils définissent globalement les déplacements que doivent faire les outils*. Les imprimantes 3D étant par nature des machines à commandes numériques, il est normal qu'elles utilisent des formats analogues. *(Avec des spécificités comme les températures des buses par exemple.)* Pratiquement "natif" dans des logiciels tels que *Repetier-Host*, on dispose généralement de plusieurs trancheurs. Par exemple avec *Repetier-Host*, on peut utiliser *CuraEngine*, *Slic3r* ou *Skeinforge*. Sur la Fig.4 vous pouvez vous faire une vague idée de ce qu'affiche le programme *Repetier-Host* lorsque le *Corps de pince.STL* a été tranché avec *CuraEngine*. Sur cette copie d'écran, on ne visualise pas toute la hauteur de la pièce pour voir "ce qui se passe à l'intérieur". Vous vous doutez que *le trancheur autorise une foule de manipulations et apporte une kyrielle de renseignements* qu'il n'est pas question ici de développer. Lorsque l'opération de tranchage révèle une pièce qui semble viable, il ne reste plus qu'à l'imprimer. Le trancheur permet alors de transformer le résultat de son analyse en un fichier de type **gcode** directement compatible avec l'imprimante 3D réelle qui a été préalablement déclarée au logiciel. C'est ce fichier qui sera soumis à la machine thermique pour réaliser la pièce.



➤ **Résumé du processus de création mécanique par dépôt de matière.**

- 1) Développement global du projet et de son architecture mécanique.
- 2) Dessin détaillé de la pièce en tenant compte des contraintes de fabrication. *(C'est toujours vrai. Quel que soit le procédé envisagé pour créer une pièce mécanique, que ce soit par enlèvement de matière ou par dépôt du matériau constitutif, chaque approche présente des facilités et des interdits dont le concepteur doit impérativement tenir compte. Nous verrons plus avant dans le tutoriel le cas particulier des pièces générées par des extrudeuses 3D.)*
- 3) Activer un logiciel qui acceptant les fichiers de type **STL** permet de déposer la pièce virtuelle issue d'un programme de conception mécanique assistée par ordinateur sur le plateau d'une imprimante 3D également virtuelle. Pour que cette opération soit possible, il importe que ce programme puisse connaître les caractéristiques fonctionnelles de l'imprimante 3D servant de "cible".
- 4) Lorsque la pièce virtuelle est orientée et placée comme le souhaite l'opérateur dans le volume opérationnel de la machine physique, le logiciel sait exactement où se situent "toutes **les molécules**" du volume occupé par l'élément à produire. À partir de ces informations il faut :
- 5) Activer un **Trancheur** qui va déterminer l'intégralité des déplacements que devra effectuer la buse d'extrusion pour *déposer couche par couche les molécules constitutives de l'objet réel*, ainsi que les déplacements sans déposer de matière. *(Nous verrons plus avant que le trancheur doit également soutenir les "voutes" pour lesquelles le vide laisserait "pleuvoir" le matériau rendu malléable par chauffage.)* Le **Trancheur** génère alors un fichier de type **gcode** qui décrit dans un langage spécifique dédié aux machines à commandes numériques ces informations de genèse.
- 6) Par un moyen quelconque, téléchargement par liaison USB avec la machine ou transfert du fichier de type **gcode** avec une carte mémoire du genre SD RAM, on soumet à l'imprimante les instructions contenues dans les informations binaires du code **gcode**. On déclenche le processus et la technologie fait le reste. *C'est durant cette phase que l'on va découvrir les problèmes de conception "du point de vue du moulage", et lors de l'assemblage que vont ressortir les erreurs de conception. En ce qui vous concerne, ces défauts sont filtrés et éliminés ...*

2) Choix cinématiques et l'architecture structurelle du bras manipulateur.

Inspirés de la morphologie du corps humain, on retrouve sur ces "copies" mécaniques des similitudes dont sont dérivés certains vocables pour en désigner divers éléments tels que le coude, l'épaule etc. On se doute qu'un bras manipulateur mécanique sera infiniment moins performant que sa source d'inspiration biologique. Toutefois, ce qui caractérise le plus un équivalent industriel, outre la puissance, les masses manipulables et la portée des déplacements, c'est **le degré de mobilité** du membre mécanisé. On se doute que multiplier les articulations va offrir plus de souplesse dans la gestuelle de la machine, avec pour conséquences plus de complexité mécanique et informatique.

Comme nous restons dans le domaine de l'expérimentation ludique, initialement on a décidé de se contenter, comme précisé sur la Fig.5 d'un degré de mobilité de cinq, les mouvements générés étant tous des rotations. En **1** la HANCHE fait tourner l'ensemble autour d'un axe vertical. Pour gérer la hauteur de la PINCE, on motorise l'ÉPAULE et le COUDE respectivement par les rotations **2** et **3**. Outre le serrage de la pince **5**, la mobilité est complétée par la torsion du POIGNET en **4**. L'architecture globale n'a rien de très original. Faisant appel à des "pantographes", les deux rotations en hauteur **2** et **3** maintiennent l'inclinaison de la pince dans l'espace. Ce projet résolument modeste n'est qu'un prétexte à étudier et "mouler" des pièces spécifiques. Et bien en l'état il n'est pas viable ...

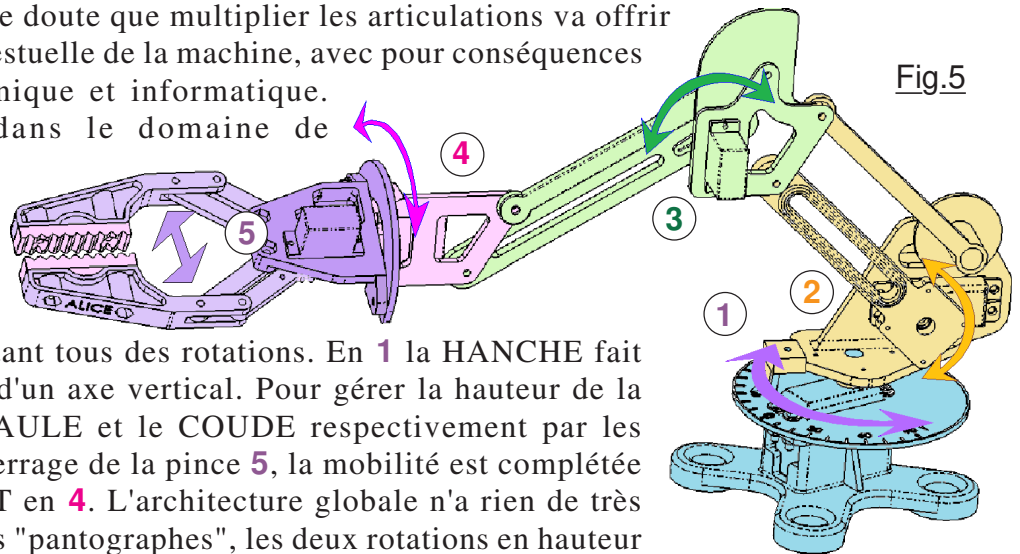


Fig.5

➤ **Réalisation des pièces.**

Dès les premières pièces imprimées, ce fut l'enchantement. Les éléments étaient à la limite du parfait, et pouvoir ainsi élaborer des formes "quelconques" ouvre des horizons sans limite. Le dossier <Images> contient une kyrielle de photographies saisies à divers stades de la réalisation. Observez [Image01.JPG](#) qui présente le statif. Difficile d'imaginer que cette pièce a été "tricotée". Pour son compte, [Image02.JPG](#) montre le corps du poignet, pièce également parfaite. (*Domage car elle ne sera pas utilisée !*) Sur [Image03.JPG](#) les trous "fraisés" à 45° sont également sans défaut. Éventuellement il faudrait augmenter de 0,1mm la hauteur des graduations, bien qu'en l'état elles sont tout à fait acceptables. Quand à [Image04.JPG](#), on peut vérifier que la lettre latérale qui a été imprimée verticalement est également parfaite. En revanche, sur [Image05.JPG](#), imprimé en bleu foncé le statif est mauvais. Adhérent fortement au plateau, les premières couches se sont décollées lors de l'extraction de la pièce. Manifestement les premières couches ne sont pas assez soudées. Même punition sur [Image06.JPG](#), l'épaule était mauvaise. Ce n'est pas la conception des pièces qui est en cause. Dans la pratique, bien que pour toutes les pièces le matériau utilisé est du PLA PREMIUM, le filament ne présente pas des caractéristiques identiques car le pigment en change les comportements chimiques et tout particulièrement la viscosité à chaud et le "soudage". Pour cette première expérience, les pièces imprimées en bleu clair, en violet, en vert pomme et en noir sont toutes parfaites. En revanche, le doré, le bleu foncé et le transparent (*Qui en chauffant devient blanc.*) posent manifestement des problèmes. Il faudra expérimenter pour trouver les bons paramètres à imposer au trancheur. Rien d'anormal à ça, toute nouvelle technologie apporte des particularités et impose de l'expérience. Sur [Image07.JPG](#) le secteur gradué du COUDE "sortira" sans bavure. Quand il est terminé, difficile d'imaginer que cet élément est creux, comme tous les autres du reste.

➤ **L'assemblage.**

Enfin, comme en témoigne [Image08.JPG](#), nous disposons de toutes les pièces qui imprimées avec divers filaments sont de plusieurs teintes. (*Et oui, j'adore la couleur !*) Naturellement nous avons approvisionné au préalable toute la visserie et les rondelles nécessaires. Internet regorge de fournisseur, on trouve facilement toutes les références dont on peut avoir besoin et en particulier de la visserie ϕ M3 et surtout ϕ M2 pour les servomoteurs. Avec fébrilité et jubilation on commence par assembler la PINCE qui présente l'aspect montré sur [Image09.JPG](#) et on relie

la ligne électrique du moteur à la carte Arduino contenant un programme pour ouvrir et fermer les mors ... ben ça marche. C'est presque magique de voir le mécanisme s'animer et venir saisir un objet entre les mors. Bonheur et jubilation, tout va pour le mieux dans le meilleur des mondes, on va donc passer à la suite, c'est à dire assembler la pince sur le poignet.

- *Hé, Dudule, je ne voudrais pas tempérer ton ardeur mais ya un chemolleduque !*

- *Ya quoi Totoche ?*

- *Pour immobiliser le palonnier sur le moteur, il faut une vis.*

- *Ben c'est pas un problème ça, j'en ai à profusion de ces vis pour servotruc.*

- *Sauf que ton tournevis ne peut pas traverser l'engrenage cher Dudule !*

Et oui, force est de constater sur [Image10.JPG](#) que l'on a oublié ce petit détail. Le passage de l'outil était prévu, mais on a un peu oublié l'ordre de montage des pièces. Il n'y a plus qu'à retirer les deux biellettes pourvues de secteurs dentés et reprendre les procédures de montage.

Visiblement, au fur et à mesure que l'on assemble les éléments, un pressentiment confus vient alourdir l'atmosphère. Pourtant la précision de "moulage" est très bonne, les trous de passage des vis sont exactement au bon endroit. Mais plus on avance dans l'intégration des éléments, et plus une sensation "de mou" dans la mécanique se fait sentir. Quand le total est entièrement terminé, *le bras manipulateur est ... magnifiquement inutilisable*. C'est la déconvenue !

➤ **Rien ne va plus !**

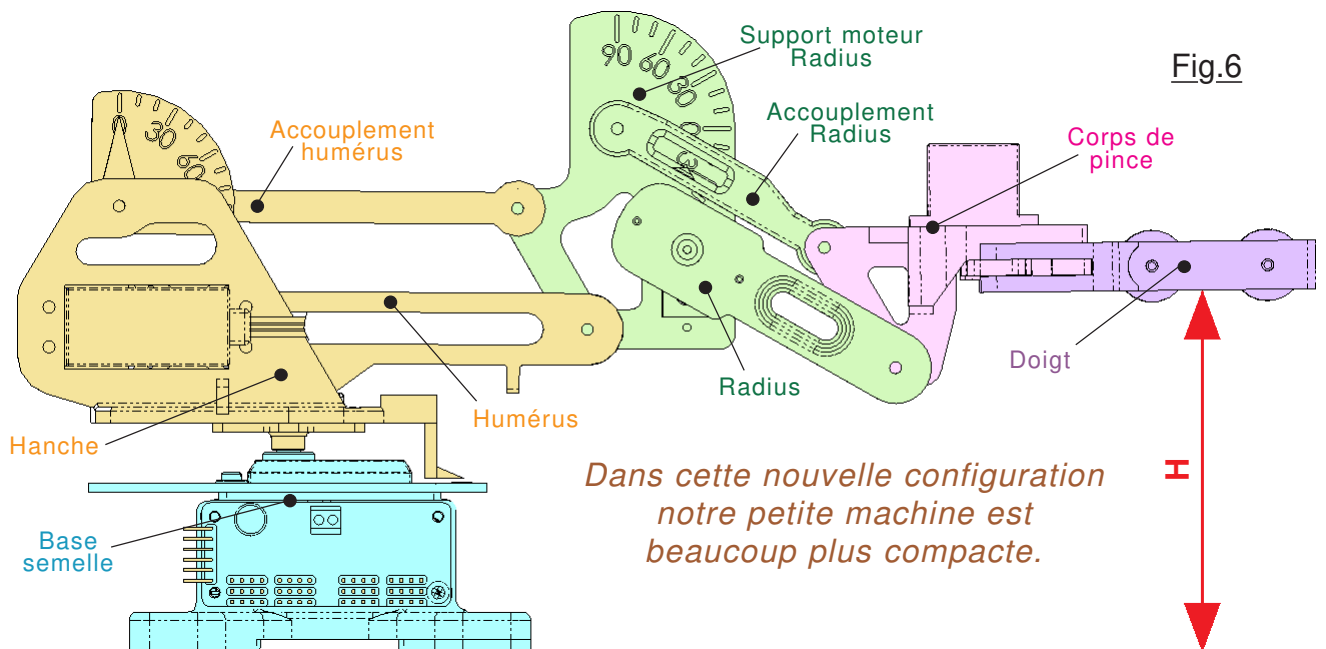
L'intégralité du bras a été étudiée alors que l'imprimante n'était pas disponible. C'est donc un pur produit virtuel assemblé avec des éléments supposés parfaits. Hélas, le réel est impitoyable. C'est viable ou c'est mauvais, et dans le deuxième cas ... poubelle !

Considérons [Image11.JPG](#) montrant l'épaule et le coude. On observe immédiatement que la bielle bleu clair et la noire qui devraient être parallèles sont convergentes. L'arête repérée en rouge sur le corps du coude, pièce violette, devrait se trouver en orientation verticale. Ces déviations résultent du fait que les trous pour les axes d'articulation ont été réalisés à 3,3mm. *C'est une erreur grossière*, car ces petits jeux cumulés engendrent ces déviations. On se rend bien compte sur [Image12.JPG](#) que la déviation α sur la pièce violette atteint environ 8°. À l'autre extrémité du Radius sur [Image13.JPG](#) les jeux des deux articulations ajoutent encore à la débâcle. L'inclinaison β frise allègrement les 12°, sans compter que pour la PINCE c'est carrément la catastrophe. Si l'on regarde [Image14.JPG](#), l'effondrement est pratiquement de 20°, alors qu'en théorie la pince est horizontale. Le problème était connu depuis que sur ROBOTMAKER j'ai proposé le descriptif de la sonde JEKERT. Je n'ai pas tenu compte de l'expérience acquise ... dommage ! Le problème vient du fait que la pince avec toute cette mécanique associée au servomoteur présente une masse notable. Hors *le poids de l'ensemble est entièrement supporté par le minuscule arbre de sortie du servomoteur du poignet. Mécaniquement c'est un abus impardonnable*, et la réalité n'a pas pardonné. C'est bien dommage, car vu de dessus sur [Image15.JPG](#), il avait fière allure mon bras manipulateur.

➤ **On change notre fusil d'épaule.**

Façon comme une autre de vous prévenir que l'on va modifier complètement la structure envisagée initialement et tirer les conclusions de notre déconvenue. La première leçon de ce désastre se résume à : *Sauf cas très particulier, ne jamais utiliser l'arbre de sortie d'un petit servomoteur pour supporter des charges*. C'est la morphologie de la machine qui supportera les poids par des articulations raisonnablement dimensionnées. Le moteur ne servira qu'à fournir le couple de torsion. Pour notre petit projet expérimental, nous allons déroger à cette résolution, car nous n'avons pas vraiment le choix. La photographie d'[Image15.JPG](#) va nous servir à élaborer un compromis acceptable. Les deux "gros" servomoteurs de la HANCHE et de l'ÉPAULE supporteront les poids de l'ensemble. Pour éliminer le problème le plus dévastateur, on supprime purement et simplement le poignet. Notre machine voit diminuer d'une unité son degré de mobilité. Du coup le logiciel qui gérât 5 moteurs va devoir être entièrement reprogrammé. (*C'est la dure réalité du réel. Quand c'est mauvais, soit on abandonne, soit on recommence. Et pour nous, l'abandon n'est pas une option.*) Sur [Image15.JPG](#) on constate que la distance **D** qui sépare l'articulation du servomoteur du poids de la PINCE est bien trop grande. En mécanique on utiliserait le vocable de "bras de levier". *Le moteur du coude n'a absolument pas assez de couple pour soulever la pince.*

En supprimant la torsion du poignet, on supprime un servomoteur et on gagne de la charge. Toutefois, le couple à fournir reste encore déraisonnable. Aussi, pour diminuer de façon significative l'effort résistant, nous allons diviser par deux la longueur **L** des bielles de l'Humérus. Comme on conserve les biellettes de l'ÉPAULE, pour compenser en partie l'angle α de 8° , on va tricher un chti peu avec la théorie. La biellette du dessus du coude, celle de longueur **L** qui est noire sera réalisée un tantinet plus courte que celle de dessous en matériau doré. Pas beaucoup en réalité, soit 0,2mm de moins. Enfin, le corps de la pince sera optimisé pour diminuer encore de 5 à 8mm le bras de levier. Avec toutes ces modifications, l'ensemble prend l'aspect de la Fig.6 sachant qu'il s'agit là d'une théorie informatique. Il reste à réaliser les nouvelles pièces pour valider tous ces changements.



Ce que ne montre pas le dessin de la Fig.6, c'est que l'**Accouplement humérus** a été redessiné avec 2mm de moins pour la distance entre les articulations, et ainsi évacuer la déviation α . Sur les dessins théoriques la pince semble notablement cabrée, reste à voir l'effet lorsque les différents jeux dans le réel dégraderont cette géométrie numérisée. Toutes ces modifications ne sont pas sans influence sur les caractéristiques de base de notre petite machine. Sur la Fig.6 la configuration est présentée lorsque le bras se trouve en élancement maximale, la pince au plus bas. Le volume enveloppe de ses possibilités de préhension a notablement diminué. Par ailleurs, la hauteur **H** la plus faible de la pince est plus élevée que dans la version initiale. Comme nous sommes dans un domaine de loisir, les performances de notre "produit" ne sont pas concurrencées par un marché industriel impitoyable. Pour cette version expérimentale, les performances de la version "courte" sont largement suffisantes ... à condition d'avoir résolu ou contourné les problèmes rencontrés sur le premier prototype.

➤ Les diverses modifications engagées pour "sauver" le projet.

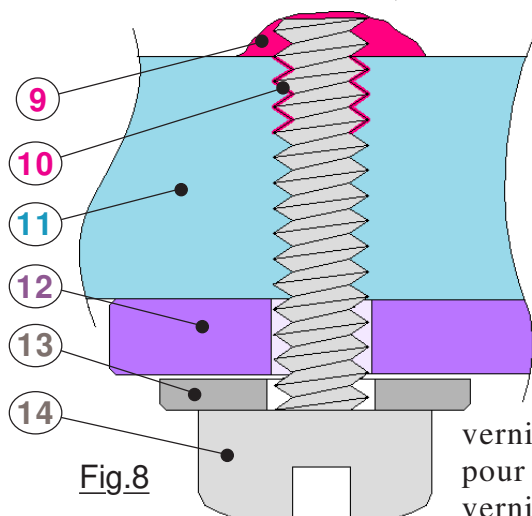
Corps de pince, Radius et Accouplement Radius réétudiés à l'aide du logiciel de dessin, l'imprimante 3D reprend du service pour réaliser ces trois nouvelles pièces qui vont conditionner le futur du bras manipulateur. La photographie [Image16.JPG](#) décrit la "fusion" résultant des deux anciennes pièces pour aboutir au nouveau **Corps de pince**. Le servomoteur est placé sur le dessus pour conserver les éléments des doigts le plus bas possible. Il serait possible de les placer au niveau inférieur de la PINCE. Cette option a été écartée, car elle oblige à placer le servomoteur et l'ensemble du mécanisme plus vers la droite, ce qui augmente le bras de levier **D**. Le rapport entre avantage et inconvénients n'a pas été estimé comme étant favorable. ATTENTION : Pour espérer aboutir à une mécanique viable, il faut impérativement prendre certaines précautions :

- **Aléser les trous des articulations à 3mm** et surtout pas à 3,3mm.
- Comme on peut le constater sur [Image17.JPG](#) et sur [Image18.JPG](#) que le jeu interne entre les doigts et les biellettes est réduit par interposition de rondelles d'épaisseur réalisées par deux couches de papier découpé à l'aide de ciseaux très pointus.
- Pour diminuer le poids les écrous et contre-écrous et les rondelles ont été éliminées.

- Pour que les vis fendues servant d'articulations sur le corps de pince soient implantées de façon rigide, (*Voir la Fig.8*) dans la version actuelle les trous sont taraudés et les vis y sont collées par du vernis de freinage. La macrophotographie en gros plan d'[Image19.JPG](#) présente ces éléments.
- Comme montré sur [Image20.JPG](#) l'avant bras a été réduit de moitié en longueur. Ce que l'on ne voit pas, c'est que l'**Accouplement Radius** est légèrement plus court que le **Radius**.
- La différence n'est pas suffisante, aussi, pour diminuer l'inclinaison de la pince, l'**Accouplement humérus** a été raccourci de 2mm ce qui peut sembler prohibitif.

► La validation de la version "compacte".

Difficile sur les diverses photographies de se faire une idée exacte des solutions mécaniques adoptées. Aussi, pour faciliter l'interprétation est effectuer un assemblage optimal, les Fig.7 et Fig.8 présentent les articulations réalisées sur la PINCE. La Fig.7 est typique d'une bonne mécanique des années 1990. Adoptée sur les articulations des doigts elle a été finalement laissée en place. On insère la vis 7 à travers de doigt 5 en intercalant la biellette 4. Comme toute bonne mécanique qui se respecte, on a placé des deux cotés les rondelles 6 et 8. Le moulage de la fourche 5 est effectué en laissant un jeu d'environ 1mm car initialement la précision de l'imprimante 3D n'était pas connue. Pour diminuer le jeu J1 néfaste, on intercale les deux rondelles 3 taillées dans du papier un peu rigide. Puis on insère l'écrou 2 et on le visse jusqu'à annuler pratiquement le jeu axial J2. Enfin, pour éviter qu'il ne se dévisse par la présence des vibrations, on bloque sur ce dernier avec le contre-écrou 1. À l'usage, cette solution s'avère inutilement compliquée et ajoute un poids néfaste à la PINCE. Aussi, comme le montre la Fig.8 les articulations des biellettes telles que



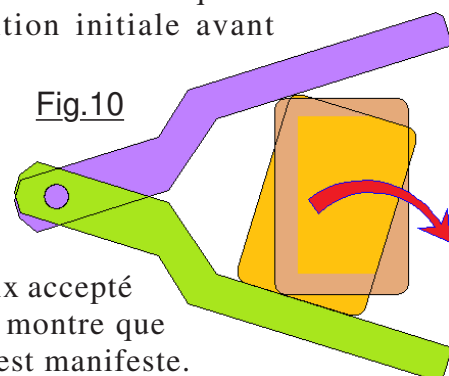
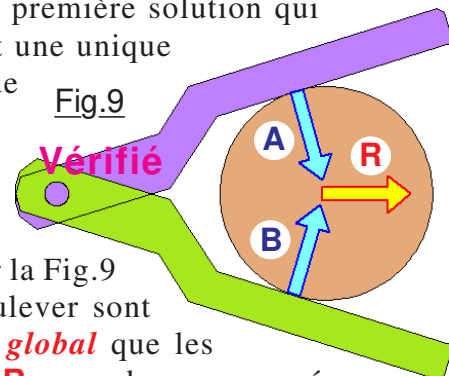
12 sur le corps de pince 11 ont été considérablement simplifiées. L'épaisseur sur 11 étant largement suffisante pour matérialiser un encastrement rigide, les trous d'implantation des vis 14 sont taraudés à ϕ M3. On place la rondelle d'appuis 13, on traverse la biellette 12 et on visse 14. En extrémité on dépose une goutte de vernis de freinage 9. On serre pour faire sortir l'extrémité de 14, on la desserre pour introduire en 10 du vernis dans le filetage. On serre à nouveau le juste ce qu'il faut pour ménager un jeu axial très faible entre 13 et 12. On laisse le vernis durcir et l'articulation est opérationnelle. S'est simple, léger et optimisé. Pour adopter cette solution sur les doigts, il faudrait mouler à nouveau des pièces avec des trous de diamètre ϕ M2 pour pouvoir les tarauder. Tout le monde ne dispose pas d'un tel outillage, aussi j'en reste à la solution de "grand-père". Pour le corps de pince les trous sont prévus pour être taraudés, mais pour ceux qui n'ont pas l'outillage nécessaire : Repercez à ϕ M3 et saturez de vernis.

et optimisé. Pour adopter cette solution sur les doigts, il faudrait mouler à nouveau des pièces avec des trous de diamètre ϕ M2 pour pouvoir les tarauder. Tout le monde ne dispose pas d'un tel outillage, aussi j'en reste à la solution de "grand-père". Pour le corps de pince les trous sont prévus pour être taraudés, mais pour ceux qui n'ont pas l'outillage nécessaire : Repercez à ϕ M3 et saturez de vernis.

