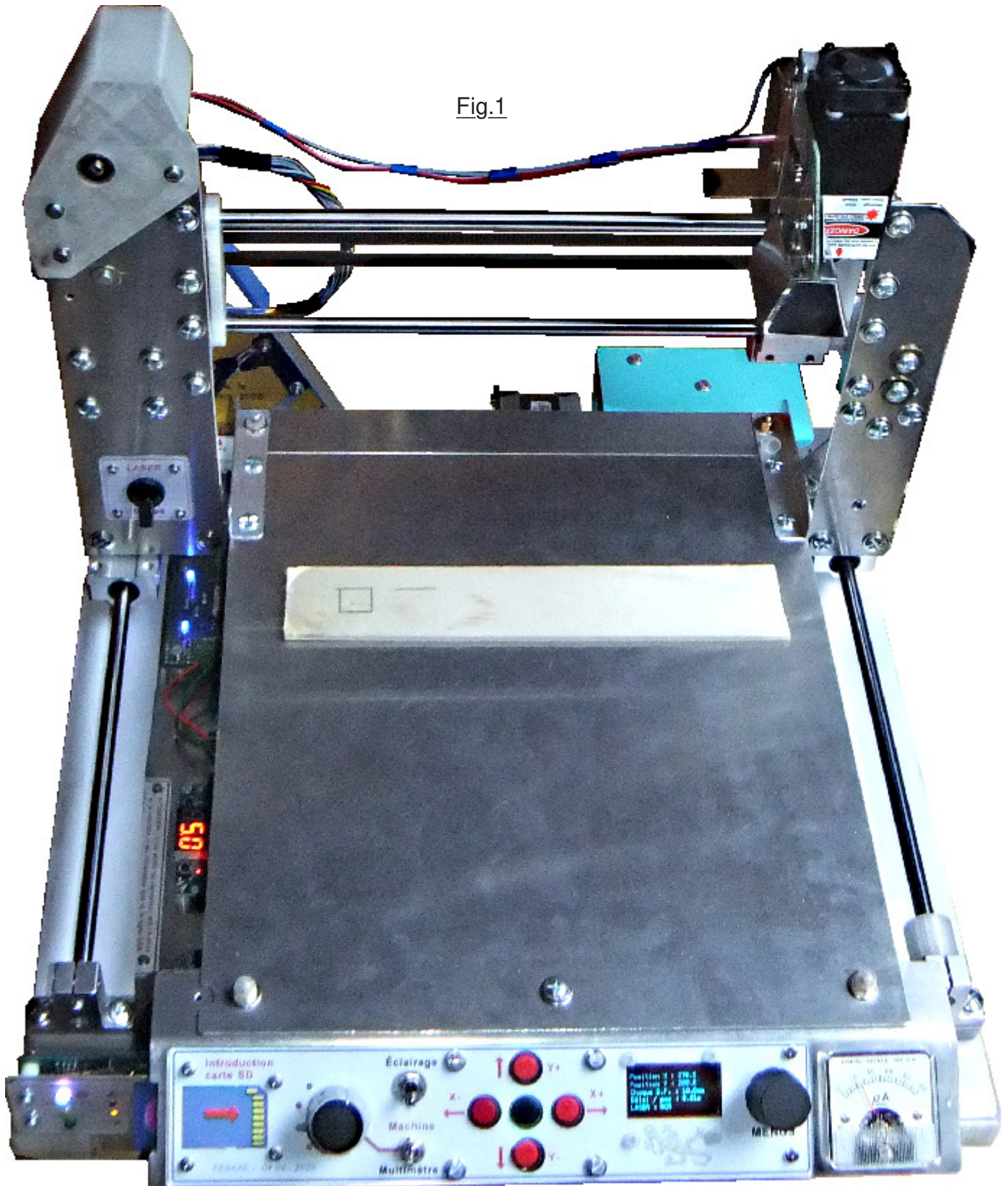


Conception de la petite PYROGRAVEUSE à LASER de puissance.

Par Nulentout : 18 Juillet 2020.

Fig.1



Issue d'un grand nombre de compromis, d'optimisations, de contraintes qui influencent des choix, le prototype présenté ici dépasse mes espérances initiales de par la qualité des résultats que l'on peut obtenir si l'on adopte les bons réglages, et tout a été mis en œuvre pour aboutir à une machine d'utilisation très conviviale, et particulièrement agréable à utiliser. Certes, de nombreuses pondérations sont intervenus pour contraindre les choix et les solutions adoptées ; toutefois, ***certains critères initiaux ont été respectés intégralement car estimés "incontournables" :***

- Machine très fiable, et particulièrement économe en énergie consommée, (*1,1W en attente !*)
- Grande facilité pour se procurer les éléments de base par l'entremise du commerce en ligne,
- Minimiser les coûts, notamment pour l'achat des éléments "stratégiques",
- "Quincaillerie" très courante facile à approvisionner dans les magasins de bricolage de proximité,
- Facilité de réalisation par l'usage d'outillages très ordinaires dans l'atelier du bricoleur "lambda",
- Autonomie totale de la machine ne monopolisant pas d'ordinateur durant la gravure,
- Encombrement minimal et optimisé sans pour autant dégrader les performances globales, de façon à faciliter les manipulations et le rangement de cette machine expérimentale,
- ***Qualité opérationnelle particulièrement étudiée*** pour un usage "pratiquement naturel",
- ***Un logiciel d'exploitation sans compromis, autant pour effectuer de la pyrogravure que pour pouvoir effectuer des opérations de mise au point ou de maintenance.***

Généralement, pour tous les projets que j'ai publié sur la toile, je ne précisais pas mes sources d'approvisionnement, dans le but de ne pas influencer les lecteurs sur l'aspect commercial. Cette pratique "déontologique" m'a valu force courriers électroniques de la part de lectrices et lecteurs lors de la publication d'autres projets, car ils ne savaient pas trop comment trouver les composants principaux de leur future réalisation. Aussi, pour ce projet je vais déroger à ce principe de neutralité que je m'imposais et indiquer mes sources d'approvisionnement, tout au moins pour les éléments incontournables. Ne consulter cette liste ... qu'en cas de nécessité évidente. Reste que les divers constituants à usiner sont élémentaires et n'imposent qu'un outillage assez banal dont tout bricoleur du dimanche dispose sur son établi. Que les cheminements dans les sentiers de ce projet alléchant vous soient agréables et instructifs ... car c'est la motivation principale de cette description.

Comme c'était le cas pour le didacticiel sur la petite sonde JEKERT également publié sur ce site, ce projet sera décrit en divers chapitres, cloisonnant ainsi les diverses phases en facilitant considérablement les nombreuses étapes d'avancement de la concrétisation de la machine ; que ce soit pour la mécanique, l'électronique, voir l'aspect informatiques pour celles et ceux qui désireront maîtriser toutes les facettes d'un tel projet. Bien que fournis dans des dossiers et des documents séparés, ces diverses étapes constituent un tout "cohérent", raison pour laquelle il y a continuité dans la numérotation des chapitres et des diverses figures proposées. Enfin, un grand nombre de photographies copieusement commentées accompagnent chaque étape de l'étude et de la réalisation de cette petite machine, et tous les dessins, ainsi que les programmes pour Arduino sont, on s'en doute, fournis dans les dossiers concernés.

Reste qu'un certain nombre de pièces ont été réalisées sur une imprimante 3D, car possédant une telle machine depuis moins d'un an ... je me suis fait plaisir. Pour le cas où vous disposer d'une telle machine, je fournis, naturellement, les fichiers au format **gco**. Mais que celles et ceux qui ne possèdent pas une telle possibilité dans leur voisinage se rassurent. Ce sont uniquement des cales que l'on peut très facilement réaliser dans du bois par exemple. (*Les cannettes en métal sont très commodes également pour réaliser la tôlerie, comme l'abat-jour de l'éclairage par exemple ou le protecteur supérieur sur le montant gauche ...*)

Hé Totoche, elle est franchement nulle ta page d'introduction, ya pas d'image et surtout que du baratin. C'est pas avec ça que tu vas faire de la "com" ! Vont même pas tourner la page tes lectrices et tes lecteurs ...