Suite à cet acharnement thérapeutique, le malade est sauvé ... OUF ! Une fois entièrement assemblé, le fonctionnement est satisfaisant. Le servomoteur du poignet arrive à soulever la pince, à condition de ne placer dans les mors que des objets de masse déraisonnable. Par exemple ne tentez pas de soulever un poids de pendule ou le gros cabas des commissions de la semaine. En revanche, pour expérimenter la dynamique et la cinématique de ce type de mécanisme, notre petite machine est bien sympathique. **Ne pas maintenir l'énergie de puissance si au cours d'un déplacement un "point dur" empêche un servomoteur d'atteindre sa position.** Ce dernier chaufferait jusqu'à sa destruction. Dans un tel cas revoir la mécanique jusqu'à trouver la nature du coincement et y remédier. Sur la photographie d'[Image21.JPG](#) on peut vérifier que le fait d'avoir raccourci de 2mm l'**Accouplement humérus** n'engendre pas "un cabré" aberrant de la pince ... solution adoptée !

➤ Un petit retour en arrière sur la structure de la machine.

L'ensemble de la cinématique du petit robot est constitué de *pantographes*, morphologie qui assure à la *pince* une *orientation horizontale quelles que soient les rotations générées par les servomoteurs*. Pour ce qui concerne le serrage de la pince, la première solution qui vient à l'esprit, montrée sur les Fig.9 et Fig.10, est classiquement une unique rotation des doigts. Cette approche conduit à un ensemble mécanique bien plus simple que celle adoptée, soit un pantographe, car il n'y a qu'une seule articulation au lieu de quatre. Le mécanisme présente ainsi bien moins de frottements à vaincre et un poids plus faible. Toutefois, cette option n'a pas été retenue, car elle génère deux inconvénients estimés trop pénalisants. Le premier est explicité sur la Fig.9 sur laquelle les efforts exercés par les doigts sur l'élément à soulever sont respectivement **A** et **B**. Combinés, ces deux efforts ont un *effet global* que les mécaniciens traduisent par la notion de *résultante*. Cette résultante **R** engendre une poussée vers l'extérieur qui inexorablement chassera la pièce à soulever si les mors manquent d'adhérence. Sur la Fig.10 est représenté en *marron* un objet dans sa position initiale avant préhension. Le contact sur les mors ressemblant à du ponctuel, il va y avoir un glissement parasite soit sur le doigt violet, soit sur celui du bas en vert. Dans cet exemple, c'est le haut qui glisse. Si la pièce n'est pas éjectée par la résultante **R**, elle se trouvera dans une orientation indéterminée *orange* impropre à la programmation déterministe du bras manipulateur. Pour ces deux raisons, le mécanisme de la pince reprend les structures de pantographe, au prix accepté des inconvénients de poids et de frottements accrus. L'expérience montre que ces derniers sont acceptable et que le bénéfice de cette géométrie est manifeste.



3) Tranchons, tranchons, il en restera forcément quelque chose !

L'ensemble des problèmes évoqués dans le chapitre précédent n'a strictement rien à voir avec les procédés d'élaboration des pièces mécaniques. Les difficultés identifiées résultent d'une "mauvaise conception", qui à l'instar des projets industriels de grande envergure est révélée lors des premiers essais de validation sur un prototype. Ce chapitre a pour but de vous faire part de l'expérience du débutant qui pour la première fois a généré des éléments mécaniques par impression 3D.

Lorsque le dessin de la machine complète est achevé, que l'on a vérifié les mouvements possibles, les encombrements, la non interférence matérielle "dans l'enveloppe de vol", bref : *Que tout semble parfait*, le moment est venu de concrétiser notre machine. On va passer d'éléments virtuels constitués "d'électricité binaire" à une dépose de matériau malléable pour empiler de la matière et ainsi donner forme à nos pièces mécaniques. N'étant pas assujettis à des délais industriels de rentabilité financière à outrance, une approche progressive et expérimentale s'impose. Nous allons procéder étape par étape en partant de la pince et en complétant, mobilité après mobilité. Chaque articulation nouvelle sera testée mécaniquement. Quand elle aura démontré sa viabilité, alors on complète avec la mobilité suivante. Ainsi, chaque problème est résolu "dans l'ordre", imposant parfois une refonte du reste de notre petite machine. Personnellement, j'ai décidé de *Trancher* toutes les pièces pour en estimer la validité. Ainsi, globalement l'ensemble sera "vraisemblable" quand on va commencer à imprimer les différentes pièces. C'est ici que commencent les embrouilles !

NOTE : Dans le chapitre précédent, nous avons vu que certaines pièces définitives sont plus courtes. (Naturellement ce sont les fichiers des pièces définitives qui sont fournis.) Néanmoins, dans les exemples qui suivent ce sont les pièces initiales qui ont servi d'exemples. Les difficultés rencontrées restent d'actualité ainsi que les conclusions qui en découlent. Ces chapitres rédigés durant le développement sont donc conservés.

➤ Premier problème de conception.

Véritablement une erreur de conception, le *Radius.STL* est mal pensé. En effet, comme montré sur la Fig.11 dès qu'il est placé sur le plateau de l'imprimante virtuelle, son volume enveloppe indiqué par *Repetier-Host* est coloré en vert clair. C'est le signe qu'un détail n'est

pas correct. Dans ce cas précis, la longueur entre les axes de rotation étant prévue de 120mm, ses dimensions hors tout restent bien inférieures à la surface imprimable du plateau. Mais j'ai totalement occulté le fait que pour imprimer une pièce, la machine commence par déposer une JUPE. Comme précisé en page p8 du livret **Le G-Code des imprimantes 3D**, le compilateur ajoute à la pièce réalisée un contour qui entoure le modèle, mais ne le touche pas. Elle permet d'amorcer le flux continu du filament, de vérifier que la dépose de matériau se fait correctement etc. Passant outre l'avertissement de CuraEngine on obtient le résultat de la Fig.12A qui montre clairement que l'imprimante ne pourra pas exécuter correctement son travail. (Si on plaçait la pièce verticalement elle serait entièrement contenue

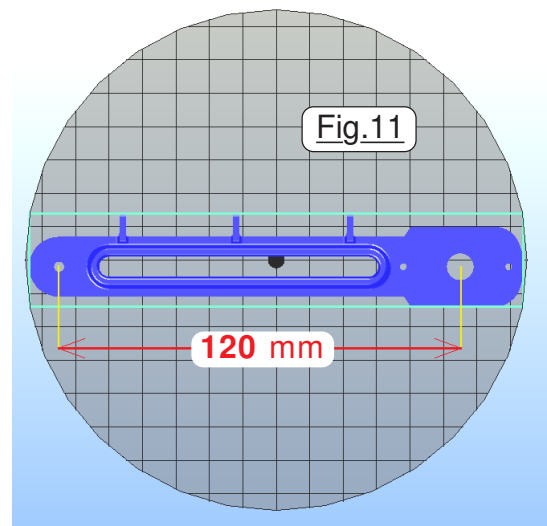
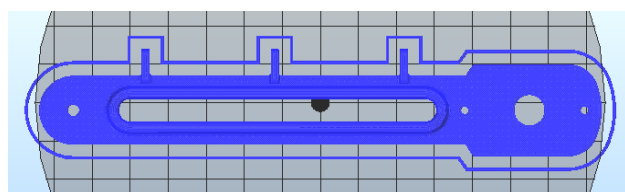
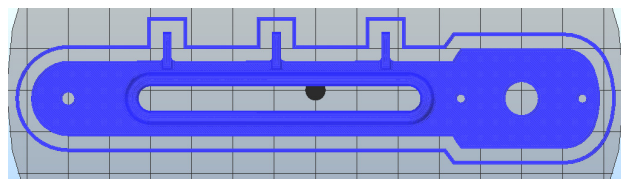


Fig.12A dans le cylindre d'évolution possible de l'extrudeur ... mais la pièce serait en déséquilibre et tomberait.) Pour que la jupe soit entièrement contenue sur le plateau tout en restant à plat, il faut impérativement en diminuer la longueur d'au moins un centimètre. Le dessin en C.A.O. a donc été modifié en conséquence, avec obligation de raccourcir également **Accouplement Radius.STL**



dans des proportions identiques. Quand la longueur a été modifiée à 110mm, on peut observer sur la Fig.12B que le problème est résolu, au prix d'une diminution dérisoire des performances de l'appareil final. La jupe reste maintenant sagement à l'intérieur de la surface utile du plateau virtuel. Espérons que ce type d'écueil ne se produise pas trop souvent car il engendre dans le programme de conception mécanique des "effets boule de neige assez longs à corriger. C'est tout bon, continuons à trancher tous les éléments de la petite machine et croisons les doigts. On passe à l'épaule et PAFFFFFFFF nouvelle chausse trappe !

Fig.12B



➤ Travail de base effectué par le trancher.

Pour comprendre certains problèmes spécifiques aux imprimantes 3D qui imposent des contraintes particulières en conception, il nous faut avoir une idée précise du processus et du traitement que doit effectuer le trancher. Imaginons dans un premier temps un artiste qui est en train de peindre une toile supposée posée à plat sur une table banale. Avec un pinceau, par des déplacements précis de ce dernier il étale de la couleur sur le tissu tendu dans son cadre. Puis, inspiré par les muses, il en rajoute par dessus, son œuvre prend de l'ampleur. Quand il estime avoir terminé son tableau, plusieurs couches de teintes différentes sont ainsi empilées les unes sur les autres. C'est exactement ce que fait l'imprimante 3D, sauf qu'elle utilise un fil chauffé comme matériau et une buse d'extrusion comme pinceau. La largeur du trait est (*En principe*) constante, c'est la **Précision** souhaitée par l'opérateur et indiquée au Trancher. Autre différence significative, là où l'artiste a entassé quelques couches, pour une pièce réalisée sur imprimante 3D le nombre peut atteindre plusieurs centaines. Par exemple une pièce de 130mm de hauteur réalisée avec une précision de 0.1mm exigera pas moins de 1300 couches successives !

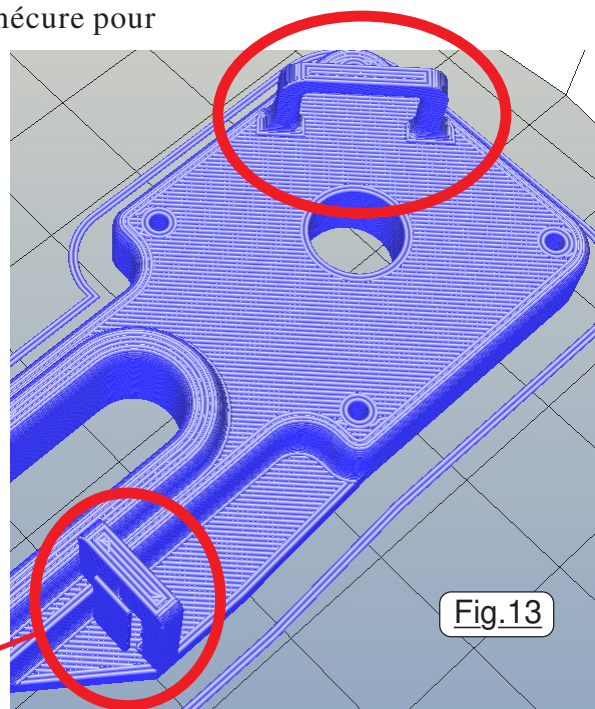
Déjà abordé dans ce didacticiel, le trancher va analyser couche par couche les déplacements que devra effectuer la buse pour déposer la matière. En fonction des formes et des dimensions de la pièce, il doit déterminer les déplacements avec extrusion, et ceux sans dépose de matériau pour les zones évidées. Par ailleurs, les déplacements sans extrusion doivent être optimisés pour minimiser le temps de travail. C'est déjà une opération intrinsèquement difficile. Mais là ne se limite pas la misère du trancher car il faut installer "des échafaudages". En effet, les tranches sont horizontales et on "coule" le matériau en partant du sol vers le haut comme lorsque l'on construit les murs d'une maison couche par couche. Couler un sol à l'étage impose de commencer par placer un faux plancher provisoire, puis, on peut alors déposer le béton liquide et attendre

qu'il soit solidifié pour enlever le plateau qui servait de support. C'est exactement ce que l'on fait en 3D. Le trancheur détecte les zones qui seront sur du vide, et en fonction des circonstances élabore des supports. Sans entrer dans les détails, ce sont des parois verticales parallèles disposées là où le logiciel les estime indispensables. Elles sont fines et relativement séparées. Quand la pièce est terminée, elles sont relativement cassantes, et avec une pince on peut facilement les enlever. Tout au moins celles qui sont à l'extérieur ... on s'en doute.

➤ Deuxième problème : Le trancheur s'égare un tantinet.

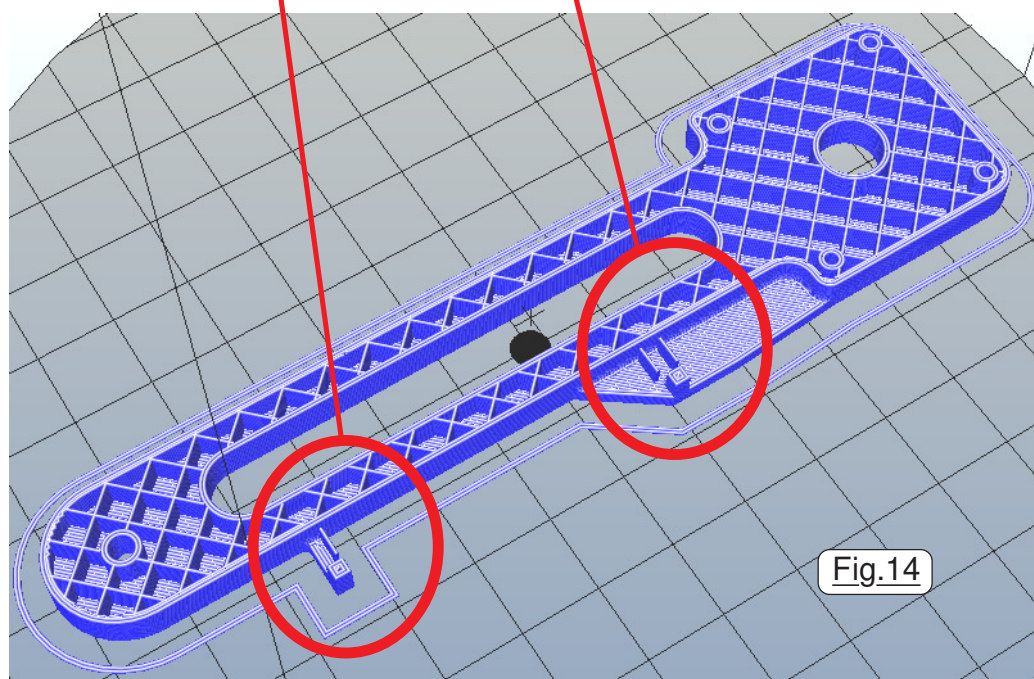
Comme on peut le constater sur la Fig.13 manifestement l'étude et l'analyse des supports n'est pas forcément une sinécure pour le traitement informatique. Manifestement, quelques petits détails "sont à coté de la plaque". On peut corriger directement le programme **gcode** avec l'éditeur mais c'est d'un indigeste sans nom. Donc on oublie ce type de purgatoire cérébral. Du coup, on n'ose pas imprimer, convaincu que le résultat sera mauvais ... Ben non ! Force est de constater, que finalement si l'on s'aventure à imprimer de telles pièces en l'état, au final ces défauts n'engendrent pas de conséquences néfastes et les pièces qui en résultent sont tout à fait utilisables. Donc, même si le tranchage à l'écran n'est visiblement pas idéal dans l'absolu, dans la pratique on fait confiance et on imprime. Au on peut aussi tenter le tranchage avec un autre logiciel qui ne présentera pas forcément les mêmes imperfections, ou jouer sur les paramètres du trancheur. Bref, on doit expérimenter ...

Ici pas de support !



Ici un support mais mal centré

Ici deux supports mais l'un est décalé

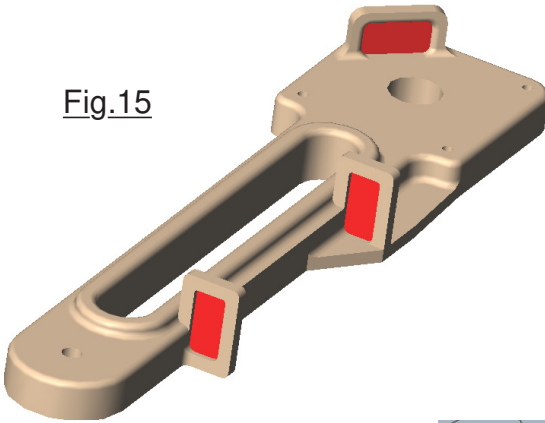


NOTE : Certaines et certains d'entre vous ne seront pas concernés par l'aspect logiciel. C'est la raison pour laquelle un didacticiel le concernant est proposé à part. Il est accompagné d'un petit livret décrivant en détail le **gcode** des imprimantes 3D pour le cas où on désire intervenir directement à ce niveau. Cet aspect de l'utilisation des imprimantes 3D y est donc abordé.

➤ Solution alternative.

Autant pour une pièce qui ne demande que dix à quinze minutes pour son "moulage" on peut prendre le risque de "voir ce que ça donne", autant pour un objet plus important qui commence à dépasser les trente minutes on n'a vraiment pas envie de tenter le diable. L'idée toute simple consiste à reprendre les formes de la pièce dans le logiciel de D.A.O. et d'y ajouter "artificiellement" des cloisons sous les zones qui ont été oubliées par le trancheur. Des essais ont montré qu'il faut que ces cloisons fassent au moins 0,5mm d'épaisseur pour être prises en compte par le

Fig.15



trancheur. Sur la Fig.15 qui montre la pièce corrigée telle que la présente le logiciel de D.A.O, ces cloisons sont montrées en rouge. Pour ne pas que sur les dessins

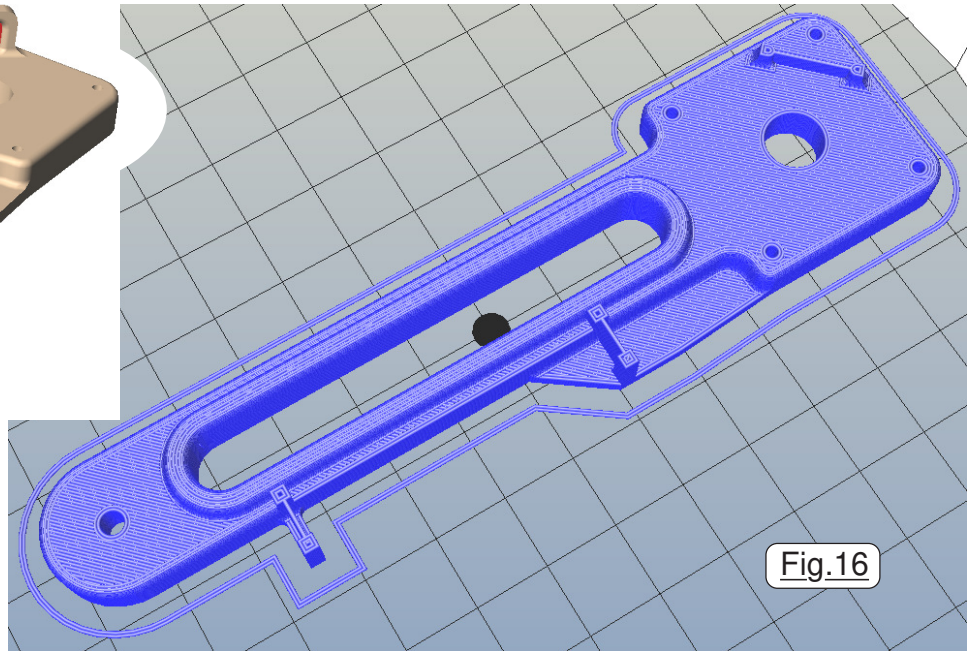


Fig.16

d'ensemble les "passe fils" paraissent bouchés, les pièces corrigées sont à part dans les dossiers de dessins et ne servent qu'à créer les fichiers.STL pour le trancheur. Sur la Fig.16 on peut vérifier qu'ainsi modifiée la pièce d'origine avec les cloisons intégrées engendre un tranchage correct. Les cloisons sont bien présentes et au milieu des ponts. Il reste encore à vérifier que sur la machine à extruder le résultat soit celui attendu, car seule la pratique peut valider une idée. En moulant cette pièce, la réalité matérielle à montré que c'était une approche parfaitement acceptable. En particulier,

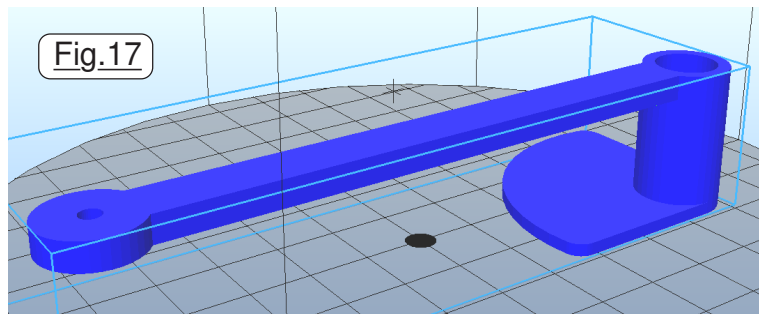


Fig.17

bien que dans le dessin de la pièce il a fallu donner à ces cloisons ajoutées une épaisseur de 0,5mm pour qu'elles apparaissent après tranchage, on voit nettement sur la Fig.16 qu'elles ne font qu'un seul "fil d'épaisseur" et restent donc faciles à enlever.

➤ Troisième problème : Pièce mal "posée" sur le plateau.

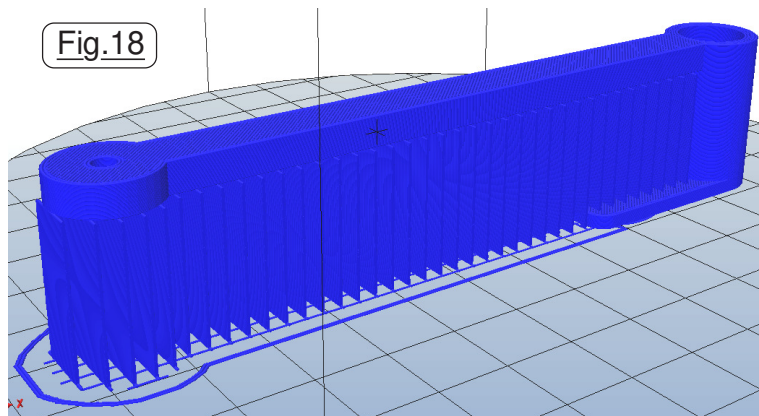


Fig.18

Utiliser le vocable de problème est exagéré. Ce n'est qu'un détail à prendre en compte, sans plus. En Fig.17 la pièce est représentée telle qu'elle arrive sur le plateau de la machine. Son orientation dans l'espace est fonction de divers facteurs, et notamment son orientation par rapport aux axes de référence du logiciel de C.A.O. Elle se tranche correctement avec le résultat montré sur la Fig.18. Il faut 3536mm de filament et 1H28m pour l'imprimer. Si l'on observe la première couche en Fig.19, celle qui adhère au plateau, les graduations laissent un vide, la matière qui sera imprimée au dessus risque de fléchir et dégrader les inscriptions. Par ailleurs les parois support viennent toucher les graduations. En les enlevant on risque de dégrader les inscriptions. Aussi, pour maximiser les chances d'obtenir de belles inscriptions, en Fig.20 la

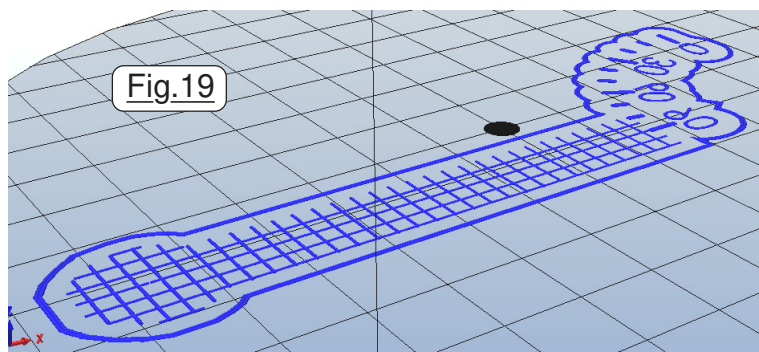
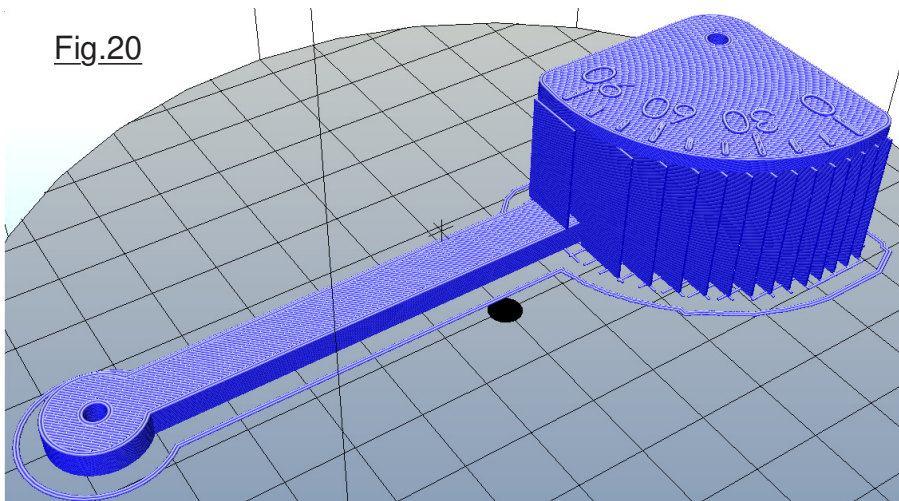


Fig.19

Fig.20



pièce a été retournée sur le plateau par utilisation des commandes idoines du logiciel trancheur. Le dessus est parfait à l'image. Toutefois, on constate sur la vue Fig.21 que le moyeu est encombré de trois cloisons support qui risquent à ne pas être faciles à éliminer. Nous verrons bien. Dans cette version on passe à 1H 32m d'extrusion et il faut 3707mm de fil. Comme la partie haute qui va se plaquer contre la Hanche pour

réaliser l'articulation semblait exagérément creuse, il m'a semblé plus prudent d'augmenter la densité de remplissage à 40% la longueur de filament passe à 3949mm et la durée de moulage à 1H 34m 44s.

➤ **Encore un mauvais atterrissage.**

Aucune raison de considérer que le pilote n'est pas à la hauteur, il n'y est pour rien. Quand la HANCHE est déposée sur la machine virtuelle, elle occupe l'orientation montrée sur la Fig.22 ce qui n'a rien d'aberrant. Imprimée en l'état il faut 7298 mm de fil et 3H 29m de travail. Surtout, un très grand nombre de supports sont à enlever et l'index est "dégradé" par

les cloisons support. Placée verticalement comme montré en Fig.23 il ne faut plus que 7298 mm de filament et le temps de travail diminue à 3H18m 53s. Outre les économies réalisées en matière première et en temps de travail, l'index étant tout en haut sera réalisé sans bavure.

Cet exemple montre que lorsqu'une pièce comporte de grandes ouvertures, étudier sa position sur le plateau est fortement conseillé. Il faut alors prendre en compte la qualité de finition des éléments "esthétiques", la stabilité de la pièce sur le plateau. Seule l'expérience pourra nous aider dans cette voie. ***Bien entendu, les fichiers STL et en gcode fournis correspondent à ceux qui ont fait leurs preuves et conduit aux pièces qui sont intégrées sur le prototype.***

Fig.21

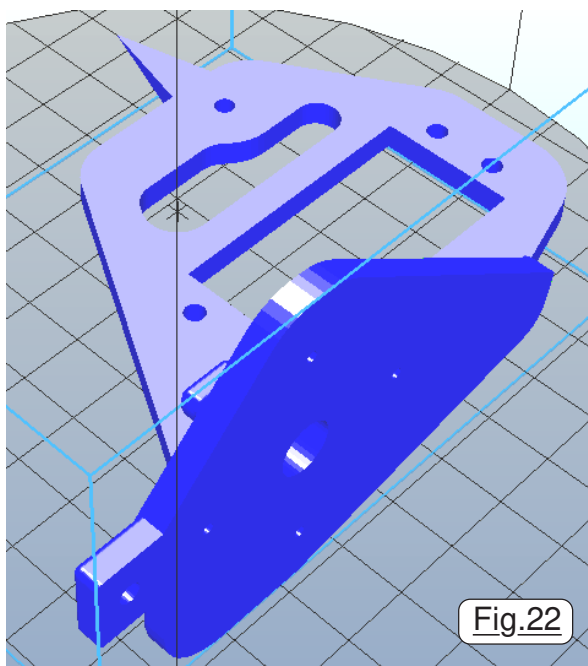
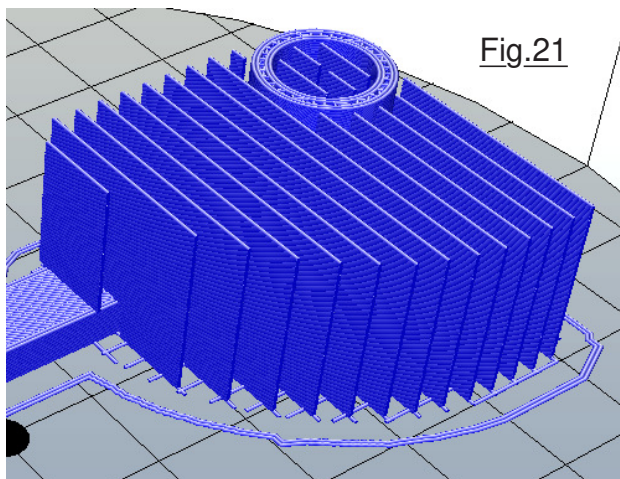
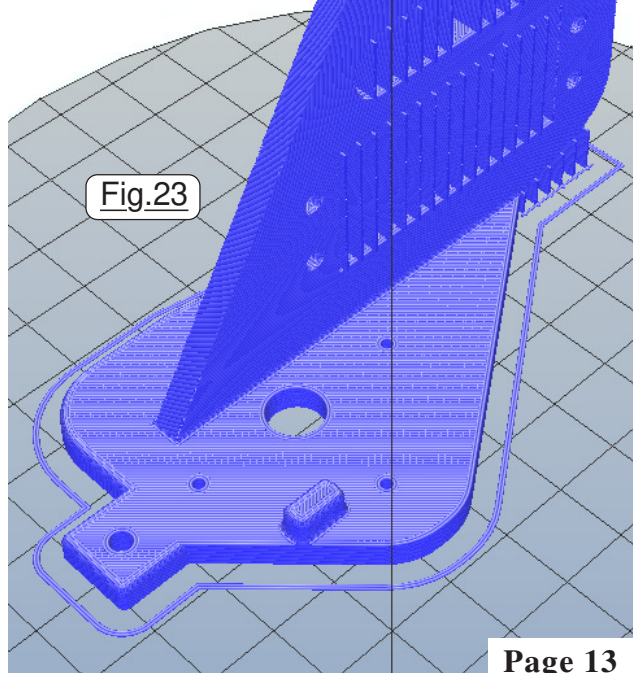


Fig.23



► Exercice d'équilibriste !

Particulièrement scabreux l'atterrissage de la Fig.24 confine pourtant à de la routine. En effet, l'expérience montre que souvent les pièces sont déposées de cette façon sur le plateau de la machine virtuelle. Déposée ainsi à la verticale la pièce va consommer 23069mm de filament et exiger 7H 15m de moulage. Placée à l'horizontale comme tranchée en Fig.25 il ne faut plus que 17489mm de fil et la durée d'impression diminue à 5H27m. Dans ces deux cas on imprime en vitesse rapide à 0.1mm de qualité. Quand on passe à 0.3mm, la longueur de filament augmente très légèrement et devient 17729mm. En contrepartie, pour 243mm de plus, le temps d'impression se réduit à 2H 4m 9s, valeurs adoptées pour effectuer l'expérimentation. Il peut sembler contradictoire que pour déposer plus de filament il faille moins de temps. En réalité c'est normal, car le temps de "moulage" ne

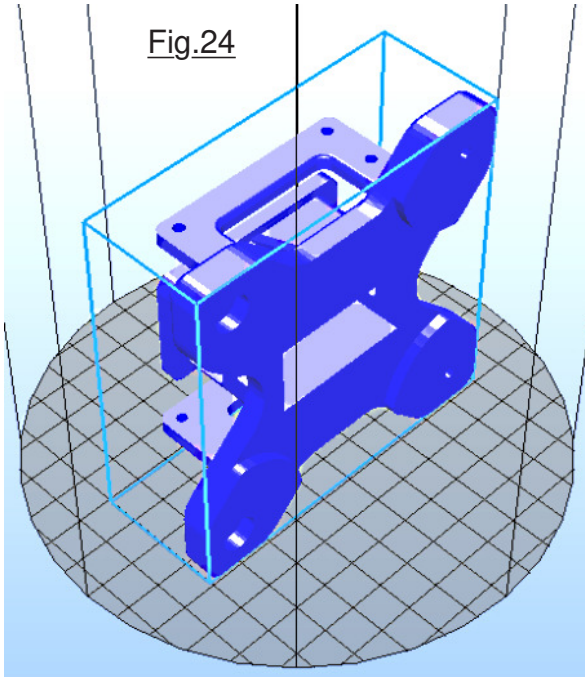
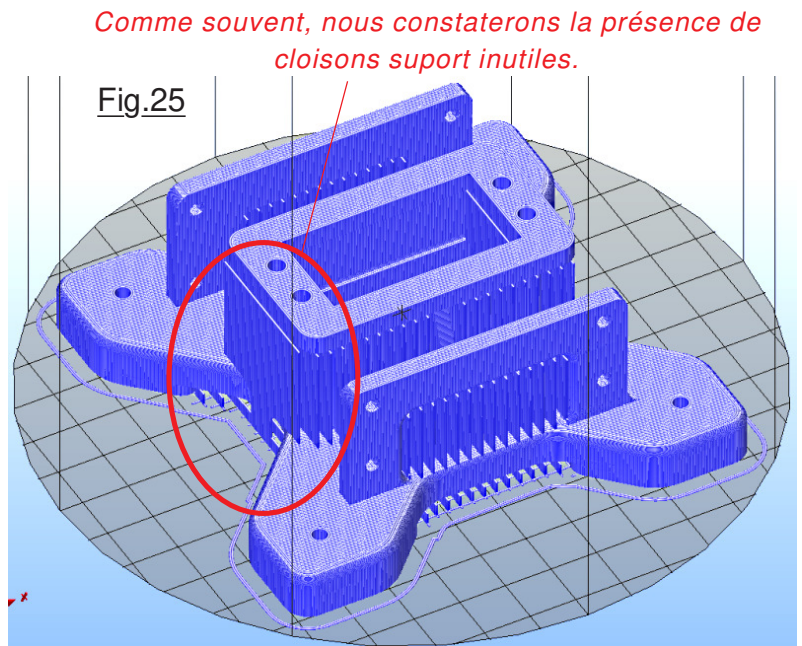


Fig.24



Comme souvent, nous constaterons la présence de cloisons suport inutiles.

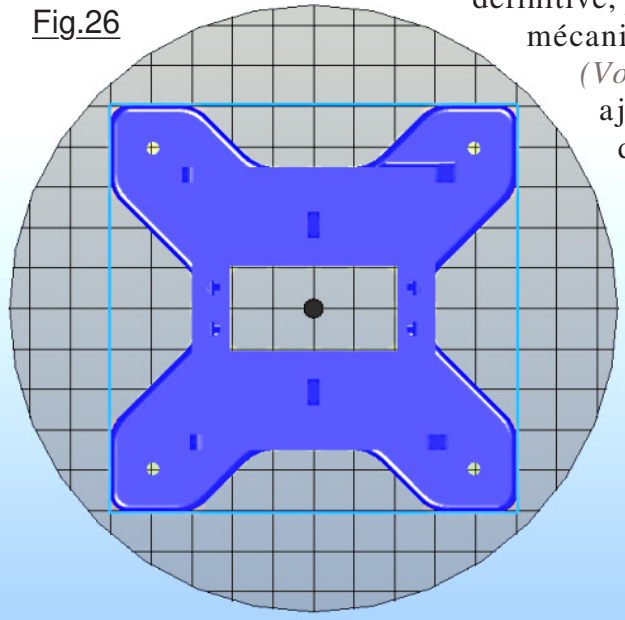
Fig.25

dépend pas uniquement que la quantité de matière à extruder, mais directement de la longueur des déplacements à effectuer. Donc diminuer la longueur des mouvements sans dépose influence directement la durée totale nécessaire à l'impression. Il importe de remarquer sur la Fig.26 que le corps du statif du bras manipulateur a été étudié le plus grand possible, compatible avec les dimensions utilisables de l'imprimante 3D. C'est la grandeur utile du plateau de la **Micro Delta Rework** de diamètre 150mm qui a directement influencé l'étude de cette dernière dans le logiciel de C.A.O. *En particulier, vous pouvez vérifier sur la Fig.25 que les dimensions de la semelle sont prévues pour que la jupe qui entoure la pièce ne sorte pas du disque de ϕ 150mm.* Sur la pièce

définitive, profitant du premier échec, pour améliorer la résistance mécanique globale, les formes ont été entièrement revues.

(Voir Image1.JPG) Du coup, plusieurs lumières ont été ajoutées pour économiser du filament, du temps d'impression et de surcroit ajouter des zones de passage pour les fils électriques, car de nombreux torons de fils vont coexister avec la mécanique. Enfin, dans les paramètres du trancheur j'ai créé **Réglage personnel pour la Base Semelle** dans lesquels **DistanceXY:** et **Distance Z:** ont été remplacés par des valeurs nulles. Le tranchage élimine la cloison inutile, la durée devient 2H28m et la longueur de fil 17324mm. Imprimante devenue disponible, la réalisation de cette pièce a confirmé le bienfondé de toutes ces manipulations, et tout particulièrement l'aptitude des formes à laisser tout le tour un passage pour les nombreuses liaisons électriques.

Fig.26

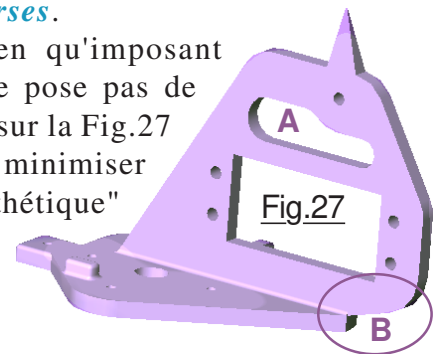


4) Critères de conception des pièces en vue de les imprimer en 3D.

Quelle que soit la technique employée pour élaborer une pièce mécanique, cette dernière apporte des avantages qui justifient les moyens utilisés, et surtout induit des contraintes dont il faut impérativement tenir compte pour éviter les déconvenues lors de la concrétisation du projet. Par exemple en enlèvement de matière par usinage on ne peut pas obtenir des formes creuses fermées, et sur les machines il faut étudier le passage des outils. Procédant par dépôt de matière, les imprimantes 3D présentent leurs exigences propres obligeant le concepteur à prendre certaines précautions pour agencer des pièces viables. Ce chapitre résume quelques constats personnels effectués lors de "la découverte" de la mise en œuvre de ma toute première imprimante 3D.

➤ Contraintes de base.

- Pièces (*JUPE comprise.*) ne dépassant pas la surface du plateau imprimante.
- Éviter au maximum les soutiens sur les pièces imprimées.
- Minimiser les temps d'impression ainsi que la longueur de filament consommé. *Faire des pièces creuses avec un maximum de lumières compatibles avec la résistance mécanique de l'élément.*
- *Prévoir les formes pour impression avec des supports relativement faciles à enlever et ne perturbant pas la qualité d'éventuels textes et graduations diverses.*
- Certaines formes désirées "esthétiques" sont conservées, bien qu'imposant inévitablement des supports, si l'enlèvement de ces derniers ne pose pas de problème particulier. (*Congés de raccordements ...*) Par exemple sur la Fig.27 en **A** se trouve une lumière pour écourter le temps d'impression et minimiser la quantité de fil consommée. En zone **B** le raccordement "esthétique" impose des supports, mais ces derniers sont faciles à enlever.
- La taille des textes est parfois modifiée (*Augmenter les dimensions.*) pour être correctement traitée par le trancheur utilisé.



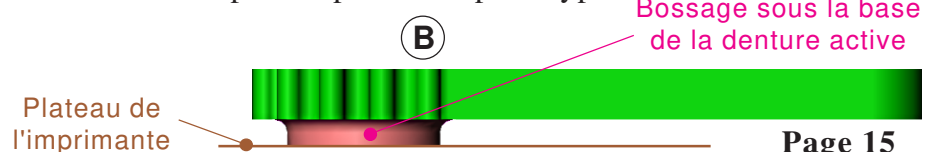
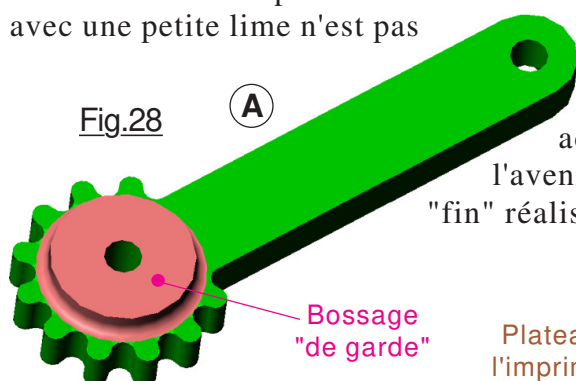
➤ Contraintes complémentaires.

- *Le respect des cotes en hauteur ne sera possible que si l'on adopte une parité convenable entre les dimensions souhaitées et la Qualité imposée au trancher.* EXEMPLE : Avec une qualité de 0.2mm il sera délicat d'obtenir une hauteur 0.1mm, 0,3mm ou 0,5mm. Difficulté analogue pour les diverses lumières et surtout pour les trous fonctionnels.
- Si des orifices de précision sont souhaités, il faut utiliser une surcote qui tiendra compte de l'épaisseur du filament à la dépose et surtout qui permettra d'effectuer un alésage de précision.
- Les pièces dans **Repetier-Host** seront réorientées pour optimiser leur assise sur le plateau et minimiser les soutiens parfois délicats à enlever.
- Les pièces sont parfois orientées pour optimiser la qualité d'impression de certains détails, quitte à augmenter le temps de réalisation. (*En particulier les index des pointeurs de graduations.*)

➤ Pièces cinématiques.

Certains composants tels que les roues dentées constituant un engrenage doivent présenter une géométrie "parfaite" pour pouvoir fonctionner correctement. Hors nous savons que la première couche imprimée sera plus épaisse que les couches supérieures. Il en résulte une petite augmentation de largeurs des objets moulés sur la base qui porte sur le plateau. (*Bavette de semelle.*) C'est exactement le cas pour les bielles motrices de la pince sur **Image10.JPG**. Reprendre les formes avec une petite lime n'est pas

facile, aussi, comme montré sur les Fig.28 **A** et Fig.28 **B** il est fortement conseillé en conception de "surélever" d'environ 1mm la pièce du plateau pour que ses zones actives soient "parfaites". Vous pouvez être certain qu'à l'avenir ce critère sera respecté en C.A.O. ce qui évitera l'ajustage "fin" réalisé sur les petites pièces du prototype.



5) Moulage des pièces et "gestion de la qualité".

Débuter n'est jamais facile et immédiat, il faut s'attendre à des difficultés. L'usage des imprimantes 3D présente de nombreux aspects pas forcément évidents. Du coup, certaines pièces sont absolument parfaites, alors que d'autres présentent des défauts. Dans ce chapitre nous allons examiner quelques cas rencontrés lors de l'élaboration des éléments de notre petit bras manipulateur. En effet, si certaines pièces sont irréprochables, comme le statif d'[Image1.JPG](#) par exemple, d'autres présentent des défauts divers. Avant de les reléguer au rebut, généralement elles peuvent être récupérées moyennant des compromis et parfois quelques traitements spécifiques. Par exemple, la Fig.29A présente le dessous du corps de la pince, c'est à dire la face qui était contre le plateau. En décollant la pièce du plateau, des zones **B** de la première couche n'étaient pas assez soudées au reste de la pièce. On trouve sur le commerce en ligne d'Internet des produits composites qui permettent de passer avec un pinceau une couche de "vernis" incolore très résistant. À l'origine, ces fournitures ont pour but de donner à des moulages de décor un aspect parfaitement brillant, masquant assez bien les effets de tricotage résultant du procédé par dépose de fil thermomaléable. Une excellente vidéo proposée par Mme

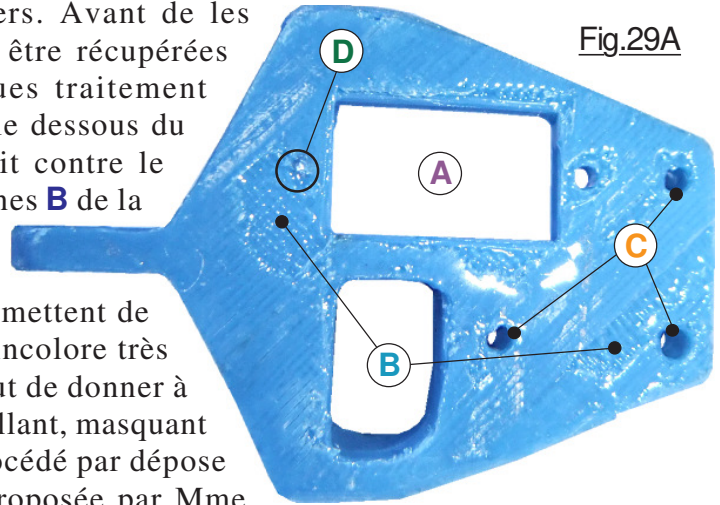


Fig.29A

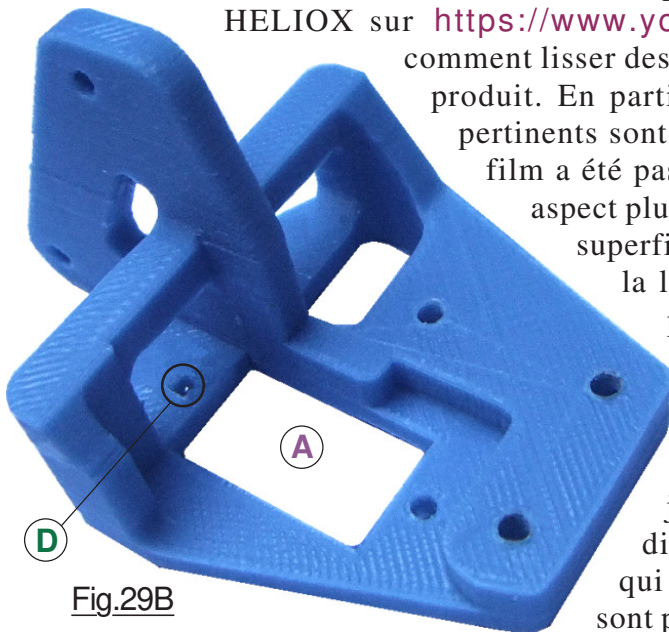


Fig.29B

HELIOX sur <https://www.youtube.com/watch?v=0oXsnx59K00> explique comment lisser des impressions 3D en PLA et indique les références du produit. En particulier des précautions d'emploi particulièrement pertinents sont ainsi proposés : **Un lien à ne pas manquer.** Un tel film a été passé sur la surface en cause, redonnant à la pièce un aspect plus seyant et surtout assurant une résistance mécanique superficielle propice à une assurance de fiabilité. C'est dans la lumière **A** que traverse le corps du servomoteur de pince. L'orifice ne semble pas très rigoureux géométriquement. C'est une fausse impression résultant de la prise de vue en "macro" qui déforme le visuel. On peut vérifier sur la Fig.30 que la lumière est géométriquement correcte. Elle sera juste limée un peu dans les angles pour ajuster les dimensions exactes à celle du corps du servomoteur qui doit traverser "en sifflant". En **C**, les divers trous ne sont pas très rigoureux en forme et en dimension. Du reste,

en **D** le trou de fixation du servomoteur ne traverse pas entièrement la pièce. Ce n'est absolument pas pénalisant, car leurs diamètres en C.A.O. a été volontairement coté pour aboutir à des dimensions un peu faibles. Par simple perçage avec un foret de ϕ 3mm pour les articulations des biellettes et de ϕ 2mm pour la fixation du servomoteur leur octroie une géométrie rigoureuse. Sur la Fig.29B le trou est initialement bouché par le vernis de réparation, il n'a pas été encore réalisé. Cette photographie confirme que globalement cette pièce est très bien "tricotée", seule la face située contre le plateau était excoriée.

➤ La première couche.

Conditionnant directement la stabilité de la pièce sur le plateau et assurant l'adhésion de la pièce en cours d'impression sur ce dernier, la première couche engendre lors des premières expériences des problèmes récurrents. En particulier, le matériau utilisé présente des caractéristiques différentes, non seulement en fonction de sa nature, (PLA, GFIL, ABS ...) mais également en fonction de la couleur des pigments pour un type de filament donné. De ce fait, les températures conseillées par les fournisseurs d'imprimante 3D en fonction des rouleaux de matière figurant dans leurs références commerciales ne sont que des approximations. En fonction notamment de la température dans la pièce où se trouve la machine, et bien d'autres facteurs, il faut adapter la température du plateau chauffant, (Vendu souvent en option mais **INDISPENSABLE.**) et de la tête

d'extrusion. Globalement, on peut estimer que les autres paramètres conseillés pour le trancheur sont corrects. Néanmoins, je ne crois pas que l'on puisse s'affranchir de nombreux essais infructueux pour acquérir une expérience suffisante et arriver à cerner tous les paramètres qui vous assureront un moulage parfait à toutes les tentatives. Considérons pour concrétiser ce propos, l'[Image22.JPG](#) qui présente un cas typique. Cette bielle a été mise au rebut et refaite avec du PLA de couleur vert pomme. Simplement en changeant la couleur du filament, car dans les deux cas le matériau est du PLA, et l'environnement local identique, la pièce imprimée est quasiment parfaite.

➤ Les problèmes mécaniques sur la machine.

Normalement on considère que la machine utilisée pour imprimer est exempte de défauts mécaniques. Pourtant, innombrables sont les causes qui sur le long terme peuvent générer des problèmes, voir dès les premières phases d'utilisation d'une machine. Moudre du thermoplastique en sortie d'une buse constitue l'extrémité d'une longue chaîne fonctionnelle dont chaque maillon peut perturber l'ensemble. L'alimentation secteur instable ou défaillante, les liaisons électriques, les cartes électroniques de pilotage, la mécanique, constituée de moteurs, de courroies, de guidage etc. Chaque élément peut créer un aléa, la sanction sera immédiate en production. Considérons par exemple [Image23.JPG](#) qui montre clairement qu'entre les premières couches situées sur le plateau et le reste de la pièce, il s'est produit un décalage latéral. Il ne peut s'agir dans ce cas d'un problème thermique, c'est une quelconque raison pas forcément mécanique. (Un moteur pas à pas n'a pour effectuer le déplacement. Sous-alimenté, manque de couple, frottements trop importants dans les guidages, électronique défaillante etc) Pour autant, cette pièce présentant une rigidité suffisante et les trous des articulations correctement repercés, a été conservée sur le prototype. Esthétiquement elle n'est pas un modèle, mais 100% fonctionnellement elle assurera sa mission.