1) Approche initiale et choix du mode de pilotage de la machine.

R éinventer le monde, retrouver le principe de l'eau chaude ressemble à première vue à de la gaminerie naïve. Pourquoi étudier entièrement une machine dont on trouve à profusion d'innombrables exemplaires sur la toile ? Il suffit de cliquer, d'imprimer, et de copier. Cette démarche raisonnable est facile, rapide, et parfaitement adaptée pour celles et ceux qui ne disposent que de temps restreint pour leur loisir. Et bien dans ce cas ... ce sera une "offre de plus".

La motivation réside dans l'approche expérimentale. Se cogner à toutes les difficultés, agencer le moindre détail exige un nombre d'heures colossal. Il en résulte toutefois une satisfaction intense d'avoir abouti, et surtout un héritage précieux avec tout ce que nous avons appris et "maîtrisé". C'est précisément dans cette richesse indéfinissable que l'approche "je vais tout faire" s'impose naturellement, où tout au moins plaide avec force pour un tel cheminement de béotien.

➤ Logiciel gcode ARDUINO clef en main.

T oute machine à commande numérique digne de ce nom se programme en **gcode**, et compte tenu de la popularité de l'environnement ARDUINO, on se doute que des programmes existent sur l'Internet. Il suffit de les télécharger, de les inscrire dans la mémoire dédiée d'une carte UNO, NANO et vogue la galère. (Pour avoir une idée suffisante de ce qu'est le **gcode**, consultez dans le dossier <Manuel, fiches, livrets> le petit livret  Le G_CODE des imprimantes 3D.pdf. Bien que relatif aux imprimantes 3D, les informations qui s'y trouvent restent pertinentes en ce sens qu'une pyrograveuse n'est pas autre chose qu'une imprimante ... 2D!) Il existe sur Internet des librairies qui permettent de piloter une machine à commande numérique trois axes. Ces programmes sont disponibles immédiatement. Ils ont toutefois été écartés pour les raisons suivantes :

- On pilote directement la machine à partir du clavier de l'ordinateur. C'est à mon sens une hérésie, car certaines pyrogravures peuvent exiger plusieurs heures immobilisant l'ordinateur de façon abusive.
- Exactement comme ce sera le cas pour notre prototype, il n'évacue pas l'obligation de transposer l'image à pyrograver en **gcode** et n'apportent aucune simplification à ce point de vue.
- Rien ne prouve qu'ils seront totalement adaptés à notre motorisation et au pilotage du LASER.
- On perd totalement la maîtrise du programme et le plaisir de le développer. (En réalité arriver à gérer un lecteur de carte SD, un clavier, un écran, le LASER et la motorisation avec une carte aussi modeste que l'Arduino NANO constitue un réel défi informatique ... tout un programme !)

➤ Logiciel "maison" et carte mémoire SD.

N ettement plus rationnelle, la solution retenue consiste à traiter l'image sur l'ordinateur, à la transposer en **gcode** sur une carte **SD** RAM dont le commerce en ligne pullule, puis d'insérer cette dernière dans le pupitre de la machine qui se pilote à partir d'un clavier élémentaire à cinq touches et d'un petit écran de dialogue. Cette voie présente de nombreux avantages :

- **Entièrement autonome, la machine libère l'ordinateur pendant qu'elle travaille.**
- Comme on est totalement libre de l'écriture du logiciel d'exploitation embarqué, nous avons le loisir d'y introduire à convenance **des fonctions de service facilitant la mise au point ou la maintenance de la machine**, et de la faire évoluer si d'aventure on cherche à explorer d'autres pistes.
- Enfin, et s'il faut y investir un nombre d'heures colossal, le développement matériel et logiciel associé est au cœur de l'entreprise et en constitue la motivation initiale et le facteur déclenchant.

Évidemment, en ce qui vous concerne l'étude complète ne sera pas pertinente. En revanche, le programme sera détaillé pour certaines de ses fonctionnalités de base, et ainsi vous permettre d'en saisir les grandes lignes pour le modifier à votre souhait. Du reste, nous allons pas à pas cheminer vers l'aboutissement, raison pour laquelle dix-neuf démonstrateurs sont fournis. Ils sont prévus pour effectuer module par module la mise au point et la vérification des sous-ensembles au fur et à mesure qu'ils sont concrétisés. OK suffit de blablater, passons aux actes.



Ben Môa môa, je crois que c'est plus du tout utile de didactellertruc car les lectrices et les lecteurs sont toutes et tous partis. Trop de baratin, pas d'image, l'est vraiment nulle cette deuxième page !

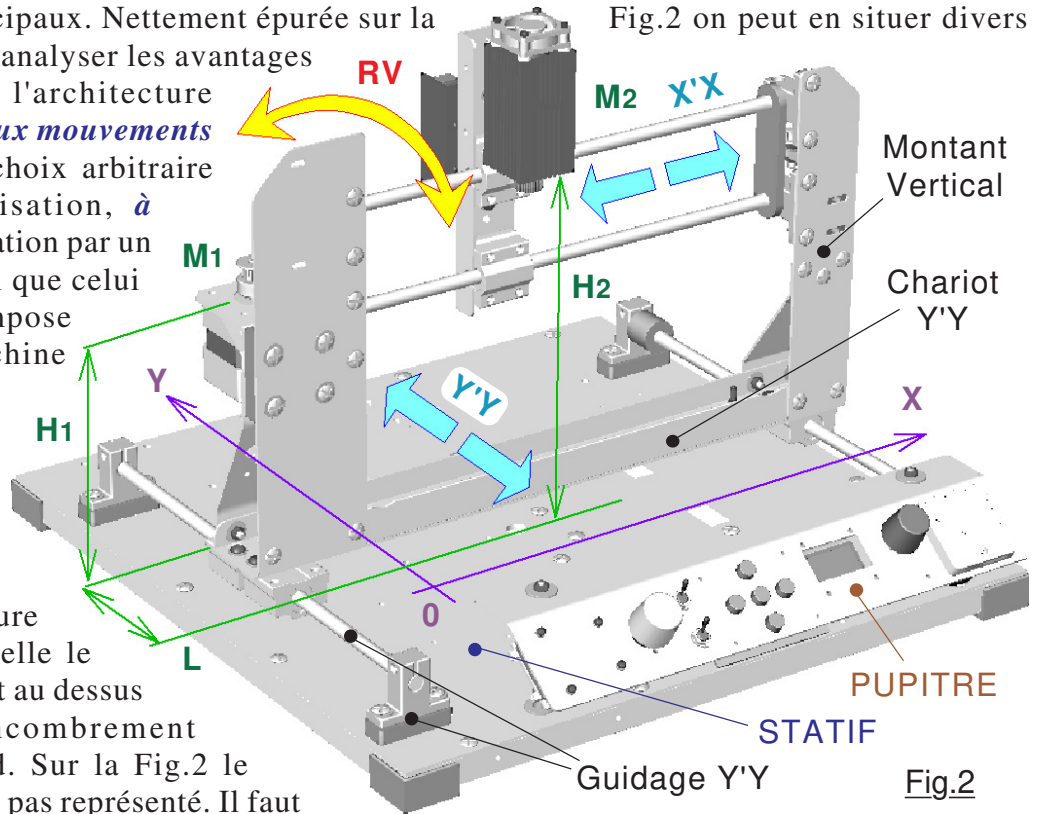
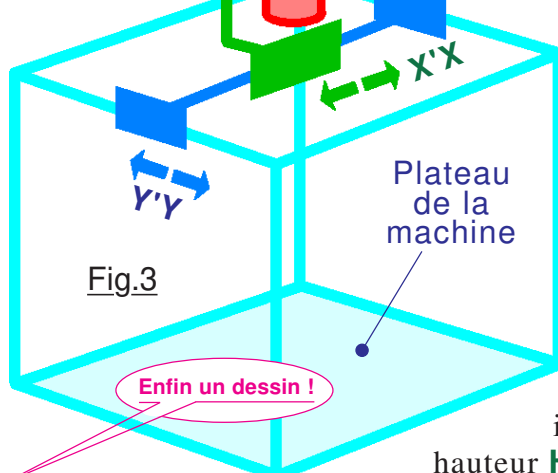
2) La structure globale et l'architecture adoptée pour cette petite machine.