Foisonnant dans les références du commerce réparation bien utile : Le stylo à extruder. une tête chauffante et un mécanisme d'extrusion sont initialement prévus pour se divertir en ludique très amusante. Ce type de matériel est En l'occurrence, si j'avais disposé d'un tel bielle montrée sur [Image22.JPG](#). Il aurait fragilisées, de compléter la périphérie percer et vogue la galère. Aussi, pour ma intégrante de l'arsenal d'intervention rapide au passage que percer, tarauder, couper au pas spécialement facile. À l'expérience, car peaufinées, je crois pouvoir conseiller *dégrossir un usinage.*) On ajuste avec rapidement, des phénomènes thermiques compliquent l'ouvrage. Enfin, les limes fines terminent l'ajustement, sachant qu'elles s'encrassent relativement rapidement et qu'il faut carder régulièrement.



Fig.30

en ligne, on trouve un outil de Véritable imprimante 3D, intégrant piloté manuellement, ces ustensiles créant des dessins "filaires", activité parfait pour soigner des pièces douteuses. instrument, je n'aurais pas mis au rebut la suffit de consolider les diverses zones circulaire du trou d'articulation avant de le part l'outil montré sur la Fig.30 fait partie pour sauver des pièces mal formées. Signalons cutter du PLA reste aisé. Limer au contraire n'est nombre de pièces du bras manipulateur ont été l'utilisation d'une lime batarde. (*Lime "rustre" pour vigueur, mais lentement.* Dès que l'on lime trop



IMPORTANT : Ayant réalisé l'ensemble des pièces du bras manipulateur, nous procédons à l'assemblage mécanique pour vérifier le bon fonctionnement des éléments cinématiques. En revanche, il ne faut pas intégrer les servomoteurs, car la validation de l'électronique associée et des logiciels d'accompagnement devra se faire servomoteurs totalement libres dans leurs mouvements. En particulier nous allons devoir les calibrer, opération qui va inexorablement engendrer de la divergence dans les asservissements et générer des rotations continues hors de contrôle.



À l'image du journal télévisées qui ne parle que de problèmes, il ne faut pas non plus ne voir que les difficultés potentielles. Nombreuses seront les pièces qui vont s'imprimer dans la bonne humeur. Attendant ma machine, et commençant à "potasser le sujet", j'ai rédigé une kyrielle de fiches techniques que vous pouvez imprimer et qui certainement pourront se montrer utiles. Elles sont regroupées dans le fichier [Fiches pour imprimer en 3D.pdf](#) joint au didacticiel. **Page 17**

6) Présentation sommaire de la "circuiterie" électronique.

Disposant de l'ensemble mécanique du petit bras manipulateur, le moment est venu d'envisager la concrétisation du pilotage. Anticipant sur la suite de ce didacticiel, pour situer les divers modules électriques et électroniques, considérons la Fig.31 sur laquelle la machine compacte est représenté en vue plongeante. Tout n'est pas en place, loin s'en faut. En particulier le circuit de protection thermique du servomoteur de pince n'est pas encore envisagé à ce stade du développement.

Prototype en cours de mise au point servomoteurs en place. Seuls deux sont reliés au circuit PCA9685.

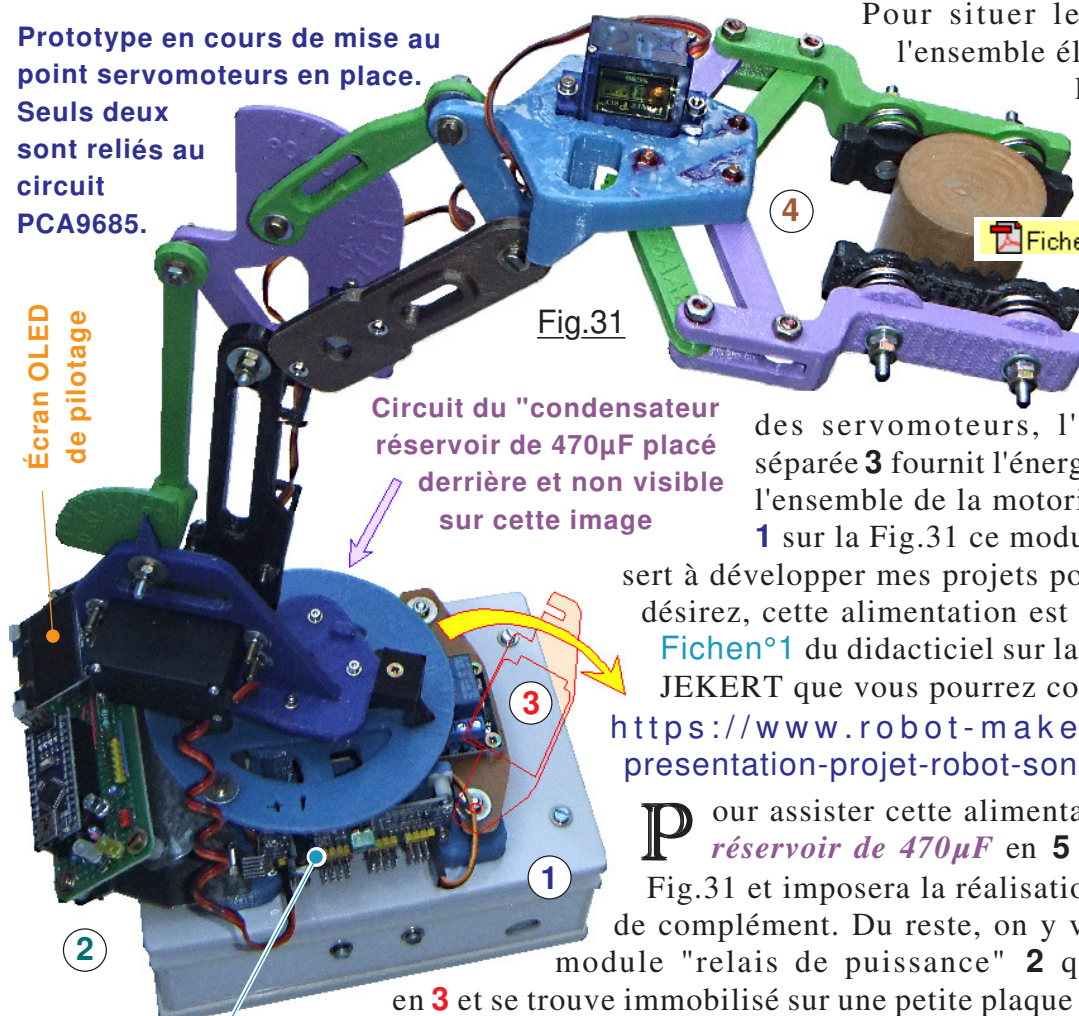


Fig.31

Circuit du "condensateur réservoir de 470µF placé derrière et non visible sur cette image

Fiches du bras manipulateur.pdf

Pour situer les divers modules de l'ensemble électronique, consultons le schéma de câblage global proposé en Page 21 de la fiche ⑩ dans le document

Compte tenu des appels de courant "virulents" générés par la technologie

des servomoteurs, l'alimentation secteur séparée 3 fournit l'énergie de puissance 5v pour l'ensemble de la motorisation. On retrouve en 1 sur la Fig.31 ce module électronique qui me

sert à développer mes projets pour Arduino. Si vous le désirez, cette alimentation est décrite en détail sur la Fichen°1 du didacticiel sur la petite sonde martienne JEKERT que vous pourrez consulter sur le lien :

<https://www.robot-maker.com/ouvrages/presentation-projet-robot-sonde-jekert/>

Pour assister cette alimentation, un **condensateur réservoir de 470µF** en 5 se trouve caché sur la Fig.31 et imposera la réalisation d'un circuit imprimé de complément. Du reste, on y voit également un petit module "relais de puissance" 2 qui ici est observable

en 3 et se trouve immobilisé sur une petite plaque qui grâce à une lumière

Multiplexeur PCA9685 oblongue peut être dégagée en opération d'assemblage ou de maintenance. Le circuit imprimé principal en 2 supporte la carte Arduino NANO ainsi que le petit écran OLED. Non présente à ce stade du développement, sera mise à contribution une électronique de surveillance thermique du servomoteur de pince sous forme d'un petit module commercial 12 associé à un dernier circuit imprimé 9 qu'il faudra étudier et réaliser. En 4 on retrouve la pince avec la charge soulevée.

Considérons la fiche **Affectation des broches d'interface** proposé en Page 14 de la feuille ⑦ dans le document Fiches du bras manipulateur.pdf. On constate que six broches d'interface

du microcontrôleur ne sont pas utilisées. C'est assez rare dans mes réalisations, où généralement 100% des ressources de l'ATmega328 sont employées. Ce "gaspillage" tient au fait que pour cette réalisation, la simplicité technique et l'économie de matériel ont été privilégiées. Du coup, le pilotage du bras manipulateur ne se fait pas à l'aide d'un pupitre dédié. On profite de l'opportunité offerte par l'IDE d'établir un dialogue série sur l'une des lignes USB du P.C. avec la carte Arduino. On bénéficie ainsi de l'écran de l'ordinateur et de son clavier. Pour un projet purement expérimental, cette approche me semble la plus appropriée, car réaliser un pupitre de commande comme celui de la petite sonde martienne JEKERT demanderait autant d'investissement matériel / logiciel que pour le bras manipulateur complet. La Page 15 de la feuille ⑦ décrit en détail le **Schéma électronique de l'interface** Arduino / Bras manipulateur et surtout présente le dessin du **Dessin du circuit imprimé principal**. Ce circuit imprimé est prévu pour une isolation intégrale du reste de l'électronique. Il sera donc relié à son environnement par des connecteurs HE14. Le microcontacteur situé en extrémité de la plaque imprimée constitue le **Bouton d'ARRÊT d'URGENCE**. Passons à la réalisation de ce module autonome avec son afficheur OLED. **Page 18**

7) Réalisation du circuit imprimé principal.

Avant de pouvoir engager l'opération d'intégration des divers modules électriques, nous devons en préambule les étudier en détails, les confectionner et en valider le bon fonctionnement. Comme c'est celui qui pilote l'ensemble de la circuiterie, c'est donc le circuit imprimé réputé "Principal" qui sera en tête de liste. À bien y regarder, il ne comporte que deux condensateurs de découplage, (*Dont les valeurs ne sont absolument pas critiques.*) quelques résistances, quelques LED et les connecteurs HE14. Le composant le plus volumineux de tous est le BUZZER.

➤ **Interprétation des dessins des circuits imprimés.**

Autant vous prévenir qu'il me semble totalement prématuré de passer à la suite si vous n'avez pas imprimé les deux fiches de la feuille ⑦. Elles sont à mon avis indispensables pour effectuer les soudures, et plus tard pour engager la campagne de validation des divers circuits. Le circuit imprimé principal met à contribution une plaque préperçée munie de bandes de cuivre. C'est en coupant ces dernières comme vous pouvez le voir sur la Fig.32 que l'on réalise les isollements électriques indispensables. Les dessins coté composants et face pistes cuivrées des bandes conductrices abusent des couleurs possibles sur l'ordinateur pour différencier la fonction des ces dernières. Globalement le rouge pour le +5Vcc, le

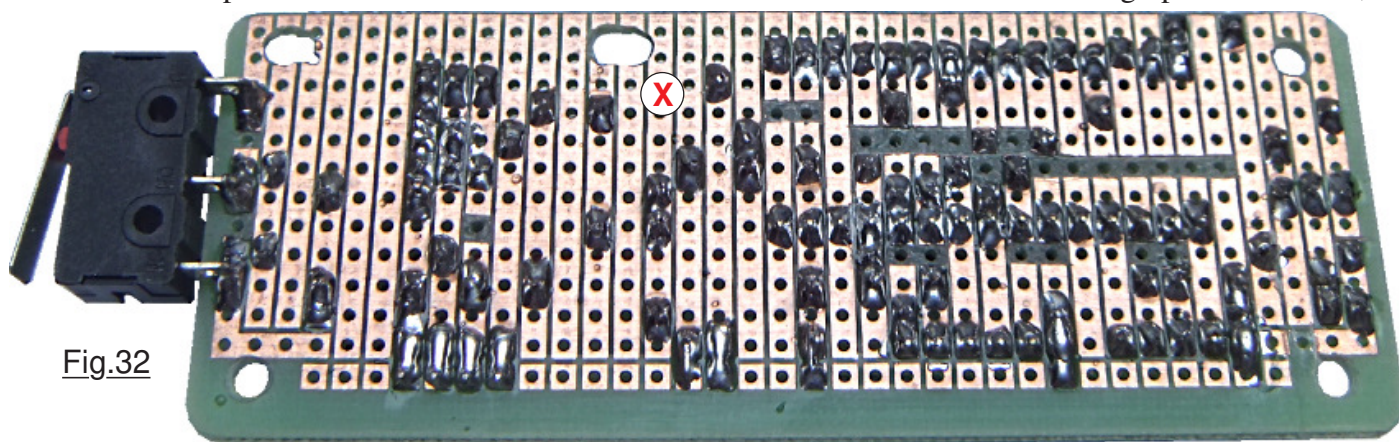


Fig.32

vert pour les pistes non utilisées, le bleu pour GND, le violet pour une ligne d'Entrée/Sortie etc. Le circuit vu coté composants est montré comme si la plaque cuivrée était transparente pour laisser visibles les pistes conductrices. Pour réaliser les petits ponts électriques, on ne peut utiliser que les conducteurs disponibles. Les couleurs des fils sur le dessin ne correspondront pas à ceux de la réalité. Il ne faut pas chercher à établir un lien quelconque entre le dessin théorique et les diverses images. Signalons au passage que le choix du type de microswitch n'est pas innocent. Outre le fait qu'il était disponible des le "stock" des consommables, il est facile à souder à l'horizontale sur le coté de la plaque électronique. Par contre, ne vous trompez pas dans l'orientation. (*C'est ce que j'ai fait : Tenaille, chirurgie et on recommence !*)

➤ **Assemblage du circuit imprimé principal.**

Oopération facile si l'on procède par étapes en respectant une chronologie "logique". Comme une photographie est bien plus parlante qu'un long texte verbeux, nous n'allons pas nous en priver et puiser notre inspiration dans la <Galerie d'images>. La Fig.32 est représentative du résultat à obtenir. La toute première étape consiste à couper les pistes cuivrées. Sur cette photographie les coupures réalisées au "cutter" semblent profondes. Ce n'est qu'une illusion, seul le cuivre de faible épaisseur a été retiré. Puis on réalise les trous de passage de la visserie. Il faut bien faire attention au fait que les deux vis en nylon qui supportent l'écran OLED seront à des espaces qui ne correspondent pas à des dixièmes de pouce. Aussi, pour faciliter le montage le trou situé en X a été allongé pour assurer une facilité de mise en position, sachant que l'on intercalera des rondelles isolantes pour assurer une portée correcte à l'écrou de liaison comme le montre Image25.JPG saisie lorsque le circuit est entièrement achevé. Sur Image26.JPG prise en gros plan dans les mêmes conditions, on peut vérifier que le BUZZER est bien le composant qui influence directement la hauteur à laquelle doit se trouver OLED. En particulier il importe d'observer dans l'encadré rouge que le HE14 mis en évidence en vert clair est de type haut. Sans cette précaution, le buzzer talonnerait sur le dessous du module OLED. Du coup, pour avoir une hauteur convenable, l'entretoise en nylon mise en évidence en bleu est complétée par une rondelle également en nylon surchargée en rouge. Enfin, sur Image27.JPG le condensateur de découplage de 10µF est bien soudé avec la bonne orientation pour respecter sa polarité. C'est assez important, car ce genre de

composant miniature au tantale peut éclater s'il est en inversion de tension, occasionnant un risque pour les yeux. Comble de luxe, une petite bague en isolant de fil électrique est ajoutée à la palette du microswitch pour lui conférer l'allure d'un bouton poussoir. Toutes ces informations avaient pour but de vous faire sélectionner les bons "composants critiques" et d'effectuer un assemblage mécanique provisoire de l'afficheur OLED pour vérifier que tout sera parfait au moment de souder son connecteur HE14. Le "frère" à souder est chaud, il est temps de passer à la suite.

➤ Souder les composants sur le petit circuit imprimé.

Quelques petits détails technique ne peuvent que vous faciliter la tâche. En particulier, un circuit imprimé qui a été stocké sur une longue période s'oxyde. La couleur rouge du cuivre change légèrement de teinte et ce n'est pas évident du tout. Cette minuscule couche d'oxyde constitue l'ennemi numéro un du soudage. L'étain refuse d'adhérer proprement sur la piste cuivrée. On doit insister, ce qui surchauffe les composants. On fait un "gros paquet" pour au final aboutir à ce que les électroniciens nomment une soudure sèche. Pourtant, éliminer ce problème est enfantin. Quand une éponge artificielle a trop souffert, elle commence à se désagréger et part en petits morceaux lors de son usage. Vous en séparez le "gratte avec le dos" et vous obtenez l'outil idéal de la Fig.33 qui frotté avec énergie sur les pistes cuivrées en modifie l'apparence sans pour autant en diminuer l'épaisseur du métal rouge. Devenues plus brillantes, les soudures seront faciles à soigner et mouilleront parfaitement le cuivre et la queue du composant assemblé. *Notez au passage que le fil d'étain de la soudure mise à contribution s'oxyde également. Si vous le frottez fortement avant de vous en servir, les dépôts de résine sur la plaque cuivrée seront bien plus propres.* Pour ma part, je commence par dérouler environ 80cm de soudure de la bobine. Puis je frotte tout le long pour enlever la pellicule périphérique. On peut alors passer sereinement au soudage. (*Qui en réalité est un brasage ... mais laissons tomber!*)

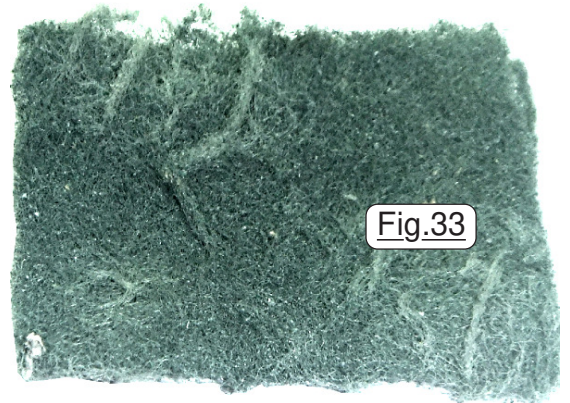


Fig.33

➤ Intégrer les composants "par couches".

Assembler les divers composants sera facile si l'on commence par les moins hauts et que l'on termine par les plus encombrant. Quand ils sont en place, on plaque un carton rigide pour retourner le circuit imprimé sans qu'ils ne tombent, on pose le tout sur le bureau et l'on soude tout ce qui dépasse des pistes cuivrées. Ensuite, on coupe toutes les queues des composants au plus court, et l'on passe à la couche suivante.

La Fig.34 montre que pour cette réalisation le nombre des ponts de câblage est faible. On passe alors à l'épaisseur à peine supérieure, celle des résistances qui sont disposées horizontalement. Observez la Fig.35 surchargée en jaune : La résistance de 10kΩ n'est pas en place car elle a été

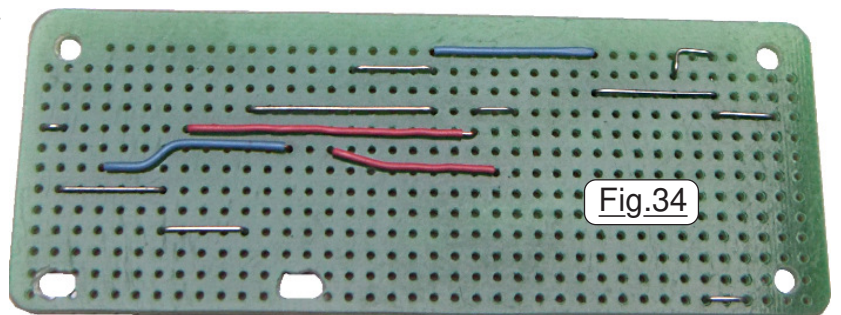
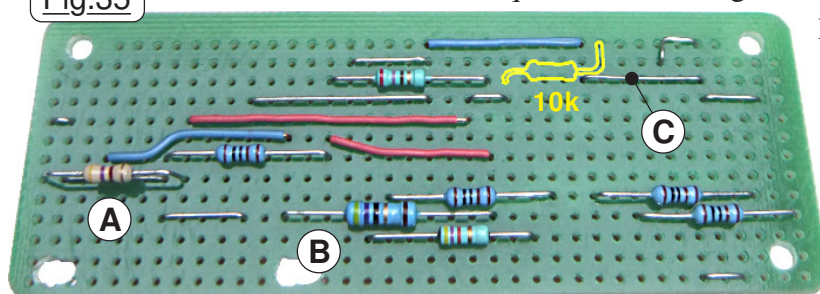


Fig.34

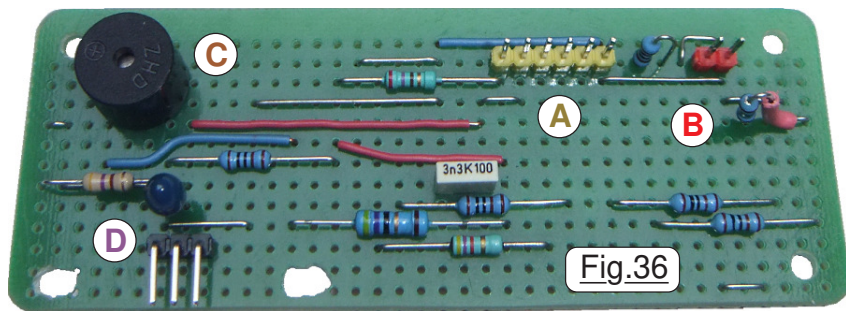
ajoutée bien plus tard quand l'option de surveillance thermique du servomoteur de pince a été envisagée. Visible sur la photographie [Image28.JPG](#) elle ne sera ajoutée qu'à la prochaine couche car située un peu au dessus du pont filaire **C** elle est surélevée. C'est en particulier le cas de la

Fig.35



résistance située en **A** qui est soudée également au dessus d'un pont filaire. On le voit

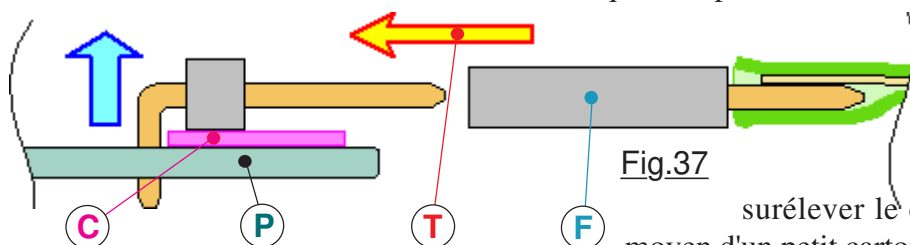
parfaitement sur [Image29.JPG](#) saisie en "macro". En **B**, la résistance de 47Ω qui limite la puissance sonore sur le BUZZER est visiblement plus volumineuse que les autres, pouvant dissiper 1/2W au lieu d'un quart de Watt. Ce choix n'est pas fonctionnel. Il se trouve que dans les réserves de composants,



il n'y avait pas de modèle plus petits. Prenez garde au fait que sur les images tout semble gros. Ce n'est qu'une apparence, dans la réalité il faut manipuler cette quincaillerie avec des pincettes, ou sous une autre forme, manipuler avec soins. La suite consiste à souder les connecteurs

HE14 verticaux comme celui qui est jaune en **A** ou son voisin rouge. On ajoute simultanément le condensateur au tantale et son acolyte de 3,3nF qui présentent des hauteurs analogues. Puis, légèrement plus hautes, c'est le tour aux résistances montées en épingles, c'est à dire verticales. Il importe de noter que celle de 1kΩ à droite en **B** doit avoir la queue proche du corps et coudée pour dégager au dessus du trou de droite traversé pour effectuer la soudure. Avant de former ce composant glisser un isolant, car dans la prochaine étape la LED double sera juste au dessus, il faudra éviter tout contact électrique intempestif avec cette dernière. Enfin, on termine par le BUZZER en **C**.

Pour souder les petits connecteurs HE14 coudés comme celui situé en **D**, la procédure est un peu particulière. Considérons la Fig.37 sur laquelle en **P** se trouve le circuit Principal et en **F** la fiche femelle de la liaison filaire extérieure. Pour que l'on puisse insérer facilement **F** sur le connecteur coudé



par la translation **T**, il faut qu'entre le HE14 femelle et le circuit imprimé **P** subsiste un petit jeu. Pour aménager un petit écart suffisant, la technique consiste à

surélever le connecteur coudé (*Flèche bleue.*) au moyen d'un petit carton **C** provisoire (*En rose sur le dessin.*)

au moment d'effectuer la soudure le total étant maintenu en place par une pince auto serreuse. Veiller à ce que les broches soient bien parallèles à **P**, ou légèrement vers le haut pour faciliter l'introduction de **F**.

➤ Les LEDs et le support de la carte Arduino NANO.