Pratiquement terminée et totalement opérationnelle, sur la Fig.1 elle n'est pas encore débarrassée des deux bandes de papier placées sous les glissières **Y'Y** qui ont été très légèrement enduites d'une graisse de qualité. Par précaution j'avais protégé le statif, l'expérience ayant montré que ce n'est absolument pas utile. Quand on va se "promener" sur Internet, on constate que bon nombre de telles machine sont constituée d'une structure analogue à celle schématisée sur la Fig.3 globalement prismatique, avec un "pont" **Y'Y** qui sur le haut se déplace longitudinalement et sur ce dernier un chariot **X'X** qui génère le mouvement transversal. Cette approche est de loin la plus évidente pour aboutir à une machine "rigide" pour laquelle les rails de guidage sont d'une stabilité sans bavure. Ce n'est pourtant pas l'approche privilégiée pour ce prototype. La Fig.6 du document **PLANS.pdf** en détaille les éléments principaux. Nettement épurée sur la

Fig.2 on peut en situer divers éléments géométriques et analyser les avantages et les inconvénients de l'architecture privilégiée. Comme les **deux mouvements** du LASER se font, par choix arbitraire facilitant leur matérialisation, à **angle droit**, une représentation par un système cartésien **XOY** tel que celui représenté en violet s'impose "naturellement". La machine est constituée d'un chariot **Y'Y** en forme de potence, avec sur le haut le chariot **X'X** pour générer les mouvements latéraux. Si on compare avec la Fig.3 qui symbolise une structure plus classique, dans laquelle le LASER figuré en rouge est au dessus de la "charpente", l'encombrement s'avère bien moins grand. Sur la Fig.2 le plateau de la machine n'est pas représenté. Il faut

bien se rendre compte que toute l'électronique "volumineuse" est placée sous ce dernier, alors que pour la charpente prismatique il faut "ajouter en hauteur" le volume qui héberge les modules électriques. L'étude soignée des deux approches a montré sur ordinateur que la solution "en potence" réduit de plus de 15cm la hauteur hors tout de la machine ce qui est considérable. **Le deuxième avantage fondamental de l'approche adoptée réside dans le dégagement du plateau pour placer les cibles à graver.** Quand le prototype est en configuration dégagée, le plateau est entièrement libéré, alors que pour la solution de type "cube" il y a constamment les

colonnes situées à l'avant qui gênent l'accès. (De plus le PUPITRE sur une telle structure n'est pas facile à positionner pour qu'il ne soit pas trop en "obstacle" tout en restant ergonomique, facteur prioritaire pour les études visant à soigner la qualité opérationnelle.) On se doute que la solution "miracle" adoptée ne présente pas que des avantages. La



La pierre d'achoppement réside dans l'inertie des masses en mouvement, problème considérablement aggravé par l'utilisation des moteurs PASs à PAS qui à chaque rotation élémentaire se comportent un peu comme des marteaux. (Voir l'encadré de la page 5.) Imaginons que le moteur **Y'Y** fasse un pas. Par nature, ce type de motorisation engendre des accélérations nerveuses. Le moteur de masse importante **M1** refuse le déplacement par inertie. Situé à une hauteur **H1** importante du guidage à billes, une **Rotation** **Page 4**

► Un petit chouilla d'explications sur les inerties.

Par définition, **l'INERTIE traduit le refus du changement quel que soit le phénomène analysé.** Par exemple on peut citer l'inertie thermique d'un corps qui refuse de s'échauffer, ou de se refroidir. L'inertie des foules, si difficiles à mettre en mouvement ... puis impossible à arrêter. On rencontre l'inertie strictement partout, y compris l'inertie mentale quand on n'a pas vraiment envie de se creuser les méninges. En mécanique, l'inertie au mouvement est très pénalisante. Prenons pour exemple le chariot **Y'Y**. À sa base, brusquement le moteur fait un PAS et le tire violemment à gauche. La base du chariot subit une accélération **γ** importante, c'est le "coup de marteau". La base **B** du guidage à billes commence immédiatement son mouvement. Mais plus haut, la masse **M1** et la masse **M2** par inertie **I1** et **I2** refusent le mouvement et ne veulent pas accélérer. Restant un court instant en position, le haut engendre une flexion **FL** des montants verticaux et la structure se déforme. (Sur notre machine lors des accélérations les plus dynamiques cette déformation "tous phénomènes confondus est d'environ 0,3mm.) Puis, la structure étant élastique, l'ensemble vertical va vibrer comme schématisé en rouge, puis rapidement la déformation va se résorber. Encore faut-il de **FL** soit d'assez faible amplitude. Noter au passage que le centre de "rotation" situé vers **B** étant proche du point où converge le faisceau du LASER sur la cible à pyrograver, ce phénomène n'a pas d'incidence sur la précision de la machine. Il importe toutefois de minimiser absolument la déformation inertielle pour réduire au maximum "le vieillissement" de la mécanique et surtout le bruit de "gamelle" généré, que toutes les résonances mécaniques et acoustiques sur la machine ne demandent qu'à amplifier.

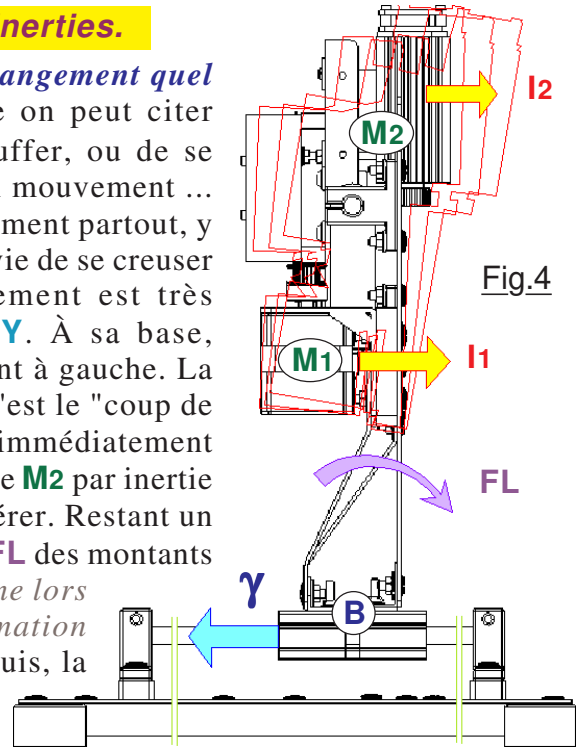


Fig.4

P1

► Les inerties dans les moteurs PAS à PAS.