Particulier à ce circuit imprimé, pour des raisons d'encombrement et de cohabitation, deux LED doivent être décalées latéralement, *spécificité mise en évidence par les flèches noires sur le dessin de la plaque électronique qui précisent le sens du déport*. Pour la LED verte du mode APPRENTISSAGE, il s'agit de la dégager de la petite carte Arduino NANO qui la surplombe en partie. Bien visible sur [Image30.JPG](#) (*Le circuit est terminé sur cette photographie.*) on comprend le pourquoi de cette dissymétrie. Pour la LED double, on peut constater sur [Image31.JPG](#) qu'elle est "assise" sur la résistance de 1kΩ, artifice obligatoire car il faut impérativement dégager la zone de la fiche micro-USB qui alimentera la carte Arduino et va servir au dialogue série avec l'opérateur. La photographie d'[Image32.JPG](#) sur laquelle la protection thermique n'est toujours pas d'actualité, justifie pleinement la posture particulière de cette diode électroluminescente double. On remarque que sa voisine, la LED rouge du B.P. d'URGENCE est enfermée dans un boîtier cristal, ce qui m'incite à ouvrir ici une parenthèse. *Les valeurs des résistances de limitation de courant pour les LEDs portées sur le schéma et sur les dessins ont été sélectionnées pour obtenir des luminosités équivalentes. Je vous invite fortement, avant de souder ces composants, d'effectuer vous-même des essais pour choisir les valeurs les mieux adaptées au rendement lumineux de vos composants.*

Souder les deux lignes HE14 femelle qui supportent la petite carte Arduino NANO suggèrent une procédure un peu particulière. L'assemblage des deux lignes de contacts **A** et **B** sur la Fig.38 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 en vérifier l'alignement rigoureux des trente broches. Puis j'insère les deux connecteurs **A** et **B** qui sont ensuite positionnés sur notre circuit imprimé. On retourne le tout et l'on soude les quatre picots d'extrémité. Les deux lignes **A** et **B** étant alors parfaitement placées, on enlève la carte électronique NANO Arduino et l'on achève le soudage des 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

ATTENTION : Sur cette photographie qui montre le circuit imprimé principal en fin d'assemblage, le microswitch est soudé à l'envers ! Les essais n'ont pas encore été effectués, et vont imposer de "le détruire" pour épargner la plaque électronique et de le remplacer.

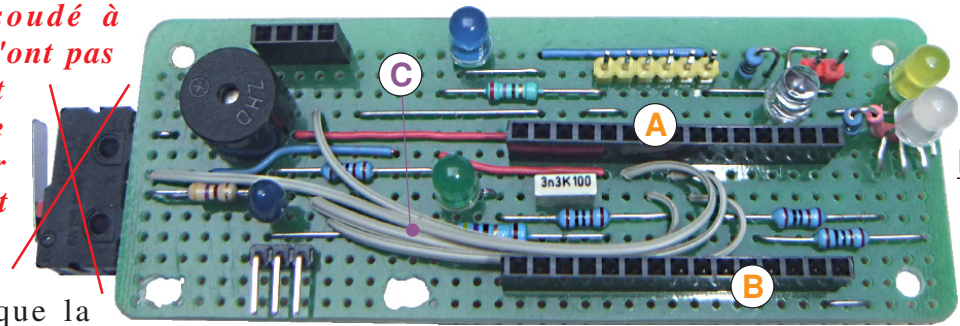


Fig.38

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. Les deux lignes **A** et **B** de connecteurs femelle HE14 présentent une hauteur moyenne. Il faut impérativement que la petite carte électronique entièrement enfichée, il reste entre ses composants situés sur le dessous et les éléments du circuit imprimé une place suffisante. Pour vous donner une idée plus précise, la hauteur des éléments sélectionnés pour équiper le prototype fait 8mm. Remarquez que certains ponts filaires en **C** un peu long et "trop croisés" avec le reste des composants sont réalisés avec du fil souple suggérant quelques précisions :

Réalisation d'un pont filaire avec un fil souple sur un circuit imprimé.

L'opération de branchement proprement dite n'est pas particulièrement délicate, et n'exige qu'un peu de doigté et de la patience. Fil à fil on réalise les liaisons en veillant à ce que la longueur des lignes soit assez courtes tout en assurant une soudure sans contrainte. *Généralement, la difficulté réside dans le dénudage des extrémités.* Pour ne pas galérer, pour ma part j'utilise des limandes de raccordement pour ordinateur. Séparant fil à fil nous obtenons des conducteurs idéaux pour réaliser nos ponts de câblage. *Pour dénuder, rien de plus simple. Le fil est mis en contact avec la pointe fine du fer à souder qui fait fondre transversalement la moitié de l'isolant. Puis avec l'ongle on pince l'extrémité de la gaine grise et en tirant "tout doux" le fil se dénude.* On peut ainsi préparer le fil alors qu'il est déjà soudé à une extrémité. Au départ j'en prends plus long qu'il ne faut. Puis un coté étant soudé il devient facile de déterminer la longueur "juste ce qu'il faut". On coupe, on dénude, on soude et vla le truc ... c'est fait !

Pour achever la réalisation de la carte électronique principale, on va anticiper sur l'évolution ultérieure et ajouter le petit connecteur HE14 **C5** et la résistance associée de **10kΩ** qui serviront à compléter l'ensemble par la protection thermique du servomoteur de la pince. Comme déjà signalé, pour ma part, j'ai été obligé d'enlever le microcontacteur et de le remplacer en orientant correctement le nouveau composant. L'opération chirurgicale s'est très mal déroulée, et la piste cuivrée s'est décollée de la plaque isolante comme le montre [Image33.JPG](#). Cette tragédie ne se finit pas trop mal, car les deux cosses d'extrémité assurent une liaison suffisamment résistante. OUF ... le patient est sauvé ! Il me semble important de souligner qu'il faut réaliser une soudure bien englobante sur les cosses de ce bouton poussoir, car ce sont elles qui assurent la liaison mécanique rigide avec le circuit imprimé.

➤ La validation de la carte électronique principale.

Puisque le fer à souder est chaud, dans la foulée il serait possible de réaliser les circuits de complément, les limandes de raccordement, et attendre de disposer de l'intégralité des modules pour commencer la campagne d'essais. Mais nous sommes dans un contexte de loisir dans lequel la plus haute priorité, c'est de se faire plaisir. Par ailleurs, quand le module principal aura fait ses preuves, on aura bien avancé, et pour le moral c'est important. On peut effectuer une majorité de vérifications dès maintenant, car, comme cela a été précisé, la carte principale est autonome. Avec frénésie et fébrilité, on imprime les fiches dont on aura besoin. *(Personnellement, je les ai toutes imprimées, car l'expérience montre qu'un petit carton est bien plus commode que d'avoir à redémarrer l'ordinateur, rechercher le bon fichier perdu dans la jungle des dossiers ...)* En particulier la fiche **Vérifications et validation du circuit principal** de la feuille (11) est incontournable. Comme elle a été ajoutée bien après la rédaction du document, elle n'est pas documentée dans la "table des matières" de la page de garde. Avec rigueur et méthode, vous allez réaliser toutes les manipulations comprises entre 1) et 14) incluse. **ATTENTION :** Il n'est absolument pas question d'effectuer ces nombreuses vérifications alors que les divers servomoteurs sont inclus dans la

mécanique du bras et ce pour au moins deux raisons :

- Comme la calibration des servomoteurs n'a pas été effectuée, par moment ***leurs asservissements vont diverger s'ils reçoivent des consignes hors plage valide. Dans un tel cas de figure, ils se mettent à tourner en continu.*** S'ils sont intégrés au bras, ils vont aller en butée et si l'on n'intervient pas assez rapidement, ils vont surchauffer, le phénomène pouvant aller jusqu'à leur destruction.
- Manipuler les divers module pour vérifier, brancher, débrancher va rapidement constituer une galère sans nom si l'ensemble est intégré sur le support de base du bras manipulateur. ***Les essais se font confortablement avec des branchements provisoires, les divers modules étant bien étalés à plat sur un espace de travail raisonnable.***

Vous allez rapidement vous rendre compte que pour franchir toutes ces étapes vitales, presque toutes les fiches s'imposent entre vos mains.

Pour achever ce chapitre et mettre à votre disposition un maximum d'informations visuelles, [Image34.JPG](#) présente la carte électronique "vue par la tranche". Enfin, sur [Image35.JPG](#) le circuit imprimé principal est dans la configuration "écran OLED en place". C'est à dire que globalement les essais de validation ont tous été effectués et l'orientation du microswitch corrigée. Pour situer le complément qu'il faut avoir effectué pour ajouter par la suite la surveillance thermique, la photographie est surchargée en jaune. Quand vous aurez passé avec succès ces nombreuses étapes, vous aurez validé presque entièrement l'électronique du circuit imprimé principal mais également les logiciels associés. Un cap décisif sera franchi et l'avenir s'annoncera avec sérénité ...

8) Les deux circuit imprimés de complément.

I nutile d'en "tartiner" des pages relatives au multiplexeur. Pour ceux qui le désirent ses caractéristiques et la façon de le mettre en œuvre sont détaillées dans les deux fiches dédiées de la feuille ⑧. Il sera ainsi facile d'établir un lien entre les instructions du programme d'exploitation, ainsi que les divers branchements électriques à effectuer. Quand à son intégration sur le bras manipulateur, il se monte directement sur le statif les trous prévus à cet effet étant disposés avec les entraxes correspondant sur le coté repéré par la lettre "M".

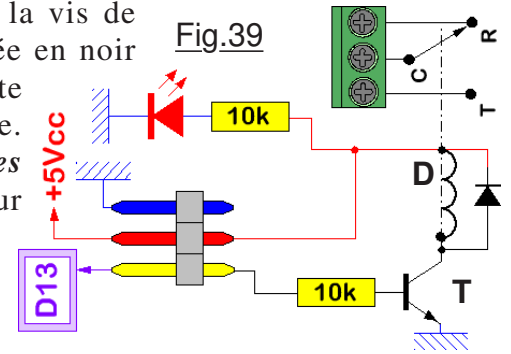
➤ Le circuit imprimé du condensateur réservoir".

P eu encombré, il ne comporte fonctionnellement que le condensateur polarisé de 470µF qui assiste l'alimentation de puissance quand les servomoteurs engendrent de forts appels de courant lors des transitoires durant les phases d'accélération. Comme on disposait de la place, car la longueur du circuit imprimé correspond à celle du statif, les trois connecteurs HE14 relatifs au servomoteur de Hanche ont été ajoutés. Les deux borniers assurant les liaisons électriques débitant des ampérages notables sont disposés de façon à faciliter le passage des fils qui vont vers le relais de puissance et vers le multiplexeur. En particulier une échancrure est pratiquée à la lime pour laisser un passage suffisant entre la plaque cuivrée et la voûte du statif. Consultez la fiche ***Alimentation électrique des divers modules*** de la feuille ⑩ qui fournit le dessin agrandi de ce module. Pour faciliter le développement et la mise au point, une LED rouge a été ajoutée pour témoigner de la présence du +5Vcc sur le condensateur, donc avant le disjoncteur piloté par programme avec la commande 'p'. Sur [Image36.JPG](#) le bras manipulateur est achevé et complet. On peut y situer les éléments principaux, et en particulier les fils électriques de forte section qui véhiculent des courants importants.

➤ Le circuit imprimé du relais de puissance.

I ntercalé entre l'alimentation de laboratoire et le multiplexeur, il permet, à la demande de l'opérateur, de couper l'énergie de puissance sur les servomoteurs. Cette faculté s'avère appréciable lors de la mise au point du programme, en opérations de maintenance ou en utilisation normale du bras manipulateur. En particulier quand on enregistre un programme de postures, et que l'on se contente de simuler les mouvements sur l'écran graphique. Pour diverses raisons techniques, je ne suis pas favorable à l'utilisation des relais électromagnétiques, car leurs contacts peuvent charbonner sur le long terme, ils provoquent des parasites hertziens et des surtensions qu'il faut drainer par des diodes dites "de roue libre". Néanmoins, comme il s'agit d'un projet ludique qui ne fonctionnera pas 24H sur 24 toute l'année, par raison de simplicité j'ai utilisé un petit circuit qui trainait dans un lot de modules expérimentaux pour Arduino. La place étant disponible de l'autre coté du statif par rapport au circuit imprimé principal, le petit module est immobilisé

sur une plaque isolante, (*En fait un morceau de plaque cuivrée.*) qui sera fixée sur les vis qui assurent la liaison du statif avec l'alimentation de puissance. Quand les écrous de serrage sont libérés, cette pièce pivote coté multiplexeur autour du trou de passage de la vis de liaison. Coté "condensateur de 470 μ F" une lumière représentée en noir sur [Image37.JPG](#) permet de dégager ce circuit, ce qui facilite considérablement les opérations d'assemblage et de maintenance. Pour assurer la portée correcte des écrous, des **rondelles plates larges** sont intercalées dessus et dessous des deux cotés. Pour celles et ceux qui n'ont pas à leur disposition le petit circuit du commerce, il est enfantin d'en créer un équivalent. La Fig.39 en donne le schéma, les valeurs des éléments ne sont pas critiques. La diode **D** est une 1N4002 choisie car elle est disponible dans le tiroir des composants de récupération, et pour le transistor **T**, prendre un 2N1711 ou tout équivalent comme le 2N2222 par exemple. Pour ma part, je me passerais royalement de la LED rouge qui n'apporte pas grand chose en terme d'information technique si ce n'est que le +5Vcc est présent. En avons-nous vraiment besoin ?



9) Ça va chauffer !

Grande différence entre théorie et pratique, sur le papier c'est toujours d'une simplicité poétique. C'est beau comme un discours politique, rigoureux comme la table de multiplication et d'une évidence qui ne souffre pas la polémique. On assemble, on respecte militairement les protocoles, les procédures, le contenu des notices et hop ... yapluka tester. Dans notre cas, c'est la fermeture de la PINCE qui constitue la pierre d'achoppement. Explications :

Que ce soit la pince avec les mors sur ressorts, ou celle simplifiée, dans les deux cas, soulever la charge impose d'exercer un effort de pression. La seule façon mécanique d'y parvenir consiste à imposer au servomoteur un angle de serrage qui conduirait en théorie à un écartement des mâchoires un peu inférieur à celui de l'épaisseur de la pièce à saisir. Ne pouvant atteindre sa position, l'asservissement va envoyer du courant dans le minuscule moteur électrique jusqu'à atteindre l'orientation de consigne. Mais la mécanique est en butée positive, la cinématique est bloquée. Le mécanisme va forcer au maximum, car un moteur électrique bloqué, quel que soit sa taille, se comporte comme un court-circuit. Toute l'énergie part en chaleur et la température va augmenter inexorablement. En théorie, il suffit de couper l'alimentation de puissance du servomoteur lorsque la PINCE est serrée, le réducteur de vitesse à engrenages étant irréversible, l'ensemble maintiendra le serrage, et le petit bloc bleu va redescendre en température. **Ça c'est la théorie !** Mais dans la pratique, lorsque l'on coupe l'alimentation de puissance, l'asservissement à un petit hoquet. Très court, mais suffisant pour relâcher un tantinet la prise ... **et la charge retombe au sol.** Dommage !

Conclusion : Tant que la machine doit serrer la charge il faudra impérativement maintenir l'énergie sur le servomoteur de PINCE, et minimiser la durée des périodes de serrage au maximum. Si vous préférez, dès que la pince est fermée sur un objet à soulever, engager immédiatement les mouvements destinés à la redéposer à sa position d'arrivée. Dès que l'on provoque l'ouverture des mors, immédiatement couper l'alimentation en puissance du servomoteur de PINCE pour lui ménager des périodes de refroidissement. C'est exactement ce que l'on fait par exemple, avec les moteurs asynchrones qui subissent de fréquents démarrages.

Reste qu'à l'usage, vous allez vous rendre compte rapidement que l'on oublie inexorablement la PINCE, obnubilé par le pilotage des mouvements, les commandes pour enregistrer les postures, les séquences programmées. Le temps passe, et le moteur souffre en silence. Quand on sent l'odeur caractéristique d'une électronique qui surchauffe, c'est trop tard. Le petit mécanisme est bon pour la décharge, l'intérieur du corps devenu très chaud est entièrement "fondu".

D'un point de vue pragmatique, il n'est pas question de mobiliser l'attention de l'opérateur à la surveillance d'un thermomètre. L'électronique et l'informatique sont là pour assurer cette mission, à l'instar du thermostat qui régule la température dans le réfrigérateur. Qui dit surveillance automatisée implique un certain nombre de fonctions à assurer. La première consiste à mesurer le phénomène surveillé, soit dans notre cas une température. Puis, mesure effectuée, comparer le paramètre à une valeur de décision définie par le concepteur. Enfin, en fonction du résultat de la comparaison, agir sur l'environnement en fonction des programmes associés.

➤ Mesurer la température.

Innombrables sont les solutions techniques qui visent à mesurer, ou à réguler une température. Pour mesurer cette dernière, l'une des plus utilisée consiste à employer une thermistance CTN associée à un circuit électrique élémentaire architecturé comme un pont diviseur de tension. On obtient un équivalent analogique de la température captée, sous forme d'une tension représentative.

- *Dis Totoche, c'est quoi une cétéenne ?*

- *Une CTN Dudule, ce sont des initiales.*

- *Ça veut dire C'est Techniquement Nébuleux ?*

- *Mais non Dudule, pour avoir tous les détails pratiques, prends immédiatement la fiche de la feuille ⑨ intitulée Mesure de la température du servomoteur.*

- *Haaa oui, ya aussi la fiche Détermination logicielle de la température et j'y pompe rien !*

Autant pour la fiche *Mesure de la température du servomoteur* il ne faut pas faire l'impasse, autant pour l'aspect calcul et logiciel on peut repousser à plus tard, avec l'espoir confus qu'il sera possible d'oublier définitivement cette fiche maudite. Rassurez-vous, seules et seuls seront concernés les fanas de la programmation. Le tout petit module présenté sur la Fig.1 n'est utilisé ici que parce qu'il trainait dans les "bricoles" pour Arduino. Il est vraiment facile à se procurer sur Internet. Comme nous n'utilisons que la résistance CTN, n'importe quel modèle du commerce présentant des caractéristiques voisines conviendra parfaitement. Du reste, toutes les références en ligne ont des caractéristiques équivalentes ... c'est du cousinage ! Voisines, mais pas identiques, y compris si vous approvisionnez un clone du module impliqué sur le prototype. *Il faudra par conséquent OBLIGATOIREMENT ajuster quelques paramètres dans le logiciel d'exploitation.* C'est incontournable, facile, et décrit dans le prochain chapitre, c'est promis.

➤ Capter la température.

Passons à l'aspect concret. Que ce soit le composant du petit module de la Fig.1 sur la fiche nommée *Mesure de la température du servomoteur*, ou d'une quelconque résistance CTN, dans tous les cas le corps d'épreuve prend globalement l'aspect d'une goutte d'eau assortie de deux longs fils rigides pour la relier électriquement aux circuits de gestion. L'idéal consisterait à la placer directement dans le stator métallique du moteur électrique.

On perce de servomoteur à l'endroit idoine, on introduit la CTN, on l'immobilise avec une résine thermoconductrice et le tour est joué. Idéal sauf que le servomoteur est foutu, avant d'avoir vu sa température augmenter d'un seul degré Celsius ! Bon, on oublie l'idéal et l'on cogite un compromis techniquement raisonnable. Nous allons tâter la température sur le corps du servomoteur en favorisant au maximum la conductibilité thermique entre ce dernier et la CTN. Sur la Fig.40 les fils de sortie 8 du servomoteur sont laissés provisoirement "dans le vide". Le petit module du commerce en 2 dont on

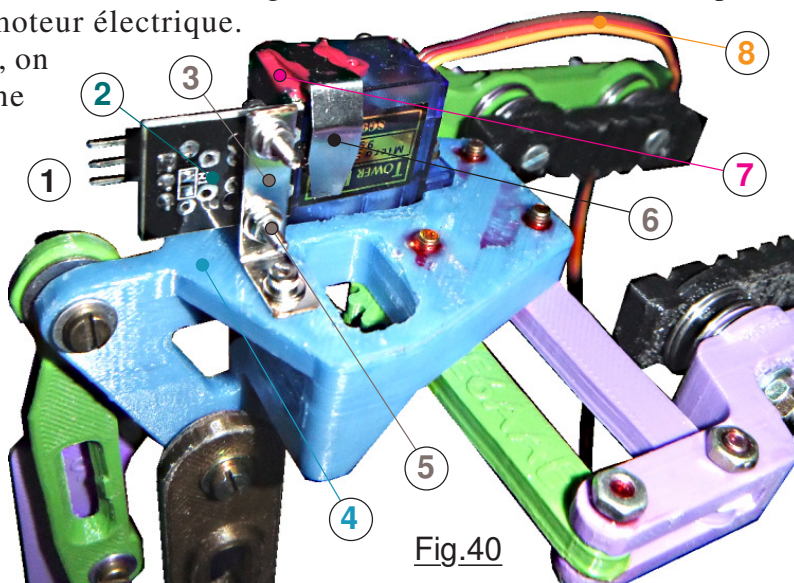


Fig.40

n'utilise que la résistance CTN est immobilisé sur l'équerre support 3 en intercalant deux entretoises isolantes. Un petit boulon ϕ M2 solidarise à son tour l'équerre 3 sur le corps de pince 4. En 1 le module n'est pas encore relié à l'automatisme par son connecteur HE14 dont on n'utilisera que deux broches. La thermistance CTN est plaquée par un léger pincement contre le corps du servomoteur par la bride 6. Bride et thermistance sont copieusement barbouillées de graisse dite "au silicone" (*Spécial électronique.*) qui améliore considérablement la conductibilité calorifique. Comme la bride 6 très élastique ne demande qu'à s'échapper vers le haut, elle est collée sur le corps du servomoteur par du vernis à ongles 7 qui une fois solidifié pérennise de façon simple cette liaison mécanique. Maintenant que le capteur est solidaire de l'ensemble PINCE, il reste à le relier électriquement à un module de mesurage et d'asservissement, thème traité dans le paragraphe qui suit.

Coté face, même combat. On retrouve sur la Fig.41 les éléments principaux du dispositif de surveillance thermique. En particulier on distingue nettement entre l'équerre **3** et le circuit **2** les entretoises isolantes constituées d'écrous ϕ M2 en nylon. Moins évident, en **9** on devine les deux fils rigides qui viennent de la thermistance CTN pincée entre le corps du moteur **10** et le clips métallique **6**.

➤ Comparer puis agir.

Agir ... certainement, mais pas n'importe comment. Si une surchauffe met en danger le moteur, il faudra inévitablement couper la puissance sur ce dernier. Toutefois, nous savons que cette coupure de l'énergie engendrera inexorablement la libération de la charge qui tombera à la verticale jusqu'à trouver un obstacle à son évaison. Aussi, on se doute qu'avant de déclencher cette parade automatiquement, il importe d'avertir l'opérateur pour lui laisser le temps matériel de déposer proprement la charge en prenant manuellement les commandes. Le logiciel prend en compte deux seuils critiques. Le premier se situe à 36°C, température à partir de laquelle un avertissement prévient l'opérateur qu'il doit immédiatement déposer la charge saisie par le bras manipulateur. Le deuxième seuil est ajusté à 38°C valeur qui déclenchera la disjonction d'alimentation de la PINCE. Cette action est automatique et ne peut être contrée par l'opérateur, évitant ainsi le risque d'endommager le SG90. Ce n'est pas un drame, si le petit cylindre en bois tombe sur le bureau, roule et poursuit sa chute au sol sous l'armoire. En revanche, avoir à changer la motorisation, ce qui est arrivé sur le prototype, est autrement plus agassif, et a déclenché la prise de décision d'ajouter le dispositif de protection.

Enfin, outre l'automatisation de la coupure d'énergie, informer reste un pléonasme en automatisation. Aussi, sur plusieurs pages écran du petit afficheur, la température mesurée sera indiquée en numérique, et également en graphique sous la forme d'un thermomètre symbolique. En particulier en feuille ③ la fiche *Les différentes PAGES sur l'écran OLED*. 2/3 présente la **PAGE8()** qui fournit ces informations. Également présente la symbolique graphique est reprise sur la **PAGE5()** : *Les différentes PAGES sur l'écran OLED*. 3/3. Reste que surveiller la santé du petit servomoteur est une priorité forte. La température sera donc prise en compte en permanence, y compris durant les phases d'attente d'une commande au clavier, ou durant le déroulement d'une séquence automatique. Si cette dernière est un peu longue, il peut donc arriver qu'une disjonction thermique se déclenche "inopinément". Aussi, avant de valider un APPRENTISSAGE par exemple, vérifier que la température actuelle n'est pas trop proche des seuils de décision. Pour information, les valeurs des comparaisons de 36°C et 38°C ont été déterminées expérimentalement, rien n'interdit d'en adopter des différentes, au prix de modifications des pages écran et représentations graphiques.

➤ Le disjoncteur thermique.