γ_1

B2

I1

B2

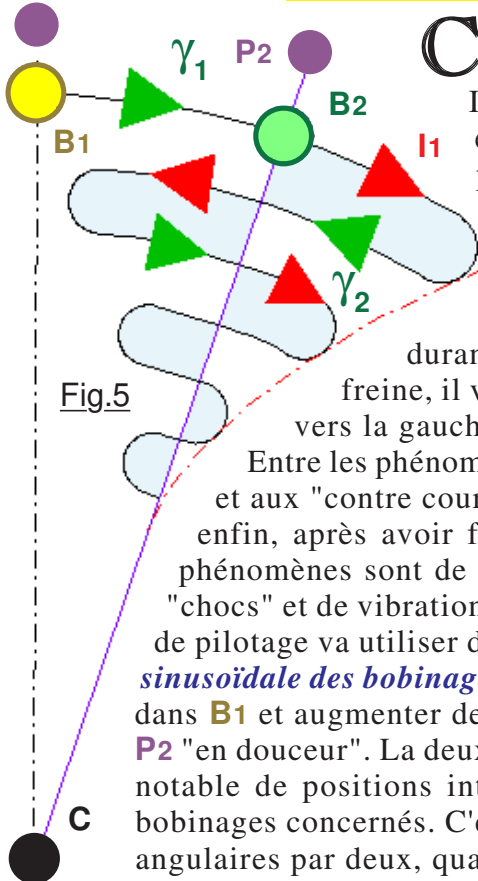


Fig.5

Considérons la Fig.5 qui schématise géométriquement les fondamentaux dynamiques d'un moteur PAS à PAS. Initialement, le rotor qui tourne autour du centre **C** est maintenu en position **P1** par la bobine magnétique **B1**. On alimente à pleine énergie la bobine **B2** désirant faire passer le rotor en position **P2**. Fortement attiré par **B2** le rotor prend une accélération importante **γ_1** . Il se met à tourner, mais arrivé en **P2**, il ne peut stopper instantanément sa course et par inertie **I1** continue en dépassement. Comme **B2** tire fortement, durant cette phase de débordement, l'accélération inverse **γ_2** le freine, il va moins "loin". Puis, l'attraction magnétique toujours dirigée vers la gauche continue à engendrer **γ_2** . Le rotor repart dans l'autre sens.

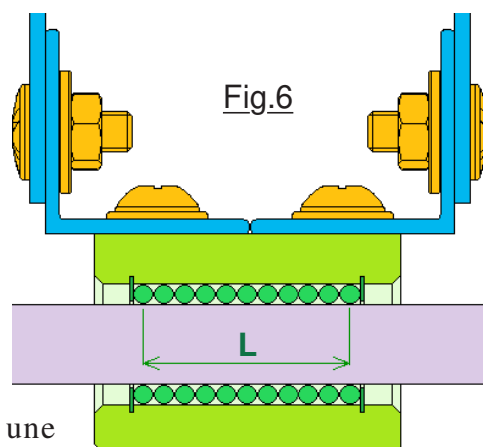
Entre les phénomènes d'inertie antagonistes et les freinages dus aux frottements et aux "contre courants" dans les bobinages du moteur, l'oscillation s'amortit et enfin, après avoir fait un "GLONC", le rotor se stabilise en position **P2**. Ces phénomènes sont de très courte durée, mais la machine n'en subit pas moins des "chocs" et de vibrations intenses. Pour limiter ce phénomène inertielle, l'électronique de pilotage va utiliser deux voies. La première consiste à effectuer une **alimentation sinusoïdale des bobinages**, c'est à dire que l'on va diminuer progressivement le courant dans **B1** et augmenter de façon dosée celui dans **B2**. Le rotor va alors passer de **P1** à **P2** "en douceur". La deuxième consiste à **diviser l'angle entre deux PAS** en un nombre notable de positions intermédiaires, toujours en dosant le courant entre les deux bobinages concernés. C'est ainsi que l'on multiplie artificiellement le nombre de PAS angulaires par deux, quatre, huit etc. (1600 positions sur le prototype.)

associée à de la **Vibration RV** va engendrer une oscillation amortie des montants verticaux. Ce phénomène sera d'autant plus pénalisant que la longueur de guidage **L** des douilles à billes reste faible. Pour aggraver la situation, le LASER pour sa part est constitué d'un radiateur relativement massif **M2** situé encore plus loin du guidage à hauteur **H2**. Par ailleurs, adoptant une structure entièrement métallique, contrairement à des matériaux comme le bois il n'y a aucun amortissement pour atténuer les phénomènes de résonance. Pour ceux qui le désirent, les Fig.4 et Fig.5 de l'encadré apportent plus de détails sur le phénomène de l'inertie mécanique qui "agresse" notre petite machine. Lors des premières tentatives, les moteurs faisant des "pas entiers", c'étaient carrément catastrophiques. Le bruit généré par cette machine était pénible jusqu'à l'étage d'en dessous de la maison !

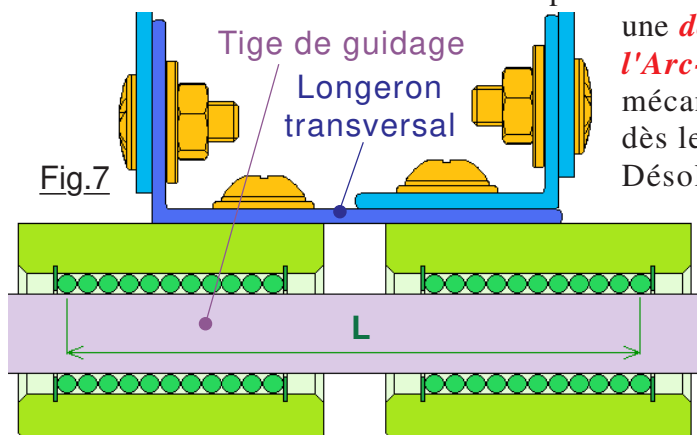
➤ **CHHHhhhhhhuuuutttt !**

Totalement inacceptable, vous vous doutez-bien que si la structure en potence a remporté le vote, c'est que la difficulté a été totalement résolue. Du reste, actuellement les mouvements du LASER ne produisent qu'une sorte de chuintement tellement discret que porte ouverte, dans la pièce voisine on n'entend plus que les deux ventilateurs du LASER. Pour résoudre le problème des inerties, il n'y a que deux voies possibles. Soit on diminue de façon notable les masses à accélérer. Dans notre application c'est impossible, puisque le LASER et le moteur PAS à PAS ont été sélectionnés sur des critères techniques "incontournables" et qu'il n'est pas question de remettre en cause.

Seule possibilité, diminuer "les coups de marteau". La solution consiste à utiliser des moteurs présentant des angles par mouvements élémentaires très faibles, en l'occurrence 1600 petits incréments par tour, et passer d'une position à une autre non pas de façon binaire, mais "sinusoïdale". Le comportement du moteur est alors plus proche de celui d'un moteur à courant continu que de celui d'un type PAS à PAS. Un tel moteur n'existe pas. C'est l'association d'une électronique de pilotage spéciale avec un moteur PAS à PAS banal que l'on aboutit à cette osmose technologique. On se doute que le module électronique qui réalise cette performance sera plus coûteux qu'un dispositif grand public plus ordinaire. C'est le prix à payer pour aboutir à une machine plus "professionnelle et d'un fonctionnement parfait".