Situé en aval du disjoncteur de puissance, il est composé un petit relais ILS piloté directement par la broche analogique **A3** fonctionnant en sortie binaire. En feuille ⑤ le recto de la fiche *Gestion de la surchauffe du "servomoteur pince"* propose les protocoles d'intervention en cas d'avertissement thermique ou de disjonction, et surtout, le verso décrit en Fig.1 le schéma électronique retenu et en Fig.2 le dessin du petit circuit imprimé associé. Toutes les explications sont détaillées sur cette fiche. Nous savons que l'opportunité d'un peu de place disponible a été saisie pour ajouter l'interruption le l'alimentation en puissance du moteur de HANCHE en **9** de la fiche déjà mentionnée *Alimentation électrique des divers modules*, et inséré une LED rouge qui s'illumine quand la disjonction thermique est active On peut s'étonner de la valeur forte de 10k Ω pour limiter le courant dans ce composant optronique. Comme ce témoin lumineux présente un très bon rendement, et qu'il est de nature "MASER" plus que diode électroluminescente, la luminosité est plus que suffisante. Toute diode de redressement peut remplacer les 1N4002 sélectionnées car disponibles. **Page 26**

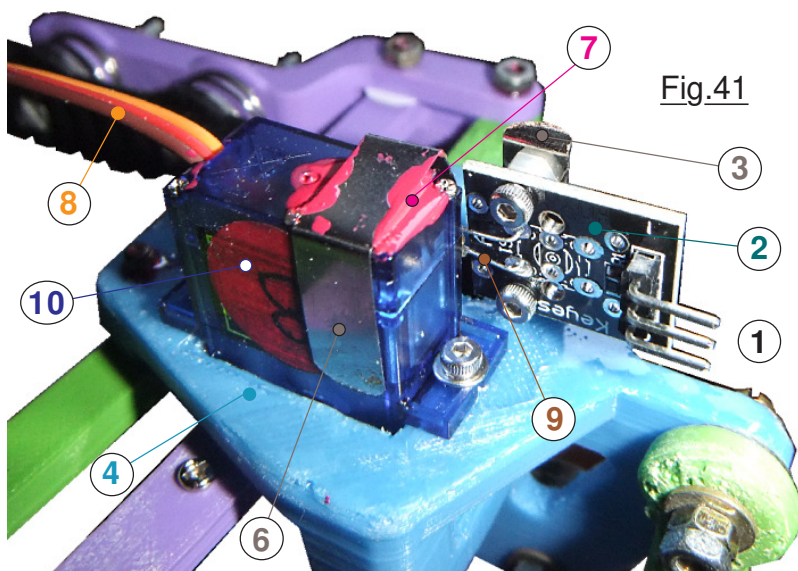


Fig.41

Changement de technologie, le circuit du disjoncteur thermique utilise des circuits imprimés à "pastilles circulaires" que l'on trouve à loisir en "fouinant" le commerce en ligne. L'avantage, c'est qu'il n'y a plus à couper des pistes linéaires. Ces produits sont "double face". On se contente de souder les composants, en se servant souvent des queues de ces derniers comme piste conductrices. Le montage photographique de l'[Image38.JPG](#) suffit à comprendre les techniques de réalisation. Les pistes réalisées avec du fil de cuivre rigide pour câblage sont soudées aux extrémités et éventuellement sur quelques pastilles intermédiaire si nécessaire. La grosseur du fil utilisé est directement fonction de l'intensité véhiculée. Si le courant est notable, employer un fil plus gros que celui sélectionné pour du signal informatique ou pour alimenter une LED.

Adapter les valeurs à votre réalisation.

Globalement, l'intégralité des valeurs proposées sur les schémas électroniques conviennent. Il reste toutefois quelques éléments dont on devra éventuellement adapter les valeurs. Par exemple les valeurs des deux condensateurs de découplage sur le circuit imprimé principal ne sont pas du tout critiques. On puise dans les ressources disponibles un condensateur au tantale d'au moins 10µF en vérifiant que sa tension de service soit suffisante. Pour le découplage "hautes fréquences", 22nF, 33nF, toutes ces valeurs conviennent, c'est plus l'encombrement et la disponibilité qui vont conditionner son choix. Il s'agit d'ajouter des condensateurs de découplage sur l'énergie d'alimentation. Ces derniers ne sont pas obligatoires. J'en place toutefois systématiquement, par raison de discipline technique et par sécurité. Leurs valeurs ne sont absolument pas critiques. Ce n'est que pour illustrer le dessin du circuit imprimé que les valeurs de ceux qui y figurent sont indiquées.

L'autre adaptation probable consiste à sélectionner les résistances qui limitent le courant dans les diverses diodes électroluminescentes. Le rendement des composants que vous allez insérer ne seront pas forcément identiques à celui des éléments sur mon prototype. Donc, je vous suggère de tester différentes valeurs de résistance pour obtenir avec chaque couleur une luminosité qui convient parfaitement à vos désirs. Ceci étant précisé, les valeurs de mon schéma devraient convenir.

10) Paramétrages informatique pour l'adaptation logicielle.

Incontournable, heureusement pour vous cette étape bien que cruciale ne sera vraiment pas délicate à conduire avec succès. De plus, divers programmes utilitaires sont ajoutés au didacticiel pour rendre élémentaire cette phase logicielle. Philosophiquement, l'opération consiste à fournir au programme d'exploitation des valeurs qu'il ne peut pas déterminer lui-même. On fournit ainsi des constantes numériques, (*Numériques ou chaînes de caractères ...*) sous forme de directives du genre `#define identificateur valeur`. L'*identificateur* est un nom qui désigne la constante, et qui doit symboliser de façon évidente la grandeur concernée. La *valeur* qui suit l'*identificateur* est généralement un nombre. En fonction de ce que l'on fournit, ce dernier sera automatiquement interprété comme un entier ou un `float` par le compilateur. Ces valeurs risquent fort de se voir ajustées ou modifiées à plusieurs reprises durant le développement logiciel. C'est la raison pour laquelle il est très important de toutes les regrouper dans une zone parfaitement délimitée et en tête du code source. Pour repérer facilement les lignes de code, ces dernières sont généralement terminées par un commentaire précisant la nature de la donnée, suivi d'une ribambelle de `@@@@@@@@@@@@@@@@` très facile à retrouver quand le texte défile à l'écran de l'éditeur de l'**IDE**.

Normalement, quand on désire mesurer une tension comme c'est le cas sur **A7** par exemple, on doit utiliser des résistances de précision, ces dernières n'étant pas forcément faciles à trouver ou d'un prix d'achat notable. Hors l'informatique élimine royalement cette contrainte, car on prend des composants ordinaires à 5% de précision. Et, par logiciel on ajuste des constantes pour obtenir la précision de mesure maximale compatible avec la définition des convertisseurs analogiques numériques de l'ATmega328. Dans ces conditions on peut aisément atteindre mieux que 0,5% en précision, à condition toutefois d'avoir une référence fiable pour effectuer les manipulations. C'est à dire un multimètre capable de mesurer au moins à cette finesse. Soyons honnête, ici rechercher une telle rigueur est strictement hors propos, toutefois, la méthode sera strictement identique le jour où l'application envisagée le méritera. Nous allons posément passer en revue les divers paramètres à initialiser dans le programme **P07_Programme_Complet.ino**, et surtout la méthode à adopter pour en déterminer les valeurs, la [Fig.42](#) recopiant l'une des deux zones des définitions concernées.

➤ Constantes d'ordre général.

Présentes dans tout programme un tant soi peu cossu, elles concernent divers items et en particulier les constantes pour "appointer" les résistances servant à mesurer des éléments électriques. La Fig.42 reproduit cette section de déclarations, dont la nature est clairement identifiée par le commentaire ①. Sur ce listage, les identificateurs sont coloriés en vert et les valeurs numériques associées en violet. En ligne ② la valeur est une chaîne de caractère, donc coloriée en bleu pour copier l'éditeur de l'IDE. Préciser la date de développement d'un programme peut sembler "flonflon". L'expérience de la programmation durant plusieurs décennies m'a prouvé que cette information

Fig.42

```

① //----- Constantes du programme -----
② #define Version_PGM "15-11-2019" //@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
③ #define Calibre_U_moteurs 5.7 // Calibrage du diviseur potentiométrique d'entrée. @@@@@@@@@@
④ #define Calibre_U_Thermistance 4.57 // Calibrage du pont diviseur de la thermistance. @@@@@@@@
⑤ #define Limite_U_capteur 1.77 // Seuil de déclenchement thermique. (38°C) @@@@@@@@@@@@@@
⑥ #define Seuil_avisement 1.85 // Seuil d'avertissement thermique. (36°C) @@@@@@@@@@@@@@
⑦ #define Position_Seuil 82 // Position_Seuil = 22 + ((Température seuil-33) * 12) @@@@@@@@@@
⑧ #define Position_Seuil_sur_GRAPH 110 // P_S_s_GRAPH = 65 + ((Température seuil-33) * 9) @@@@

```

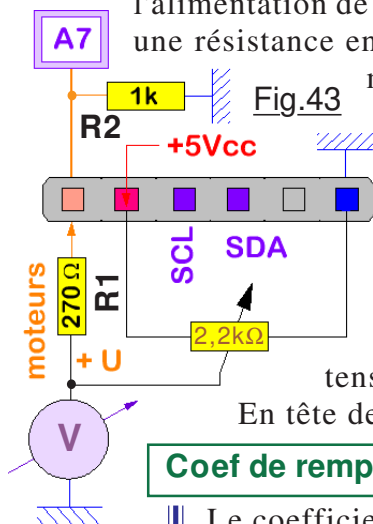
dérisoire peut prendre toute son importance, et en particulier quand on a "ventilé" les fichiers sur plusieurs disques durs externes pour des raisons de sécurité. Arrive forcément le jour où vous constatez que tous n'ont pas forcément la bonne date. Lequel est le bon ? Le dernier est-il bien celui publié sur Internet ? (N'oubliez-pas que le développement logiciel s'effectue sur plusieurs mois et que régulièrement on "dispatche" ... pas forcément sur tous les supports.)

Les ligne ③ et ④ sont relatives à un thème commun, celui du calibrage des ponts de mesures.

➤ Calibrer des shunts de mesurage.

Opération élémentaire, la seule obligation réside dans la possession d'un multimètre précis et fiable. Pour illustrer ce propos, nous allons commencer par la mesure de la tension fournie par l'alimentation de puissance, avec pour préambule impératif la *lecture du contenu de l'encadré situé en page 30*. L'entrée analogique A7 est chargée de cette mission. Comme la tension à mesurer fait 5V, on penserait qu'il est possible de l'injecter directement sur A7. Ce n'est pas idéal, car

l'alimentation de puissance peut fort bien se voir ajustée à plus de 5V par erreur, intercaler une résistance en entrée protégera l'électronique interne au microcontrôleur. Si l'on veut mettre à contribution une plage importante de CAN, il ne faut pas trop diminuer la tension U. En reprenant les éléments précisés dans l'encadré de la Page 30 : $R2 / (R1 + R2)$ on déduit une valeur pour la constante égale à : $1 / (1 + 0.27) \approx 0,7874015$. On obtiendra exactement 5v théorique sur la broche An pour 6.35v en entrée U.



(Tension calculé avec : $5 / 0,7874015 \approx 6.3500006$)

Cette tension exacte de 6.35v engendrera une numérisation de valeur entière 1023. Donc, le coefficient théorique pour obtenir la valeur de la tension réelle exprimée en volts est : Coefficient théorique = 6.3500006

En tête de programme on place la directive `#define Calibre_U_moteurs 6.35`

Coef de remplacement = Coef actuel / Valeur affichée * Valeur réelle mesurée.

Le coefficient actuel (Théorique.) est de 6.3500006

La valeur affichée est de 5.5v

La valeur réelle mesurée avec un multimètre fiable est de 4.93v

Le coefficient à adopter est de $6.3500006 / 5.5 * 4.93 \approx 5.69$ arrondi à 5.7 valeur corrigée qui est actuellement introduite dans le programme du prototype :

`#define Calibre_U_moteurs 5.7`

Notez au passage que pour effectuer la manipulation, on se contente de récupérer le +5Vcc disponible sur le connecteur HE14 et l'on peut ajuster la tension avec un potentiomètre de 2,2kΩ. Il faut utiliser une valeur faible, pour minimiser la perturbation par la sortie, sur le curseur fortement "chargée" par la résistance de 1270Ω constituée par le pont diviseur.

Globalement, pour déterminer le coefficient de la directive ④ on procède de façon totalement analogue, sauf que cette fois, le pont diviseur est constitué par une résistance **R2** qui présente la particularité de voir sa valeur varier en fonction de la température. S'engager dans de belles formules pour calculer un coefficient initial, puis le corriger après une manipulation de mesurage n'est pas une approche optimale, car la valeur de **R2** n'est pas connue. On peut éventuellement la mesurer, mais alors la méthode ne sera pas plus rigoureuse. Aussi, l'approche la plus pragmatique consiste à utiliser une instruction qui détermine directement la valeur de la tension compte tenu des caractéristiques du CAN. Puis, multimètre en témoin on compare la réalité à ce qu'affiche le programme et l'on calcule alors la valeur du paramètre de correction. La logique du logiciel invite à écrire une fonction qui à son appel retourne directement sous la forme d'un **int** (Car le CAN traitant sur 10 BITS retourne par nature un nombre entier.) la valeur de la tension mesurée. Pour cette approche, la première forme d'écriture en C++ pour cette fonction serait :

```
int Tension_capteur_temperature() {return analogRead(Entree_thermistance) * 5 / 1023;}
```

Comme l'instruction débute par l'indication du type de variable, il s'agit d'une fonction et non d'une procédure. Cette dernière retournera un entier. On se doute que **Tension_capteur_temperature** est l'identificateur de cette fonction, et dans cette dernière **Entree_thermistance** précise la broche du microcontrôleur dont on va utiliser le CAN. Dans les déclarations, **#define Entree_thermistance 15** précise à **P07_Programme_Complet.ino** que l'entrée concernée sera **A1**. Quand on effectue un échantillonnage avec **analogRead** le CAN retournera, **théoriquement**, la valeur 1023 si en entrée on injecte exactement **5Vcc**. Puis, le "Sketch" étant téléversé sur le microcontrôleur et affichant le résultat du traitement sur l'afficheur OLED, avec le montage élémentaire de la Fig.44 on compare cette donnée à la réalité. Il y a une très forte probabilité que **dans la pratique** on constatera une différence. En effet, une conversion Analogique vers Numérique impose à l'électronique de traitement de comparer la tension mesurée à une tension de référence interne au microcontrôleur. Par défaut, sur Arduino NANO c'est la valeur de la tension d'alimentation **+Vcc** qui sert de référence. Hors une prise USB n'est pas une alimentation de laboratoire et on peut facilement trouver des valeurs comprises entre 4,85 et 5,25v. Un terme correctif sera alors nécessaire pour "rétablir la vérité". On peut alors déterminer facilement par un calcul de proportionnalité la valeur d'un **coefficient multiplicateur de correction**. Comme cette constante est fractionnaire, l'instruction va forcément retourner une grandeur numérique de genre **réel**, son type devient un **float** :

```
float Tension_capteur_temperature()
{return analogRead(Entree_thermistance) * Calibre_U_Thermistance / 1023;}
```

Comme sur la prise USB de l'ordinateur utilisé on trouve un peu moins de **5Vcc**, le CAN retourne une valeur légèrement supérieure à celle réellement mesurée. La constante de correction nommée **Calibre_U_Thermistance** est donc un peu plus faible que la valeur théorique de **5** et appliquant la formule **Coef de remplacement = Coef actuel / Valeur affichée * Valeur réelle mesurée** qui reste valable on en déduit la valeur de la directive :

```
#define Calibre_U_Thermistance 4.57 // Calibrage du pont diviseur de la thermistance.
```

➤ Dédire de la tension sur A1 la valeur de la température.

A partir du moment où l'on désire établir un lien entre une valeur numérique et un phénomène physique, il nous faut forcément un moyen de mesurer ce dernier. Considérons le tableau de la Fig.3 sur la fiche **Comportement du capteur de mesure thermique** de la feuille ⑨. On commence par établir ce dernier, ce qui impose de chauffer à convenance la thermistance. Un sèche-cheveux fait merveille. Pour établir la relation entre la tension mesurée sur **A1** et la température, on se débrouille pour disposer d'un thermomètre "à mercure" de petite dimension. Pour ma part, j'ai retiré la colonne en verre contenant l'alcool rouge du support en bois d'un modèle "rustique". Je dispose ainsi d'une petite tige en verre facile à immobiliser bien en contact thermique avec la bride **6** sur les Fig.40 et Fig.41 sachant que le flux d'air chaud sera relativement homogène dans toute la zone soufflée.

Mesures précises avec Arduino.

Chaque fois que l'on désira effectuer le mesurage d'un paramètre physique avec Arduino, nous serons inévitablement confrontés au problème de la calibration de la chaîne de Conversion Analogique Numérique. L'ATmega328 met à notre disposition jusqu'à huit CAN en fonction de la carte électronique utilisée. Ces circuits sont conçus pour fournir une valeur numérique comprise entre 0 et 1023 lorsque la tension sur la broche d'entrée varie entre 0 et +5Vcc. Le mesurage consiste à transformer le phénomène à évaluer en une tension variant dans les limites du CAN. Envisageons la Fig.1 agencée pour mesurer la tension fournie par un panneau solaire pouvant aller jusqu'à 20V.

➤ Choix des résistances du pont diviseur.

Matériellement, une solution banale consiste à organiser un pont diviseur de tension constitué de deux résistances R1 et R2 sélectionnées pour optimiser la conversion Analogique vers Numérique.

C'est à dire, que dans l'idéal, lorsque le capteur fournit la tension la plus élevée, celle qui sera présentée à l'entrée An avoisinera +5Vcc pour bénéficier de toute la plage de "calcul" du CAN.

Conception du pont diviseur : Les valeurs des deux résistances doivent être élevées pour ne prélever qu'un courant infime au regard du reste du montage. Pas trop importantes non plus car une impédance élevée engendre une sensibilité accrue aux parasites potentiels qui éventuellement pourraient se superposer au signal utile et perturber la mesure. Globalement il faut diviser par : $20 / 5 = 4$. En adoptant les valeurs courantes de la Fig.1, le rapport théorique est de $R2 / (R1 + R2)$ soit une constante de $15 / (15 + 47) \approx 0,2419354$. On obtiendra exactement 5v théorique pour 20.66667v sur la broche An. (Calculé avec : $5 / 0,2419354 \approx 20.66667$)

Cette tension exacte de 5v engendrera une numérisation de valeur entière 1023. Donc, le coefficient théorique pour obtenir la valeur de la tension en volts se déduit de :

Coefficient théorique = $20.6667 / 1023 \approx 0,020202$.

Donc en tête de programme on place la directive :

```
#define Correction_U_Solaire 0.020202
```

➤ Calibration logicielle précise.

Compte tenu de la dispersion de caractéristiques de tout composant électrique ou électronique, il est probable que les valeurs des deux résistances ne seront pas exactement de 15kΩ et de 47kΩ, et le rapport de division sera légèrement imprécis. Il suffit d'effectuer une mesure précise de la tension appliquée et d'affiner la valeur du coefficient de calcul par la formule :

$$\text{Coef de remplacement} = \frac{\text{Coef actuel}}{\text{Valeur affichée} * \text{Valeur réelle mesurée.}}$$

Prenons comme exemple la valeur de Correction_U_Solaire pour la mesure de la tension aux bornes des cellules photovoltaïques. Pour optimiser la mesure on ajuste une alimentation stabilisée au maximum envisagé de 20v : (Portée maximale de la valeur mesurée.)

Le coefficient actuel (Théorique.) est de 0.020202

La valeur affichée est de 19.19v

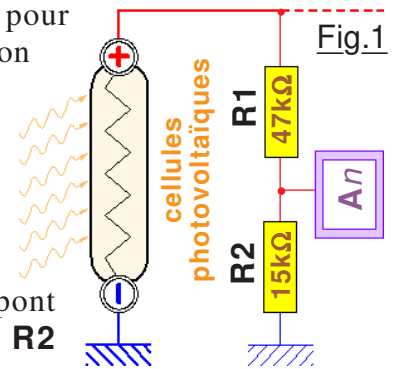
La valeur réelle est de 20.0v

Le coefficient à adopter est de $0.020202 / 19.19 * 20 \approx 0.0210547$ arrondi à 0.02105
valeur corrigée qui sera introduite dans le programme :

```
#define Correction_U_Solaire 0.02105
```

NOTE : La précision du multimètre utilisé dans cette application est exagérée. On peut largement se contenter d'un modèle qui ne donne que deux ou trois chiffres significatifs.

Résultats mesurés sur le prototype : Il faut tenir compte de la non linéarité du convertisseur CAN. Aussi l'optimisation consiste à adopter le coefficient de correction qui favorise la tension "nominale". Dans le cas analysé la zone à privilégier se situe entre 17v et 18v, tensions les plus couramment présentes sur les cellules du panneau solaire pris en exemple.

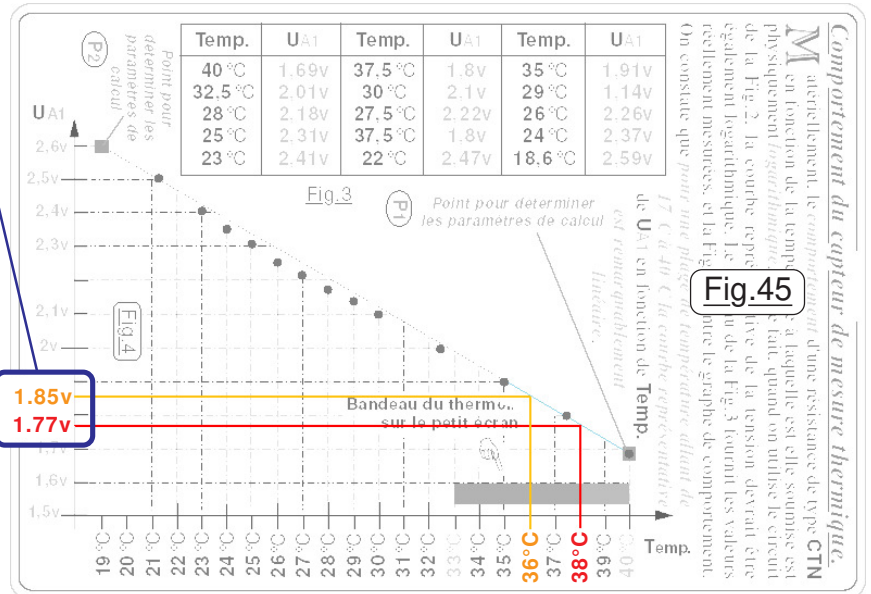


Lorsque un graphe analogue à celui de la Fig.4 sur la fiche **Comportement du capteur de mesure thermique** de la feuille ⑨ aura été établi, il sera aisé de déterminer les constantes des directives ⑤ et ⑥ de la Fig.42 pour définir les derniers paramètres "généraux".

Fig.42

③ #define Limite_U_capteur 1.77 // Seuil de déclenchement thermique. (38°C) @@@@
 ④ #define Seuil_avertissement 1.85 // Seuil d'avertissement thermique. (36°C) @@@@

Il importe dans ce propos de remarquer que pour définir les seuils qui vont déclencher l'avertissement opérateur à 36°C et de 38°C pour la disjonction thermique, on utilise la tension mesurée et non la valeur de la température. Pour le programmeur, la température serait plus "naturelle", car c'est le paramètre physique à surveiller. Toutefois, dans le programme, la donnée objective est la tension mesurée, donc plus précise car non "impactée" par une inévitable approximation générée par du calcul sur des valeurs de type float.



Pas la peine de se prendre la tête pour les deux directives ⑦ et ⑧ de la Fig.42 qui concernent uniquement le positionnement sur l'écran graphique des pixels du thermomètre symbolique. Ces deux directives ne font qu'établir une correspondance entre les valeurs extrêmes 33°C et 40°C choisies par le programmeur pour la plage de températures visualisées, et la position de la "colonne de mercure" visualisée sur la matrice de PIXELs de **PAGE6()** et de **PAGE8()** sur OLED. Au final, il faut cinq pages de "palabres" pour expliciter la procédure de calibration de deux ou trois paramètres, qui vont dans la pratique se résumer à deux ou trois mesures suivies de l'ajustement de deux ou trois constantes suite à deux ou trois petits calculs de proportionnalité. Et bien pour le bloc de données vitales relatives aux servomoteurs ... c'est encore plus simple !

➤ Paramétrages informatiques pour la motorisation

Bien délimité par deux lignes de commentaires et par "un encadré d'étoiles", le bloc de directives recopié sur la Fig.46 peut impressionner par le nombre de paramètres définis. Ce n'est qu'une illusion pour "faire peur", car il est infiniment plus simple à renseigner que pour les paramètres généraux. En effet, ici il n'y a pas besoin de brancher des appareils de mesures ou un thermomètre. Quand aux manipulations, elles sont d'une simplicité déconcertante.

Truc pour faire peur !

☹ ☹ ☹ ☹ ☹
 C'est juste de la "frime" !
 🎵 😊 🎵

```
//----- Paramétrage des servomoteurs -----*
#define Pos_m_P 30 // Position angulaire minimale pour la PINCE. *
#define Pos_M_P 90 // Position angulaire Maximale pour la PINCE. *
#define Csn_m_P 373 // Consigne minimale pour la PINCE. *
#define Csn_M_P 264 // Consigne Maximale pour la PINCE. *
#define *
#define Pos_M_H 90 // Position angulaire Maximale pour la HANCHE. *
#define Csn_m_H 439 // Consigne minimale pour la HANCHE. *
#define Csn_M_H 89 // Consigne Maximale pour la HANCHE. *
//-----*
```

Fig.46

La fiche **Paramètres d'adaptation du logiciel au matériel** de la feuille ⑩ précise en détails la nature de chaque identificateur. Quand le bras manipulateur est totalement opérationnel, c'est à dire que la **Vérifications et validation du circuit principal** a été entièrement effectuée, y compris le **Protocole de mise en service du bras**, on se familiarise avec les commandes USB. Quand on a grosso modo bien cerné les diverses instructions, on passe en pilotage **Mouvements indiqués en mode CONSIGNE** avec la commande '!'. Puis, en évitant d'envoyer des valeurs qui engendrent la divergence de l'asservissement, on réalise un tableau analogue à celui de la Fig.1 en remplaçant les valeurs de consigne pour les moteurs du prototype par celles relatives à votre motorisation. Il ne reste plus qu'à remplacer dans le bloc de la Fig.46 les huit paramètres de type Csn par les vôtres. **Pour mémoire, ces manipulations se font avec les servomoteurs non intégrés sur le bras manipulateur.**

11) L'intégration des systèmes.

Enfin on va pouvoir assembler la mécanique, réunir toutes ces pièces moulées et fixer les servomoteurs sur l'ensemble qui va prendre de la consistance. C'est méga frustrant d'avoir tous ces beaux composants en couleur éparpillés sur l'établi, alors qu'il nous tarde d'observer la magie du système technicoscientificoludique. On se doute que la route sera progressive et l'on avancera module par module. Dans un premier temps la carte Arduino ainsi que les circuits complémentaires resteront répartis sur le bureau et réunis électriquement par des longs fils provisoires. On commence par le servomoteur de HANCHE **3** immobilisé sur le statif **2** au moyen des vis **1** et **4**. Prendre garde au fait que les vis **1** coté graduations sont de type F90 alors que celle en **4** sont à têtes cylindriques fendues. Les quatre petits boulons ϕ M3 qui immobilisent le servomoteur **3** sur la base **2** servent également à solidariser le plateau gradué **5** qui vers l'arrière présente les deux orifices **A** et **B** servant à immobiliser la plaque supportant le circuit imprimé principal. Ensuite, on assemble à part l'ÉPAULE **7** avec son palonnier **8**. Puis on réalise les trois articulations libres entre le support **11** du servomoteur du COUDE, l'accouplement **9** et l'Humérus **10**. On vérifie que ces trois liaisons pivot tournent librement et "sans point dur".