Deuxième "surcoût" pour diminuer le bruit : *Augmenter la longueur de guidage L* pour diminuer les oscillations parasites résultant du jeu mécanique interne au guidage. Comme on peut le constater sur la Fig.6 qui respecte strictement les proportions dimensionnelles, la longueur réelle de guidage **L** d'une douille à billes est nettement inférieure à sa largeur qui ne fait que 30mm. La première option, qui pratiquement va tripler cette portée consiste à utiliser deux douilles comme montré sur la Fig.7 légèrement séparées. L'écart entre ces deux douilles est directement influencé par la largeur du **Longeron transversal** qui matérialise le corps du chariot **Y'Y**. Du coup, on augmente le coût du guidage car il faut "doubler la mise". Bénéfice collatéral de cet investissement, on dispose de deux fois plus d'échantillons pour *appairer douilles à billes et Tige de guidage*. Outre un allongement important du guidage, on va triller les éléments pour trouver deux douilles qui n'ont aucun jeu fonctionnel quand elles sont engagées sur la **Tige** qui les reçoit. Ces deux options conduisent à une solution tout à fait satisfaisante pour contrer les problèmes d'accélération. Il reste toutefois



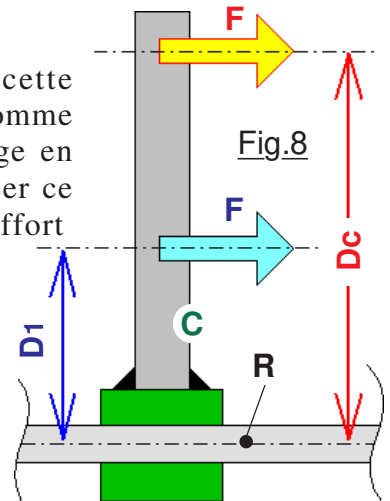
une **deuxième difficulté à vaincre, et pas des moindres : l'Arc-boutement**. C'est un phénomène bien connu des mécaniciens, raison pour laquelle il a été pris en compte dès les premières épures et les études de faisabilité.

Désolé, chère lectrice et cher lecteur, mais il faut encore se "cogner" un encadré de plus. C'est un incontournable si l'on veut comprendre l'agencement global de la structure de cette machine, et tout particulièrement la conception des guidages pour matérialiser la translation rectiligne du LASER de puissance.

Le risque d'arc-boutement dans les guigages.

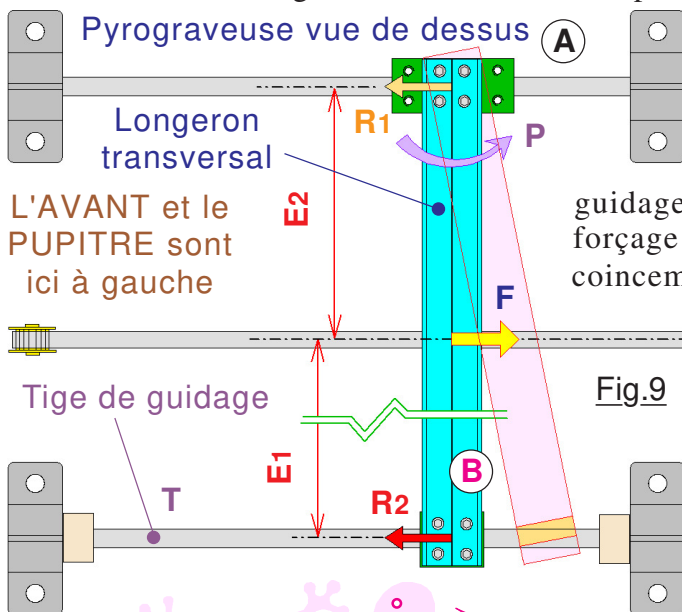
► Le phénomène d'arc-boutement.

Adhérence et frottements sont les deux responsables de cette complication qui trouve des applications bien commodes comme le serre-joint par exemple. Sur la Fig.8 est représenté le guidage en translation rectiligne d'un chariot **C** sur un "rail" **R**. Pour déplacer ce mobile et vaincre l'adhérence puis les frottements, on exerce un effort tel que **F**. Si la poussée est suffisamment proche de **R**, à distance **D1**, le mouvement est effectif. Si au contraire **F** est trop éloigné de **R**, à partir d'une distance critique **Dc**, ou plus loin du guidage, tout mouvement devient impossible. On peut forcer avec **F** à l'infini, les éléments se briseront mais refuseront obstinément tout déplacement. *Cette impossibilité à faire bouger alors que théoriquement les formes matérielles le permettent est nommée arc-boutement.* La valeur de la distance critique **Dc** à partir de laquelle le blocage cinématique se produit est directement fonction du coefficient d'adhérence ou de frottement qui sévit entre les surfaces de guidage. Il est d'autant plus faible que la longueur de guidage **L** est importante.



► Vaincre l'arc-boutement sur la pyrograveuse.

Déplacer le chariot **X'X** n'est absolument pas victime de ce phénomène, car la distance entre les deux barres de guidage et la bride de la courroie crantée qui exerce l'effort de translation est très faible. Il en va tout autrement pour le guidage **Y'Y**. Pour privilégier la plus grande course possible sur **X'X** on écarte au maximum les deux tiges du guidage **Y'Y**, ce qui conditionne directement la largeur de la machine. Si l'on veut minimiser le risque d'arc-boutement, il importe donc de diminuer au maximum la distance entre l'ancrage de la courroie qui exerce l'effort **F** et le guidage concerné. Toutefois, il y a deux guidages, donc minimiser l'écart conduit mathématiquement à tracter exactement entre les deux. Repérés sur la Fig.9 les deux écarts **E1** et **E2** devraient donc être identiques. Dans la pratique, *pour optimiser les conditions d'un bon fonctionnement*, on impose **E1** un peu plus grand qu'**E2** pour approcher la traction de la directrice de guidage. En effet, il ne faut pas oublier que les efforts parasites qui s'opposent au déplacement génèrent sur le guidage une action telle que **R1**. Hors l'effort **R1** étant décalé de **F** engendre une tendance au pivotement **P**. Concrètement, le chariot **X'X** va se



mettre très légèrement en diagonale. La conséquence de cette déviation n'est pas anodine. En caricaturant ce qui se passe, on voit bien que le chariot étant en travers, épure tracée en rose pâle, l'alésage de guidage colorié en orange s'écarte de la tige **T**. Le forçage mécanique qui en résulte engendre alors par coincement un effort résistant **R2** exagéré et tout se bloque. C'est pour palier ce problème que l'on favorise ce que les spécialistes nomment *du rotulage*. Dans ce but, contrairement à ce qui avait été fait pour les douilles en **A**, en **B** on va apparier la douille à billes et la tige **T** pour avoir le maximum de jeu interne. Ces diverses précautions aboutissent à un fonctionnement que l'on peut qualifier de parfait.

Ben Môa môa, ces explications fumeuses placées dans des rectangles je ne peux plus les encadrer !

LASERS et MASERS ne partagent pas le même ADN !

Purement culturel, ce chapitre peut être somptueusement ignoré si vous manquez de temps. Dans ce cas, oubliez cet encadré ... jusqu'à la retraite ! Pour précision de vocabulaire, contrairement à ce que l'on trouve partout dans le commerce en ligne, les dispositifs lumineux dont il est question ici ne sont pas des LASERS, mais des MASERS. Quelle est la différence ? Le LASER, qui est un amplificateur de lumière à amplification par stimulation de radiation, est un dispositif constitué d'une ampoule contenant du gaz que l'on ionise par courant électrique. Cet apport d'énergie génère de la lumière qui s'échappe du tube. On dispose deux miroirs parfaitement parallèles "qui se regardent" aux deux extrémités du tube. La lumière générée piégée entre ces deux réflecteurs effectue une infinité d'allers/retours et à chaque traversée déclenche de nouveaux photons. Comme l'un des deux miroirs n'est que semi-transparent, un pourcentage de lumière en sort sous la forme d'un faisceau particulièrement concentré. Le principe d'un MASER n'a rien à voir. Il est constitué d'un dispositif électronique qui s'apparente à une diode électroluminescente. Sa physique est conçue pour générer, comme ce que fait un LASER, de la *lumière cohérente, c'est à dire des photons qui circulent par paquets regroupés*. On obtient bien de la lumière cohérente, mais par principe de fonctionnement, le faisceau n'est pas concentré et il faut le focaliser avec une optique quelconque. Bref, LASER et MASER génèrent tous les deux de la lumière cohérente, ce qui lui donne cet aspect de milliers de petits points lumineux, mais la concentration du faisceau n'est pas du tout analogue. Du reste sur tous ces LASERS qui sont en réalité des MASERS, on est forcé de constater qu'il y a une divergence lumineuse plus ou moins importante. Comme sur tous les magasins en ligne ces dispositifs sont nommés à tort des LASERS, pour ne pas générer un risque de confusion, à mon corps défendant j'utiliserai donc partout dans ce didacticiel le vocable erroné de LASERS.

3) Justification des choix effectués pour réaliser les guidages et la motorisation.

Comme c'est le cas pour tout projet, qu'il soit industriel ou de loisir, ce sont les décisions qui sont prises au tout début qui engagent le plus. C'est précisément durant cette phase qu'il faut mobiliser beaucoup d'attention, bien analyser les enjeux et surtout vérifier impérativement la faisabilité. Le cœur de la petite machine envisagée se résume à un LASER de puissance, (*Voir éventuellement l'encadré proposé ci-dessus.*) des guidages et une motorisation. Par motorisation, les chapitres précédents ont clairement montré qu'il s'agit d'un moteur associé intimement à une électronique de pilotage spécifique pour étendre les caractéristiques intrinsèques de l'effecteur.

➤ Le choix de la tête à pyrograver.

Moins d'être spécialiste dans les dispositifs de gestion de LASERS de puissance généralement à bases de hacheurs fonctionnant à courants constants, il me semble incontournable de faire appel à un ensemble cohérent (*Sans jeu de mot avec l'encadré qui précède !*) comprenant à la fois le LASER et son électronique de pilotage. C'est un gage de réussite, tout particulièrement dans un environnement de loisir, alors que nous ne sommes spécialistes de RIENDUTOUT. Chez le fournisseur dont je mentionne le lien d'approvisionnement, on trouve divers modèles qui pour la puissance lumineuse s'échelonnent entre 3W et 20W avec des tarifs on s'en doute assez différents. N'ayant dans ce domaine aucune expérience, j'ai écarté les moins puissants, le 5,5W étant considéré comme un compromis acceptable entre le coût et la performance. *Notez au passage, que contrairement à ce que signale l'annonceur, je ne suis pas arrivé à marquer des surfaces métalliques.*

➤ La motorisation.

L'avantage fondamental apporté par l'utilisation de moteurs PAS à PAS réside dans la grande simplification qu'ils apportent, tant pour le matériel que pour le logiciel. Les automatismes qui les utilisent fonctionnent en *boucle ouverte*. C'est à dire que l'on a pas besoin d'ajouter à la machine des capteurs angulaires compliqués et précis pour que le logiciel puisse savoir quelle est l'orientation du moteur. On se contente de détecter une position de départ, puis en comptant ou en décomptant les PAS effectués, le logiciel calcule en permanence l'orientation de l'arbre moteur et en déduit la position sur l'axe du déplacement rectiligne. Cette approche apporte une simplification considérable, tant matérielle que logicielle par rapport aux *asservissements en*

boucle avec rétroaction. La contrepartie réside dans un fonctionnement en "aveugle". On doit faire confiance absolue au moteur, et si ce dernier "loupe un PAS" pour une quelconque raison, le logiciel n'en est pas averti et gère alors des coordonnées erronées.

CONCLUSION : *Il est totalement prioritaire que le moteur PAS à PAS puisse effectuer les rotations élémentaires quelles que soient les circonstances lorsqu'il en reçoit l'ordre. Le couple, qu'il soit de maintien ou pour effectuer une rotation incrémentale, doit dépasser en permanence les résistances passives, c'est à dire les inerties et les frottements.*

➤ **Le mode de pilotage des moteurs.**

Outre le nombre de positions possibles de 1600 par tour de l'arbre de sortie et la commande "sinusoïdale" des enroulements magnétiques, **le module TB6600 peut également gérer l'intensité qui sera appliquée au moteur.** Ce paramètre conditionne directement la valeur des accélérations, du couple de sortie et du couple de maintien. En particulier il doit rester plus grand en permanence que toutes les résistances passives pour satisfaire le critère de l'encadré jaune qui précède. Le module TB6600 gère des courants moyens compris entre 0,5A et 3,5A. Sur un moteur PAS à PAS le couple sur l'arbre de sortie est directement proportionnel au courant électrique traversant les bobinages ... mais également le dégagement de chaleur. Au début des études de faisabilité, pour s'assurer des mouvements sans failles, des essais à 1,5A ont été effectués. Impossible de caler le moteur en pinçant la poulie motrice. Au bout de quelques minutes de fonctionnement la température devenait vraiment notable, et à mon sens incompatible avec une longévité garantie, bien que les effecteurs 17HS4401 soient réputés pouvoir accepter 1,7A. Puis, l'expérience a montré qu'avec la technologie utilisée pour concrétiser les guidages, le courant de 1A convient parfaitement. C'est l'option de gestion, car en fonctionnement l'intensité absorbée est bien moindre. En maintien de position l'intensité chute à 150mA et durant les accélérations exigeant un appel de courant les crêtes ne dépassent pas 200mA. C'est du reste la raison pour laquelle le calibre de l'ampèremètre pour mesurer le courant sur **X** et sur **Y** n'est que de 0,5A à pleine déviation du galvanomètre. Pour ces intensités, la tension par bobinage est $\approx 5V$. La puissance dissipée par le moteur est respectivement de 1,5W et de 2W. À ce régime, les moteurs peuvent fonctionner 24H sur 24 avec une élévation de température pratiquement indécélable quand on place la main sur le corps du moteur PAS à PAS.

➤ **Le choix des glissières pour les guidages en translation rectiligne.**

Deux options sont pertinentes quand on désire concrétiser un guidage, qu'il soit en rotation, en translation ou hélicoïdal. La première, la plus ancienne, consiste à faire glisser la pièce femelle sur sa complémentaire mâle. On se heurte aux frottements, qui s'accompagnent d'une usure inévitable, donc d'une perte de précision du mouvement au cours de la vie de la machine. Par ailleurs, il y a obligation de ménager entre les pièces mobiles des jeux de fonctionnement qui forcément altèrent la précision du guidage en autorisant des petites libertés parasites. Le roulement élimine tous ces problèmes, d'autant plus qu'il peut se faire strictement sans jeu, voir avec un très léger serrage. L'inconvénient majeur réside dans le coût de cette technologie qui impose des matériaux sélectionnés, des traitements thermiques de surface et des usinages extrêmement précis. Avec l'industrialisation et la production mécanisée en très grandes séries, ces composants qui à une époque étaient strictement inabordables dans le cadre du loisir sont devenus presque ordinaires. On trouve une foule de tels dispositifs disponibles en ligne, et difficile d'effectuer un choix objectif lorsque l'on manque totalement d'expérience dans ce domaine. Il faut toutefois trancher, quitte à accepter un minimum d'arbitraire. Aussi, après avoir envisagé une variété substantielle d'opportunités, consulté les avis en ligne relatifs à bon nombre de fournisseurs, par un "pile ou face virtuel", j'ai fini par opter pour un intermédiaire entre "solution de luxe" et mécaniques médiocres dont les expérimentateurs indiquent les faiblesses. Pour des raisons d'encombrement hors tout de la machine, des glissières de longueur 300mm ont été adoptées, et rien n'interdit d'en choisir des plus longues, au prix d'une refonte totale des dessins de la machine, et une remise en cause de son architecture. (*Pensez à l'arc-boutement.*) J'estime que pour une machine de loisir, la surface couverte satisfait largement les besoins, d'autant plus que si l'on accepte un repositionnement précis de la cible sur la machine la longueur possible de gravure est potentiellement sans limite. La solution adoptée a démontré ses qualités. Lorsque l'on incline la machine plateau à la verticale, moteurs hors tension, que ce soit X ou Y les chariots se déplacent librement sous l'influence de leur propre poids entraînant le rotor du moteur.