On poursuit avec l'articulation entre l'accouplement **9** et le corps de l'épaule **7** et on s'assure de sa libre rotation. Lorsque toutes ces rotations mécaniques sont confirmées, on assemble le servomoteur **6** sur **7**, on accouple son palonnier avec **10** et l'on peut passer aux essais de la motorisation. Cette phase va imposer d'avoir correctement orienté le palonnier par rapport à l'arbre de sortie cannelé du servomoteur **6**. On sera éventuellement amené à parfaire l'ajustement des paramètres informatique pour que les commandes 0° et 90° du pilotage correspondent au mieux avec les graduations sur **9**. Pour achever l'assemblage du Mécano, on commence par monter les différents éléments de la PINCE comme montré sur la Fig.49 sans la bielle motrice. On vérifie que le sous-ensemble **16**, **20** et **19** soit parfaitement mobile par rapport à **15** le corps de la PINCE. On ajoute alors le servomoteur **17** et son palonnier **18**. On peut alors introduire la bielle motrice non présente sur ce dessin. On procède aux essais moteur de ce module. Si nécessaire on réinsère avec la bonne orientation le palonnier **18** sur l'arbre de sortie strié de **17** et l'on affine s'il le faut les paramètres logiciel pour que PINCE ouverte les bielles soient perpendiculaires au plan moyen de la PINCE. Il ne reste plus qu'à assembler le servomoteur **14** du COUDE sur **11**. Puis, après mise en place du Radius **12** et de l'Accouplement radius **13** on procède à la validation comme pour les autres mobilités. Quand le total est pleinement opérationnel, on implante la HANCHE par son palonnier **8** sur le servomoteur **3** et l'on termine les essais en calibrant la rotation de la HANCHE.

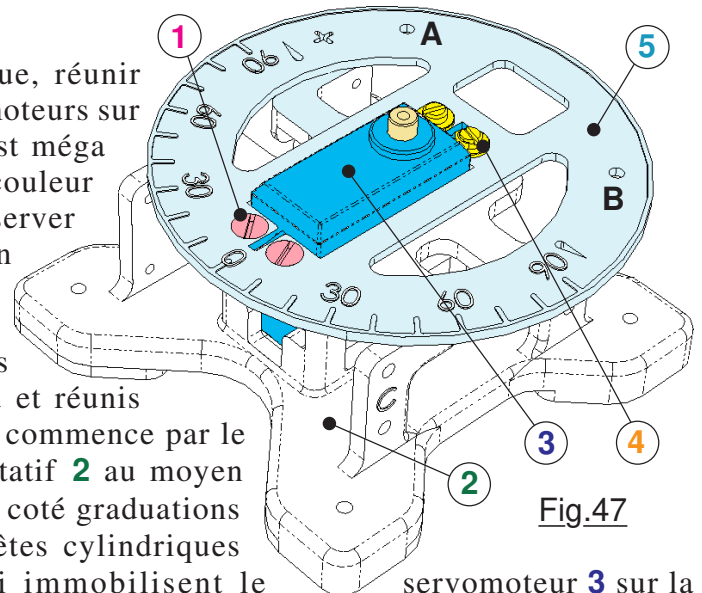


Fig.47

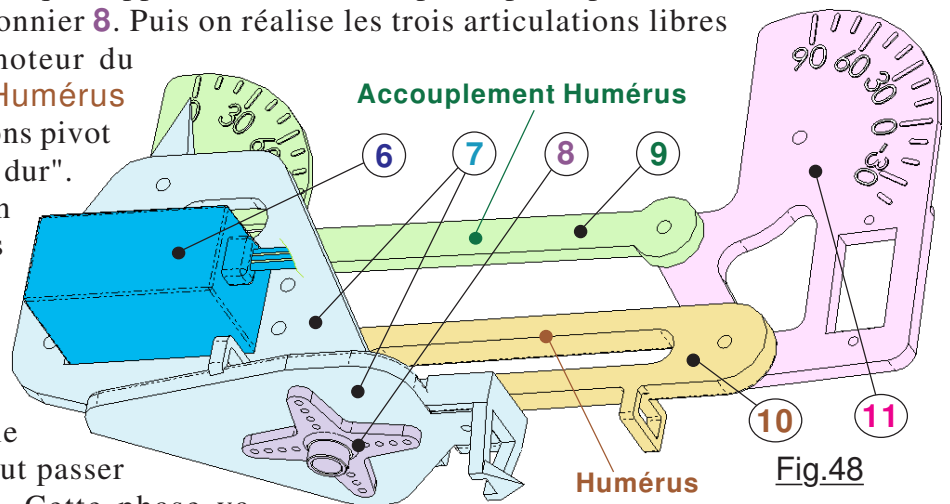


Fig.48

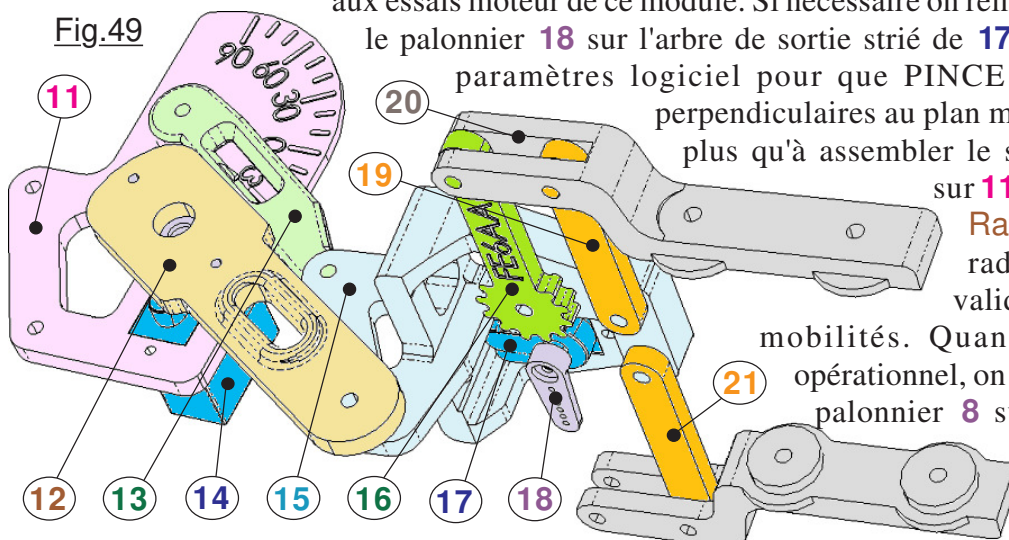


Fig.49

➤ Rêvons un peu.

Prémonitoire ce rêve de la Fig.50 avec le petit bras manipulateur entièrement terminé, alors que pour le moment tous les circuits imprimés encombrant le bureau. Cette image fugitive qui va s'évaporer dès que nous allons nous réveiller montre que la mécanique s'est faite belle. Les bigoudis ont été sortis du placard pour coiffer tous ces fils qui semblent vouloir s'agripper comme le lierre sur le tronc d'un vieux chêne. Compte tenu du nombre de fils membres de ce bras ne veut pas que la avec les diverses avec méthode, et tout mobilité de la HANCHE qui au tournant. Pour simplifier la tâche, on utilise au maximum des nappes de fil en évitant autant que possible les fils élémentaires qui une fois torsadés pour former des torons restent plus "vulnérables" que des nappes de liens soudés entre eux sur toute la longueur, comme c'est le cas pour les liaisons des servomoteurs par exemple. Outre le "boudinage" de plusieurs limandes comme c'est le cas en **Y** de la Fig.50 par exemple, des "passes-fils" sont prévus sur l'**Humérus**, et sur le corps de l'**ÉPAULE**. Pour soutenir le "paquet" de fils **Y** à la bonne hauteur favorisant des rotations sans problème, en **X** une petite patte support métallique a été bricolée et immobilisée sur l'**ÉPAULE**. Elle n'est pas très visible sur la Fig.50

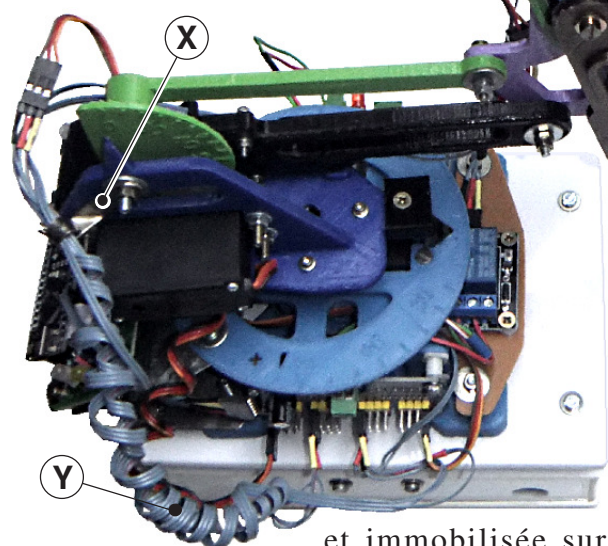


Fig.50

contrairement à ce que l'on peut observer sur [Image39.JPG](#) saisie en gros plan. Noter au passage que malgré le fait que la résistance de limitation de courant de la LED rouge du bouton d'arrêt d'Urgence fasse **1kΩ**, à l'usage elle se montre encore trop lumineuse, raison pour laquelle un petit morceau de papier cintré en masque l'encapsulage. Quand on observe [Image39.JPG](#), on pourrait penser que l'écrou qui immobilise la petite pièce support des fils bloque l'articulation. Naturellement il n'en est rien. Considérons la Fig.51 sur laquelle le jeu de fonctionnement axial **J** est exagéré pour mieux le situer. La vis **1** associée à une rondelle plate standard elle même en appui sur une rondelle plate large **2** sert de butée gauche à l'articulation de l'**Humérus 9**. La butée droite est constituée de la rondelle plate **3** qui s'appuie sur l'écrou **4**. Quand on assemble cette liaison pivot, on visse l'écrou **4** sur **1** en laissant le jeu **J** minimal, et suffisant pour obtenir une rotation douce et "sans frottement". Puis on enfle le total sur le corps de l'**ÉPAULE 8** en intercalant la rondelle plate large **7**. On met en place la patte support de câblage **5** et l'on serre l'écrou **6** en maintenant **4** immobile. La vis **1** qui sert d'axe d'articulation est ainsi en encastrement rigide avec tout en laissant un faible jeu de fonctionnement axial à l'**Humérus 9**. On retrouve un tel agencement mécanique sur la plupart des pivots de ce mécanisme, vous pouvez vous en inspirer à profusion.

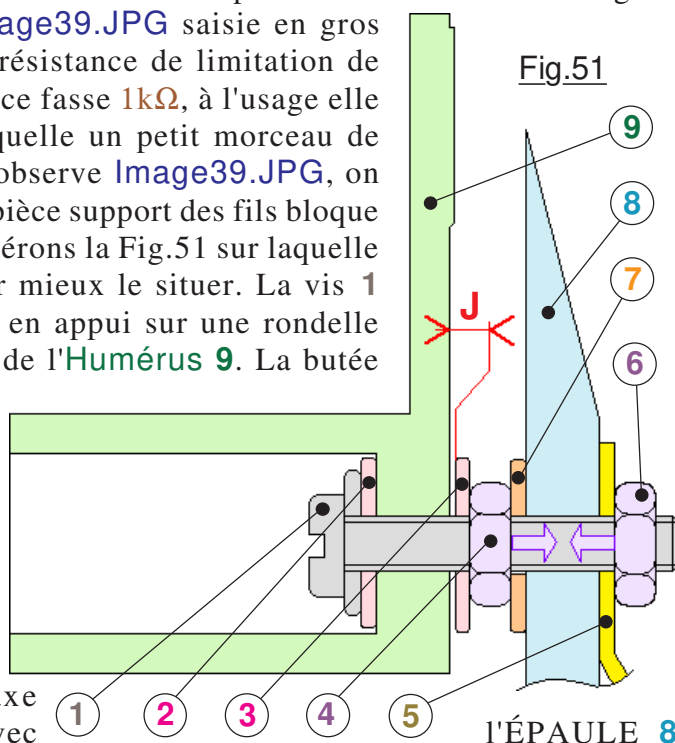


Fig.51

➤ Intégration du circuit imprimé principal sur le statif.

Situé à l'opposé des graduations du disque **5** sur la Fig.47 on doit ajouter une plaque support **S1** pliée à environ 45° pour supporter la petite carte électronique. (Voir [Image40.JPG](#).) Cette plaque est volontairement peu large et le supporte que la zone la plus haute du circuit

imprimé principal. La partie inférieure droite est supportée par l'équerre **S3**, sachant que sa forme est ajustée pour s'immobiliser sur la semelle du statif par la vis qui bloque ce dernier sur le dessus de l'alimentation de puissance. Non seulement **S1** et **S3** doivent former un plan commun, mais aussi comme autre contrainte une position précise des trois trous surchargés en rouge sur [Image41.JPG](#). Ces trois trous correspondent à ceux qui sont situés dans les trois angles du circuit imprimé principal pour en assurer l'immobilisation avec interposition d'entretoises isolantes en nylon. La plaque **S1** étant en "porte à faux" manque de rigidité à gauche. Aussi, un troisième petit support **S2** est ajouté à gauche. [Image41.JPG](#) met en évidence une petite difficulté de réalisation. Quand on assemble cette équerre sur la semelle du statif, il faut pouvoir la centrer sur la vis de liaison ce qui impose sa position longitudinale symbolisée par la flèche double bleue. Du coup, compte tenu des divers angles de pliage et de leur position, on se retrouve avec un petit écart de 1mm environ entre **S1** et **S2**. On complète par conséquent l'assemblage en intercalant une rondelle métallique d'épaisseur adéquate entre les deux supports. Sur [Image42.JPG](#) prise au cours du développement le multiplexeur est en place. On devine que l'écran OLED incliné à 45° est dans une orientation particulièrement favorable à son observation. Bien que supporté sur seulement trois cotés, à l'usage le circuit principal se montre largement assez rigide à l'arrière du bras manipulateur coté pilotage.

➤ Intégration des trois modules gérant la puissance.

Conçus simultanément, le statif semelle et le circuit du condensateur réservoir de 470µF sont en osmose, l'un et l'autre adoptant des dimensions similaires et des entraxes pour les trous de fixation identiques. Ces particularités sont sur la paroi verticale latérale gauche repérée par la lettre "C" sur le statif. L'[Image43.JPG](#) montre le circuit imprimé du condensateur de 470µF ainsi que le module du disjoncteur de puissance. On devine en bas à droite la présence du disjoncteur thermique. Le circuit MULTIPLEXEUR qui se trouve à l'opposé du condensateur de 470µF sur la paroi verticale repérée par la lettre "M" sur le statif, est bien visible sur [Image44.JPG](#) qui présente l'enchevêtrement de toutes ces liaisons électriques. En particulier on peut vérifier que sur les seize sorties PWM du module PCA9685 seules quatre sont utilisées. On remarque également que ces sorties sont disposées écartées les unes des autres ce qui facilite grandement les opérations de maintenance. Enfin, sur ces deux dernières images, il importe d'observer la section notable des fils électriques véhiculant des courants importants. Toutes ces liaisons électriques cheminent à l'intérieur du statif en passant par les diverses lumières disposées partout où c'était possible sur le corps principal du bras manipulateur.

➤ Intégration du disjoncteur thermique.

Ajouté tardivement quand les quatre autres circuits imprimés avaient trouvé leur place et étaient assemblées sur la petite machine, le petit module tardif devait se contenter du peu de place qui restait disponible à la périphérie du statif. De dimensions modestes, il a été réalisé à partir d'une petite plaque à pastille extraite d'un lot "sécable". Ce circuit imprimé prépercé est entièrement et uniquement supporté par l'équerre **S2** dont la largeur a été étudiée dans ce but. Il est en "porte à faux", ce qui n'est pas du tout pénalisant vu son poids plume. Sur [Image45.JPG](#) on situe le petit module sous le circuit imprimé principal avec l'arrivée des fils de section notable arrivant du disjoncteur de puissance et allant au servomoteur de HANCHE alors que sur la macrophotographie d'[Image46.JPG](#) le boulon et l'entretoise en **X** semblent vraiment très gros. Pourtant ils ne font que ϕ M3. Les trois petits boulons repérés en bleu clair sont au diamètre nominal ϕ M2. Sur la photographie [Image47.JPG](#) le circuit imprimé principal est vu en bout coté prise mini-USB. On voit bien que le support **S3** est immobilisé sur la semelle du statif par l'écrou et la vis ϕ M3 qui assurent la liaison du bras manipulateur avec l'alimentation de puissance. Une rondelle plate large assure une bonne répartition de la pression de serrage. On peut aussi observer l'alignement de la plaque support **S1** avec la partie haute de **S3**. Entre le support **S3** et le statif on remarque que la zone constitue un tunnel de passage pour les torons de fils électriques.



Hé bé, Môamôa je dis que n'utiliser que quatre des seize sortie du multitruc c'est un gaspillage honteux, scandaleux, pas écolo et pi tout, et pi tout et pi tout ... NA !

12) Les derniers potins du quartier.

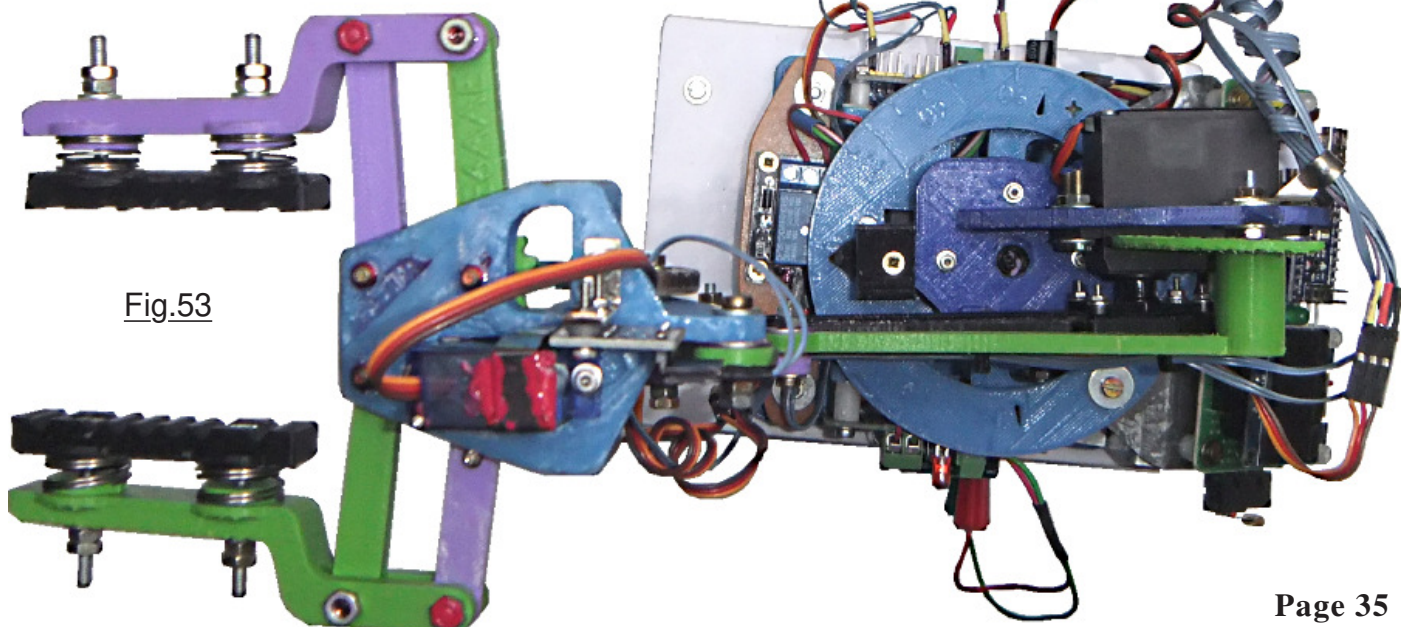
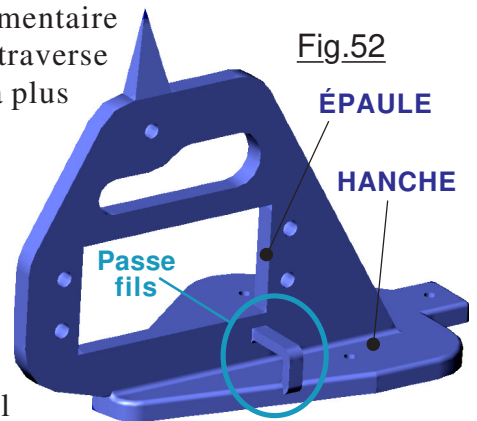
An'en pas douter, ce titre qui pourrait se remplacer par "Un peu de tout", ou "beaucoup de rien" annonce discrètement la fin de ce didacticiel. Ce post ambule est le réceptacle de diverses informations SDF qui n'ont pas trouvé leur place dans les autres chapitres. À ce stade, si vous avez cheminé de conserve avec ce projet, votre imprimante a tricoté les diverses pièces, vous avez électronique, mécanique, arduinoté, gromostéquandçaacoïncé. Bref, le petit dernier trône fièrement sur le bureau et c'est avec une satisfaction non dissimulée que vous le présenterez à Roro quand il viendra pour l'apéro estival. Alors, avant de se quitter, voici les dernières nouvelles du lotissement :

➤ **Les ultimes photographies.**

Jamais assez d'images dans l'album de famille, il manque toujours celle qui montre en détails la zone sur laquelle vous allez rencontrer une difficulté imprévue. Aussi, avant de clore définitivement le sujet, [Image48.JPG](#) est ajoutée dans le dossier <Galerie d'images> car elle précise en gros plan la façon dont les limandes sont enroulées en queues de cochon pour former un groupe à la fois souple et compact. Sur cette photographie, un commentaire insiste pour préciser que la ligne qui va vers le moteur d'ÉPAULE traverse un "Passe fils" appartenant à la HANCHE. Cette information sera plus évidente en observant sur la Fig.52 le détail dans le médaillon.

- Hé, Totoche, t'as confusé un max sur ton dessin !
- Ha bon ? Pourquoi cette assertion cher Dudule ?
- Ben t'as donné deux noms à la même pièce !
- Tu as parfaitement raison cher Dudule, le doute est permis.

Particularité de la morphologie propre au bras manipulateur, et contrairement à celle de l'humain, les articulations de l'ÉPAULE et de la HANCHE sont très proches l'une de l'autre. Il en résulte que la pièce de la Fig.52 sert d'architecture commune. Aussi, dans le didacticiel, en fonction du mouvement utilisé le vocable change. Tout ce qui sera relatif à la rotation d'axe vertical se verra attribué l'appartenance à la HANCHE. Quand c'est la rotation de l'Humérus dont il est question, c'est alors la notion d'ÉPAULE qui sera privilégiée. Aussi, étant à la croisée des chemins, la pièce de la Fig.52 se voit attribuer aussi bien l'un que l'autre des attribus en fonction des circonstances. Sur [Image48.JPG](#) il semblerait que le gros toron de fils proche du corps du bras ne soit pas suffisamment dégagé pour permettre la libre rotation de la HANCHE. C'est une fausse impression, car ces lignes électriques sont largement écartées latéralement comme le prouve la Fig.53 sur laquelle le bras manipulateur est vu de dessus. Quand la HANCHE tourne pour atteindre l'orientation de +90°, l'expérience confirme que les liaisons électriques ne rencontrent pas d'obstacle. Enfin, le portrait de famille s'achève sur [Image48.JPG](#) qui regorge de détails.



➤ Les fausses bonnes informations.

C urieusement, une bonne idée en théorie peut s'avérer très pénalisante dans la pratique. Les cartes Arduino NANO, les petits modules tels que le "multiplexeur des servomoteurs", le petit module "relais électromagnétique" sont pourvus d'une LED rouge qui témoigne de leur alimentation correcte en +Vcc. Quand on développe un projet, cette information lumineuse est assez commode, encore qu'une vérification rapide avec un multimètre lèverait facilement un doute. Puis, rapidement cet indicateur rouge devient une nuisance importante. En effet, contrairement à la dénomination que l'on affecte généralement à ces composants optroniques, ce ne sont pas des LEDs. Leur technologie est plus proche du MASER que de la diode électroluminescente. (*Un MASER est un équivalent "solide" du LASER.*) Du coup, cette lumière cohérente est très "actinique" et bien trop présente au point de devenir carrément néfaste. Une solution simple consiste à déposer sur le minuscule composant lumineux une petite couche de peinture noire, ou du vernis à ongles foncé. Pour ma part, j'ai commencé par du vernis à ongles. Puis, l'efficacité n'étant pas suffisante, j'ai recouvert de deux couches d'encre de chine bien noire. Pour le petit module "relais" et pour le "multiplexeur" c'est suffisant pour atténuer à convenance la clarté des deux témoins lumineux. Pour la LED POW de la carte Arduino NANO qui s'avère très "agressive", j'ai purement et simplement coupé la piste qui va de la LED à sa résistance de limitation de courant avec un "cutter". C'est radical et absolument pas pénalisant car mis à part le mode QUITTER il y a toujours au moins une LED allumée sur le circuit imprimé principal. Enfin, initialement les deux résistances de limitation du courant dans la LED double étaient de 1kΩ. Hors ce composant est d'un rendement étonnant, du coup la luminosité Verte ou Rouge de cet élément était trop intense. Les deux résistances de 1kΩ ont été remplacées par des 4,7kΩ, et encore, si j'avais possédé des 5,6kΩ, j'aurais sélectionné cette valeur. Après toutes ces modifications, les informations lumineuses dispersées sur la petite machine sont pleinement satisfaisantes. À l'usage, il s'est avéré tardivement que la LED rouge du B.P. d'arrêt d'URGENCE était également trop lumineuse. Pour ne pas avoir à tout redéposer, je me suis contenté de la masquer avec un petit morceau de carton semi-opaque, cintré pour tenir en place par élasticité.