4) Qui veut aller loin ménage sa monture.

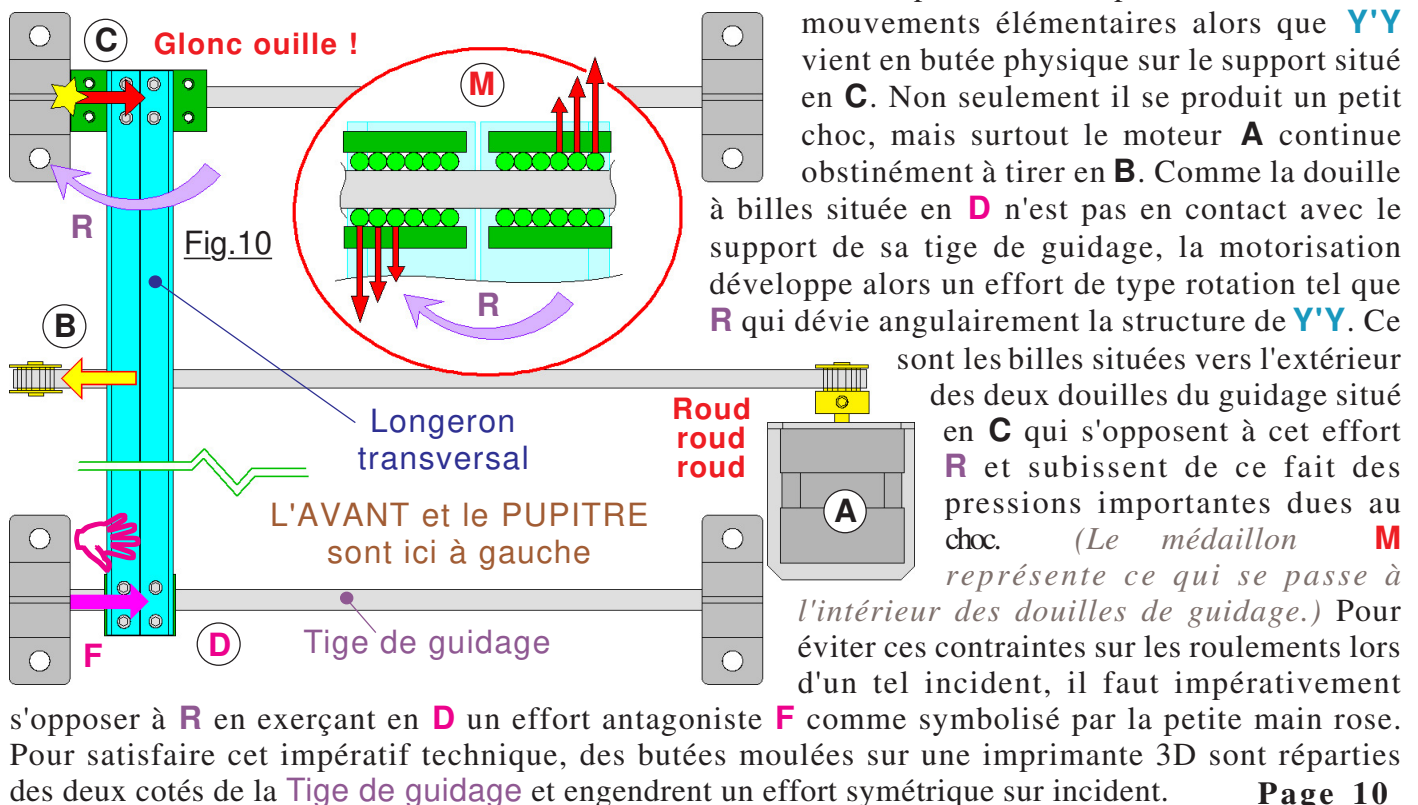
Longévité et fiabilité du matériel seraient un titre aussi pertinent. Dans les deux chapitres qui précèdent, nous avons décortiqué l'agencement global de la machine et détaillé sa structure ainsi que l'architecture de son "ossature". Dans ce chapitre, nous allons voir comment assurer la fiabilité de la pyrograveuse, que ce soit pour la garantie sur le long terme de sa précision et pour la longévité de ses organes mécaniques. Avant de développer cette facette "vitale", il semble judicieux de faire un petit résumé des techniques utilisées pour assurer le bon fonctionnement de l'ensemble.

- Sélection de guidages en translation rectiligne sur roulements pour soigner la précision des mouvements et privilégier la diminution des résistances passives qui s'opposent aux mouvements,
- Choix des moteurs de type PAS à PAS pour minimiser la complication technique et logicielle,
- Pilotage des moteurs PAS à PAS par l'entremise d'une électronique performante pour aboutir à des déplacements silencieux, fiables et précis. (*Définitions de 0,5mm pour les PIXELs pyrogravés.*)
- Géométrie globale minimisant les risque d'arc-boutement et longueur de guidage nettement augmentée sur l'une des deux tiges de guidage assumant la translation rectiligne du chariot Y'Y.
- Guidage conjugué sur Y'Y avec un peu de jeu fonctionnel pour réduire les risques de "coincement".

➤ **Un petit clic vaut mieux qu'un grand choc.**

L'adage populaire traduirait ce titre étrange par : "Il vaut mieux prévenir que guérir". Le risque potentiel résulte de la géométrie adoptée pour concrétiser le guidage en translation du chariot **X'X** qui présente la plus grande inertie lors des divers mouvements générés sur la machine. *Quoi que l'on fasse, il arrivera forcément un moment où le moteur PAS à PAS amènera le chariot en butée positive et produira de ce fait un choc mécanique.* Bien que le logiciel s'oppose à ce type d'incident et fige les moteurs si les coordonnées valides sont dépassées, une foule d'incidents peut inévitablement engendrer un dépassement logiciel. (*Coupure temporaire du 12V de puissance, les moteurs sont alors inertes et les comptages erronés, Origines Machine volontairement ignorées en opérations de maintenance etc.*) Les choix adoptés pour matérialiser les guidages engendrent un problème physique représenté sur la Fig.10 qui schématise ce qui se passe sur un tel incident :



Pénard et complètement aveugle, le "nez dans le guidon", le moteur PAS à PAS en **A** déplace avec frénésie le chariot **Y'Y** vers l'avant de la machine, tractant ce dernier par la poulie de rappel située en **B**. Durant les manipulations, l'opérateur a cliqué un moment sur le sectionneur d'URGENCE et l'effecteur **B** à "loupé des PAS". Le logiciel d'exploitation **P20** n'est pas au courant de cet incident et à un moment donné, sur une commande de déplacement, impose au TB6600 des

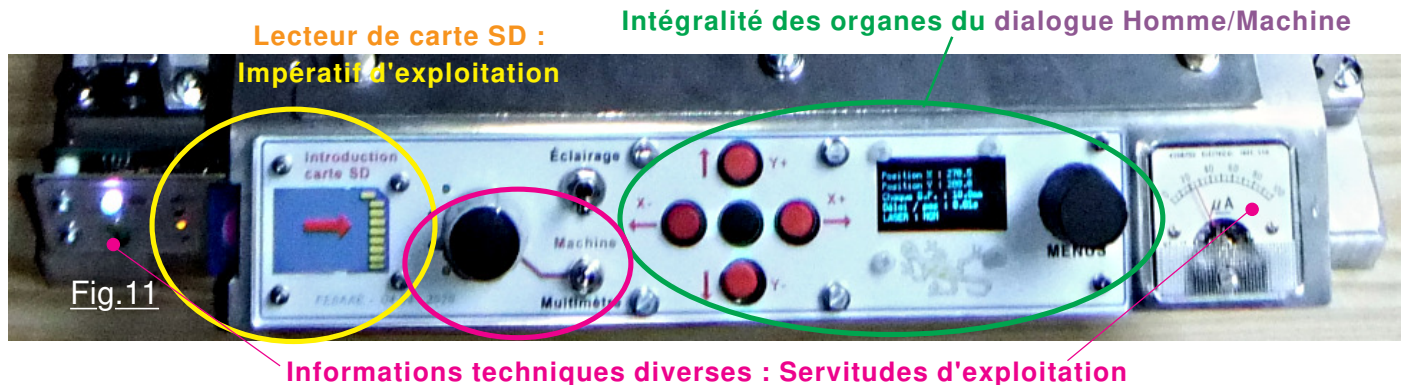


5) Le tableau de maîtrise.