13) Améliorations à apporter à l'imprimante Micro Delta Rework.

N'oublions pas que ce didacticiel ne visait pas fondamentalement la réalisation d'un bras manipulateur ludique. Bien que cette facette constitue la partie principale du tutoriel, le facteur déclenchant résidait dans la mise en œuvre d'une imprimante 3D pour découvrir les spécificités de ce mode de production dans un environnement de loisir. Bien que ce chapitre ne concerne que celles et ceux qui ont la chance de posséder cette machine, je trouverais dommage de ne pas faire profiter la collectivité de mes constats et surtout des modifications apportées à mon imprimante.

➤ La bobine à tirer dans les coins !

Compacte, rapide, d'une précision remarquable quand les conditions idoines sont réunies, la Micro Delta Rework est une machine très séduisante. Par ailleurs, la possibilité de l'acquérir en KIM à assembler à la maison est un plus incontestable, car ensuite on connaît bien sa machine et les problèmes techniques qui inévitablement vont survenir à son utilisation ne font plus "flipper". Tout produit commercial présente des qualités et des faiblesses, car résultat de compromis dont la recherche d'un prix de vente attractif est le plus influant. Assurément, l'un des points les plus "sensibles" de cette machine, représenté sur le schéma de la Fig.54, me semble incontestablement résider dans son système d'alimentation en filament. Couchée à plat, la bobine 1 alourdie par sa charge utile 2, reposant sur un roulement à aiguilles 8 conduit à une simplicité mécanique incontestable, au prix toutefois de réguliers problèmes avec l'extrudeur 6. Déjà la facilité de rotation apportée par le roulement 8 est contrée par le moyeu de centrage 10 provoquant des frottements non négligeables. La grande faille réside surtout dans l'entrée d'approvisionnement de l'extrudeur 6 qui sur cette machine est perpendiculaire à la sortie naturelle du filament 7 hors de la bobine 1. L'extrudeur doit forcer considérablement en 5 pour cintrer court le filament qui lui résiste à l'horizontale en 3. Comme le filament frotte fortement sur l'entrée métallique de l'extrudeur 6, l'effet de râpe provoque des éraflures de matériau qui finissent par encrasser l'entrée de dispositif. On peut ajouter le petit manchon 4 proposé comme amélioration sur le site du fournisseur de l'imprimante. Le filament est un peu moins usé, mais la traction sur ce dernier reste toujours aussi importante. Comme il faut solliciter très fortement en 5, il y a obligation de presser très énergiquement le mécanisme d'avance du filament avec pour inconvénient de strier ce dernier,

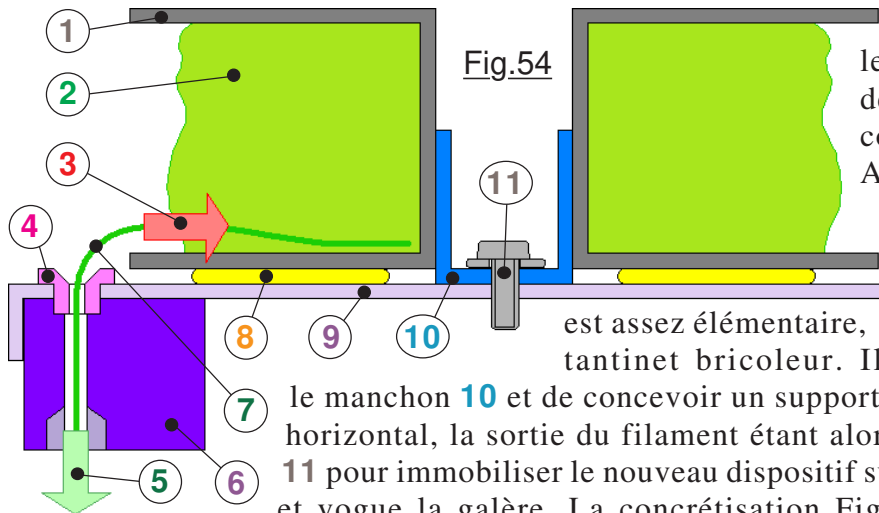


Fig.54

augmentant les frottements dans le tube de guidage, et surtout un effet de limage qui cumule rapidement des copeaux de matière dans l'extrudeur. Arrive un moment où le bourrage est inévitable, et il faut tout démonter pour nettoyer. Heureusement pour nous, la parade à ce gros problème pour peu que nous soyons un suffit d'enlever le roulement 8 et

est assez élémentaire, tantinet bricoleur. Il le manchon 10 et de concevoir un support de bobine dont l'axe de rotation sera horizontal, la sortie du filament étant alors verticale. On réutilise les deux vis 11 pour immobiliser le nouveau dispositif sur le plateau supérieur 9 de la machine et vogue la galère. La concrétisation Fig.55 de cette nouvelle configuration présente le nouveau dévidoir en place. Pour minimiser l'encombrement en hauteur, les flancs 12 de la bobine passent à environ 5mm de la plaque support 8. Le dispositif est architecturé sur la base 8 constituée d'une plaque en aluminium pliée en équerre sur les deux cotés. Sur ces faces latérales sont immobilisés les deux flancs 6 et 13 constitués de plaques de tôle épaisses de récupération, raison pour laquelle celle de gauche présente à l'extérieur une sorte de "porte stylo" à sa base. Ces deux flancs latéraux sont immobilisés au moyen de vis poêlier ϕ M4. La bobine 12 tourne autour de l'axe de rotation 5 constitué d'une tige de diamètre 8mm. À gauche elle est munie d'un bouton 3 qui en facilite les manipulations. (Tout ce matériel est de récupération ça va sans dire !) Il importe de noter que la largeur du support est telle que l'ensemble du rouleau 1 enroulé sur la carcasse 12 peut se déplacer librement latéralement comme souligné par les flèches 2. La sortie du filament en 7 est pratiquement toujours à la quasi verticale de la petite pièce de centrage 9 imprimée en PLA. Une vue de l'ensemble Image50.JPG vous est proposée dans le sous répertoire <Améliorations personnelles> de <Galerie d'images> qui présente bien visible en bleu clair le noyau de centrage de la bobine. Ces noyaux imprimés pour chaque bobine de filament disponible sont montrés sur la Fig.56 et leur fichier de réalisation est disponible dans le dossier <Fichiers D'améliorations de la Delta> fourni avec ce didacticiel. Il importe de noter sur Image50.JPG que la position de l'arbre supportant la bobine est placé à 85mm de la face avant de la micro Delta. Ainsi, que la bobine soit pleine ou presque vide, l'arrivée du filament en 7 sera toujours "bien dans l'axe" du guide 9. La traction du filament par l'arbre de sortie du moteur de l'extrudeur en 10 reste constamment facile et exige un effort dérisoire. La seule résistance à l'avancement résulte des faibles frottements dans le guide jusqu'à la tête de chauffe, et surtout de la résistance du matériau dans cette dernière qui rendu malléable par la chaleur n'en reste pas moins relativement visqueux. Remarquez au passage que le plateau 8 immobilisé par les vis d'origine 11 sur 14, la structure du haut de la Micro Delta Rework, n'est pas centré sur la machine, mais par rapport à l'entrée de l'extrudeur en 9. L'arbre 5 s'introduit librement à droite dans un moyeu qui permet de l'immobiliser en translation par la vis moletée 4 qui empêche tout déplacement latéral durant l'utilisation de la machine. (Voir Image51.JPG.) Pour ne pas abimer le plateau supérieur de l'imprimante, la base 8 ne porte pas directement sur 14 mais des patins en feutre d'environ 3mm d'épaisseur sont intercalés comme montré sur Image53.JPG.

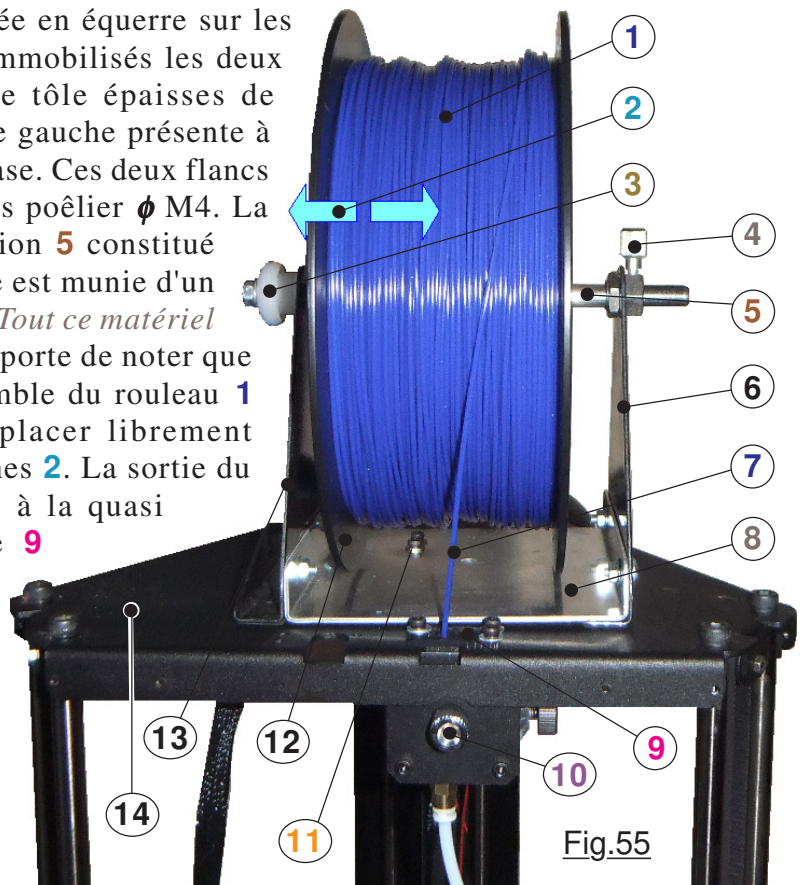


Fig.55

Noyaux de centrage des bobines de filament

Fig.56



Un noyau de centrage est moulé avec l'imprimante pour chaque bobine de filament, évitant ainsi de nombreuses manipulations chaque fois que l'on change de couleur sur la machine. Le diamètre extérieur de cette pièce est ajusté de façon à ce que l'introduction dans une bobine soit à frottement doux, engendrant une immobilisation longitudinale efficace évitant à l'usage tout déplacement relatif. Le diamètre intérieur est prévu pour engendrer un bon centrage tout en ménageant une libre rotation de la bobine autour de l'arbre support. Naturellement, cela suppose que le diamètre de l'arbre (*De récupération comme tout le reste.*) fasse 8mm.

➤ Extrudeur amélioré.

Deuxième point faible sur la **Micro Delta** : Son extrudeur. Sa conception, géniale de simplicité, souffre cependant d'une grosse faiblesse facile à rectifier. On peut trouver sur Internet la présentation de cette machine. L'auteur de la vidéo en fait des louanges que je crois méritées. Il souligne également que l'ajustement de la pression sur le fil de l'extrudeur est "délicate" et qu'il y est arrivé "un peu au hasard". Si on presse trop fort on marque le fil avec tous les inconvénients déjà cités dans le chapitre précédent. Pas assez de pression, et le mécanisme patine. La pièce moulée est alors mauvaise par manque d'alimentation. Tous ces désagréments sont totalement éliminés par l'amélioration du support de bobine. Il reste toutefois une opération très délicate à conduire en l'état

de la machine : Le changement de filament. Le problème résulte d'une mauvaise conception de l'extrudeur et en particulier de son dispositif de mise en pression.

Pour faire court, le coulisseau **2** se déplace en translation rectiligne dans le corps de l'extrudeur **1**. La pression sur les deux molettes d'extrusion est obtenue en vissant **5** sur **2**. (*Flèche violette.*) La vis moletée presse alors le ressort **3**. Pour limiter les frottements de torsion entre **5**

et **3** est intercalée la rondelle **4** de diamètre ϕ M3. C'est précisément le talon d'Achille du mécanisme. Déjà, à l'assemblage c'est la croix et la bannière pour arriver à la placer, car inexorablement elle tombe le long du ressort **3** comme montré par la flèche courbe rouge sur le dessin. À l'utilisation c'est pire. Pour

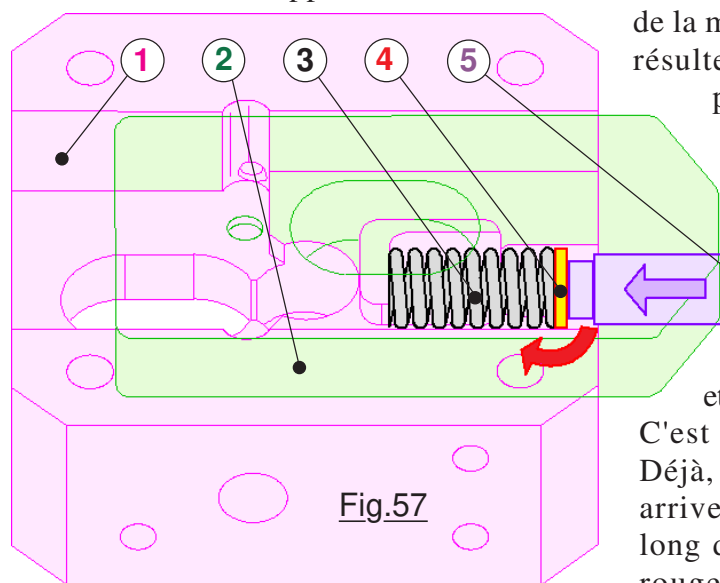


Fig.57

changer de filament il faut desserrer le mécanisme. Si l'on tourne trop pour libérer la pression, **PAFFFFffff**, la rondelle repasse inexorablement dessous ... et il n'y a plus qu'à redémonter entièrement l'extrudeur pour la remettre en place. Par chance, le remède à cet épineux problème est enfantin. On trouve une toute petite plaque métallique, et comme représenté sur la Fig.58 on réalise un étrier qui remplace **4** en coiffant le ressort des deux cotés. Le problème est définitivement résolu et l'on peut librement desserrer la vis moletée **5** pour changer de filament. Du reste, si vous regardez [Image54.JPG](#) vous constaterez que j'ai réalisé un trait par sillage sur la tête de **5**. Ainsi, pour changer de filament je me contente d'effectuer deux tours dans le sens idoine. Puis, matériau interverti, il suffit de refaire deux tours dans le sens contraire pour retrouver l'ajustement initial qui durant des heures a fait ses preuves. Sur la Fig.58 le petit étrier qui remplace **4** semble assez gros. Il n'en est rien puisqu'il adopte globalement les dimensions du ressort. Cette pièce est taillée dans une petite languette de cuivre de faible épaisseur ... de récupération comme il se doit. Ici j'ai

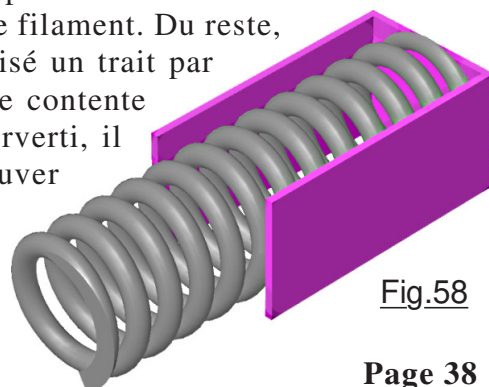
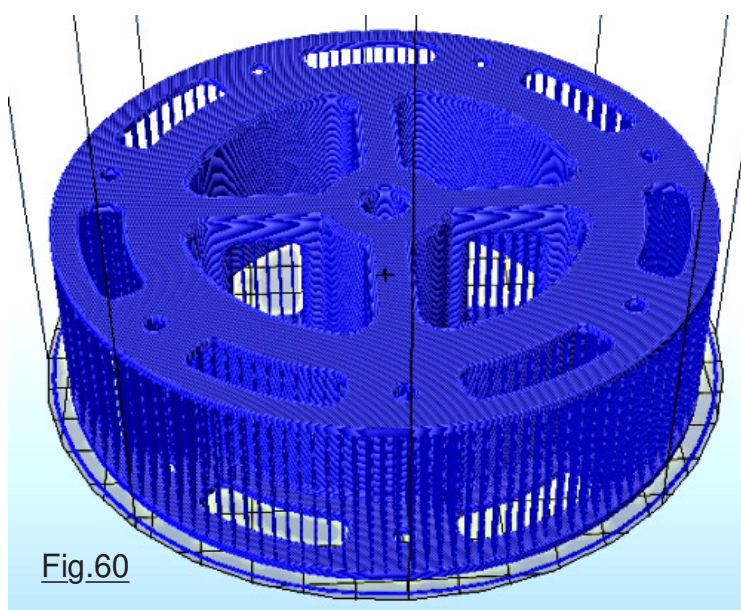
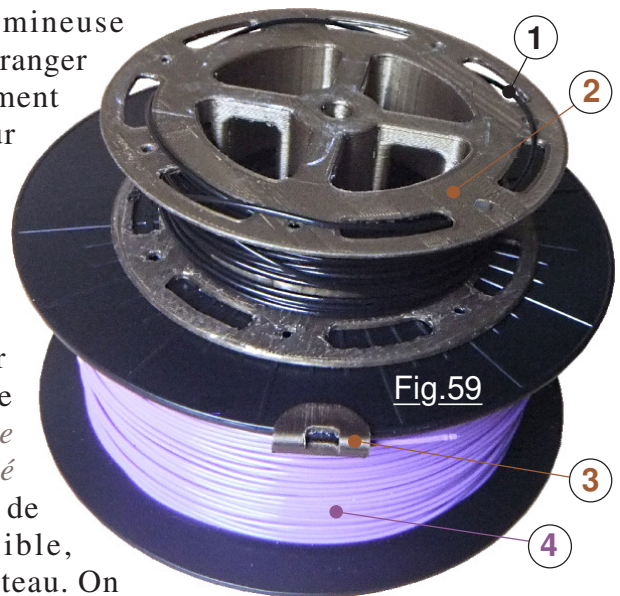


Fig.58

utilisé la lamelle souple d'un relais électromagnétique de récupération, mais on peut aussi faire usage d'une lamelle de contact électrique d'une pile plate de 4,5v, ou toute plaque métallique de faible épaisseur dont le matériau accepte de se faire plier à angle droit pour former l'étrier rose.

➤ Des petites bricoles en plus.

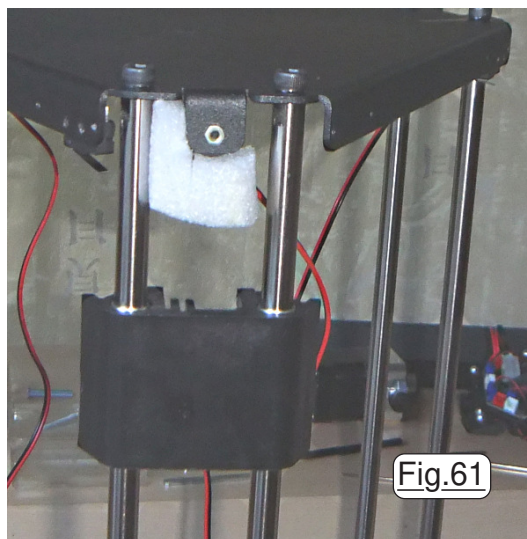
Sans qu'il s'agisse d'une amélioration proprement dite de la machine, je vous livre en promotion deux petits modèles 3D qui peuvent simplifier la vie de l'imprimeur. Parfaitement visible sur [Image55.JPG](#), [Image56.JPG](#) et [Image57.JPG](#), il s'agit d'une pince qui maintient le filament sur la bobine pour la ranger. Elle n'a vraiment rien d'original, et il en existe une multitude de variantes sur Internet. Néanmoins, comme elle se clipse très aisément sur les carcasses des bobines, et que le filament s'y introduit avec facilité, je vous livre ce petit exemplaire personnel. Arrive forcément un moment où une bobine devient légère, car la majorité de son filament a été transformée en merveilles qui encombrant les étagères. Conserver cette volumineuse ressource "pleine de vide" n'est pas très rationnel. Aussi, ranger le résidu de fil sur une carcasse plus adaptée a rapidement montré sa pertinence. On peut facilement constater sur la Fig.59 que la bobine **2** est nettement moins volumineuse que celles standard **4** pour les produits commerciaux. On retrouve en **3** la petite pince pour immobiliser l'extrémité du filament. Cet accessoire s'avère totalement inutile avec **2** car les trous oblongs disposés sur les flancs assurent un arrêt très efficace pour peu que l'on "tricote" deux ou trois alternances comme visible en **1**. (*L'extrémité libre du filament est dirigée vers l'intérieur on s'en doute un peu ... comme montré sur [Image61.JPG](#).*) La Fig.60 montre que le diamètre de cette petite bobine est choisi le plus grand possible, compatible avec les restrictions dimensionnelles du plateau. On peut aussi vérifier sur [Image58.JPG](#) que la jupe est très proche des limites imprimables. Et surtout, on constate que le nombre de parois support est considérable. Aussi, lorsque ces dernières sont enlevées, les flancs présentent une "rugosité" impossible à éliminer totalement avec une lime. Pour ne pas que le filament que l'on enroule, ou qui se déroule lors d'une impression "accroche" sur les aspérités résiduelles, les flancs ainsi que le noyau ont été recouvert d'une couche copieuse de résine. Le vernis utilisé, en réalité un composite est précisé dans le chapitre [5\) Moulage des pièces et "gestion de la qualité"](#). Sur [Image59.JPG](#) on observe une vue globale qui met en évidence l'épaisseur généreuse de la couche de lissage. Du reste, sur [Image60.JPG](#) il est évident que par manque d'expérience, l'auteur a exagéré la quantité de matériau étalée, provoquant des coulures pas très artistiques. Pour une bobine de filament ce gaspillage de résine n'est absolument pas pénalisant. Le jour où le but sera de rendre plus belle une pièce servant à décorer le salon, il faudra se montrer bien plus méticuleux. Ce long didacticiel s'achève donc sur [Image61.JPG](#) montrant le résidu de fil qui va rejoindre le gros carton de rangement des bobines de PLA. On peut naturellement en rester là pour celles et ceux qui ne se sentent concernées



que par la création matérielle. Aussi, je vous souhaite beaucoup de plaisir à expérimenter le domaine des bras manipulateurs avec le modèle ludique présenté dans ces pages. Pour les fanas de la programmation, on se retrouve avec le didacticiel dédié [Aspect LOGICIEL.pdf](#).

Assemblage de la machine :

Si c'était à refaire, je ne respecterais pas totalement l'ordre des opérations imposé dans la notice d'assemblage. Cette remarque est relative aux trois capteurs d'initialisation en position haute. Personnellement, je les fixerais sur la plaque du dessus APRES AVOIR ASSEMBLÉ LES SIX COLONES. En effet, on doit effectuer plusieurs manipulations de coulissement des guides jusqu'à obtenir des déplacements "sans frottement notable". Pousser les coulisseaux "en butée" peut se faire avec "virilité" si la fin de course engendre de l'arc-boutement. Les micro-contacts risquent alors des chocs. Comme ils peuvent parfaitement être mis en place après cette phase, personnellement je décalerai la procédure. Pour ma part, comme montré sur la Fig.61, afin de minimiser les risques sur ces capteurs je plaçais un bloc de mousse synthétique limitant les déplacements des chariots.



14) Les "loupés".

Aucun projet, qu'il soit industriel ou de loisir ne saurait aboutir à la perfection absolue. Entre les désirs initiaux, ce qui était envisagé et ce qui résulte de compromis inévitables, s'insinuera forcément des divergences. Ce petit bras manipulateur n'échappe pas à ce principe non démontré mais qui frise l'absolu. Il a fallu composer avec les réalités matérielles, et l'on peut noter que :

- Initialement il était prévu cinq mobilités, il a fallu abandonner la torsion du poignet.
- Il était prévu un volume d'intervention bien plus important. Le manque de rigidité de l'ensemble a imposé de revoir à la baisse notre optimisme, aboutissant à une machine plus compacte.
- Contrairement à un robot industriel qui doit pouvoir "tenir le 24H sur 24", nos expérimentations seront limitées en durée de serrage de la pince, car nous avons vu que le servomoteur chauffe et qu'une disjonction thermique peut intervenir à tout moment. En soit ce n'est pas tragique du tout, il suffit de respecter les protocoles fournis sur les fiches, et l'expérimentation n'en sera pas moins instructive.

Il serait possible d'envisager une refonte totale du dispositif. Les servomoteurs seraient remplacés par des moteurs "pas à pas" qui assurent le fonctionnement permanent sans surchauffe. Réaliser une mécanique plus sérieuse, avec des éléments plus rigides ... donc métalliques. Ce ne serait alors plus du tout le même contexte qui avait pour but l'expérimentation des imprimantes 3D.

Peu importe ces petites tracasseries. Ne boudons pas pour autant notre plaisir. Le petit bras mécanisé est bien vivant, et le voir se trémousser reste vraiment étonnant. Quand je le présente à des amis, ils sont chaque fois un peu dubitatifs. À une époque où la science fiction est dépassée par la réalité, nous pourrions être blasés. Et bien force est de constater que face à un ce petit robot bien réel et si rudimentaire, les invités sont toujours séduits et ravis. Tout compte fait, les humains ne sont que de grands enfants qui ne demandent qu'à s'émerveiller, et parfois il suffit de si peu de chose ...

Chères lectrices, chers lecteurs, cette (trop) longue saga 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 travail" 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 rencontrez 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.

Chaleureusement : Nulentout.