Avouez que ce titre fait bien plus sérieux que si l'on avait choisi : Le PUPITRE de commande. Ce vocable de frimeur nous place dans le poste de pilotage d'un avion de ligne, et avec une assurance d'acteur de cinéma on se voit déjà admiré par les personnes présentes dans le local. Bon, arrêtons immédiatement ce délire, et passons en revue les dispositifs qui sont à la disposition de l'opérateur pour utiliser la machine ou en assurer sa gestion technique. On sera en présence de l'indispensable, et aussi d'un superflu relativement secondaire. Commençons par le nécessaire, à savoir le "*dialogue Homme/Machine*". La notion de dialogue suppose une entité qui parle, et une qui écoute. Puis les rôles s'inversent. Commençons par parler puisqu'en tant qu'utilisateur nous sommes sensés donner des consignes.

➤ Les organes sensoriels de la machine.

Outre les différentes broches configurées en Entrée binaire ou analogique, globalement le programme écoute l'utilisateur à travers deux "oreilles" qui sont le petit clavier à cinq touches et le codeur incrémental muni de son bouton poussoir central. Pour nous répondre et nous faire savoir ce qu'il a compris, sa "bouche" est matérialisée par l'afficheur OLED qui lui sert à rendre compte et répondre à nos questions. Sur un RESET, il affiche le **Menu de base**, (Voir Fig.13) qui nous précise ce qu'il peut faire pour nous satisfaire. Si on tourne le bouton  du codeur incrémental, en fonction du sens de rotation il déplace le curseur pour "accuser réception". Quand on clique sur **X+ ➡** ou que l'on sollicite le B.P. central du **C.I.**  il en déduit que l'on désire qu'il invoque la fonction actuellement désignée par l'index. CLAVIER et ECRAN constituent la clef de voûte pour



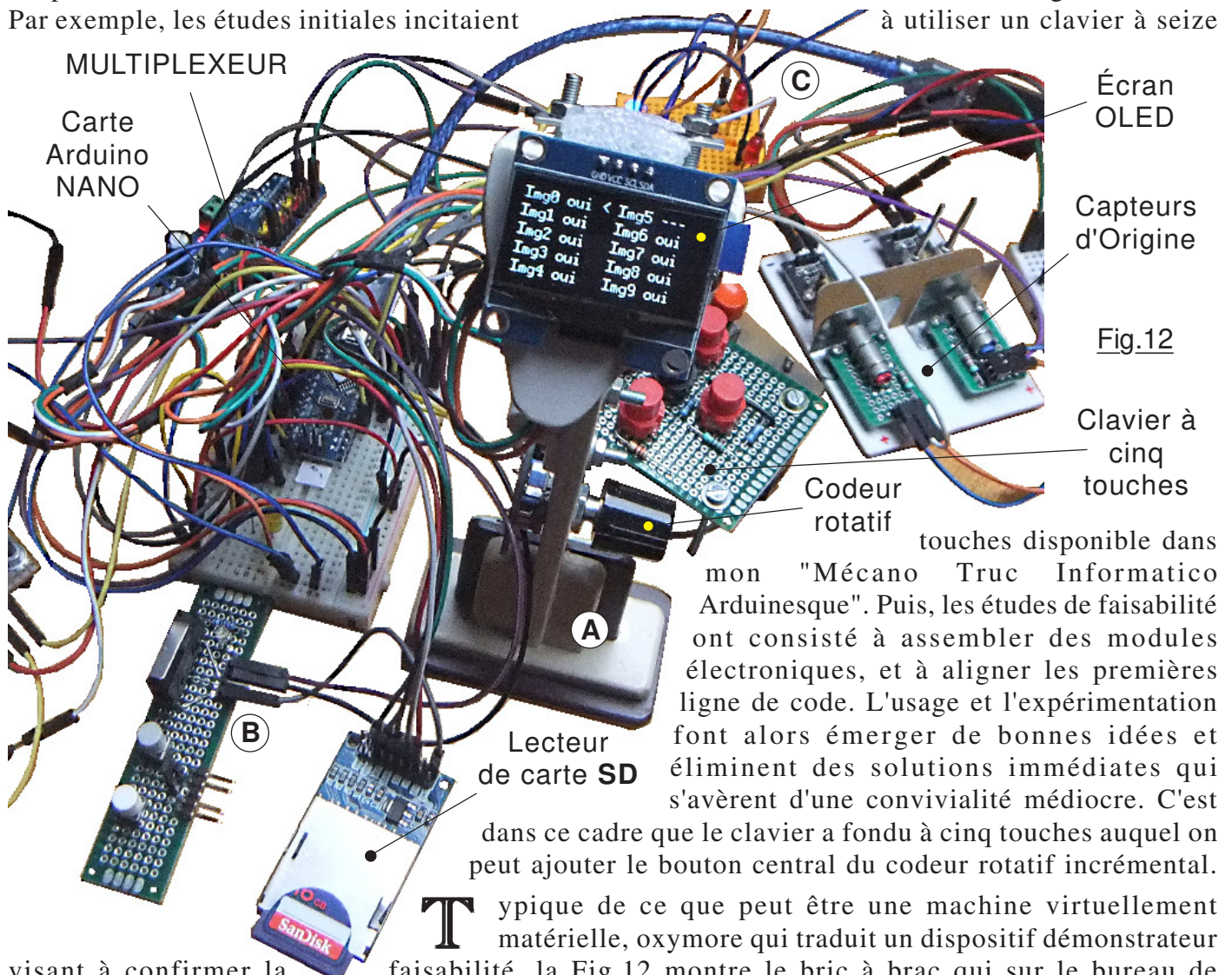
l'établissement du *dialogue Homme/Machine*, raison pour laquelle il faut en soigner l'ergonomie et la convivialité. Le premier critère pour satisfaire ces exigences consiste à placer les touches et le bouton du codeur rotatif dans une position et une orientation agréables à leur usage. Par ailleurs, l'écran doit lui aussi se trouver bien en vue sans obliger l'opérateur à des contorsions malcommodes.

➤ Ergonomie matérielle, ergonomie logicielle.

Impactant directement la qualité opérationnelle, c'est à dire l'agrément d'utilisation de la machine et son efficacité, il est vital dans tout projet de consacrer beaucoup de temps à ces deux aspects qui conditionnent la convivialité de l'ensemble. *L'ergonomie matérielle concerne le confort physique, alors que c'est le logiciel qui devra assurer l'agrément opérationnel, c'est à dire la facilité d'interprétation des données affichées, et induire les réactions de l'opérateur.*

Pour atteindre ce but, après divers essais de validation, la solution retenue consiste en fin de compte à disposer d'un petit PUPITRE incliné à 36° par rapport au plateau de la machine. La disposition du clavier et du codeur rotatif situés de part et d'autre de l'afficheur OLED privilégie les manipulations par des droitiers. (*Tourner un bouton est matériellement plus "compliqué" que se contenter d'appuyer sur un bouton. Donc le codeur rotatif est placé à droite et le clavier à gauche.*) Si vous êtes gaucher, je vous suggère d'invertir ces deux périphériques. Comme l'opérateur agit tout en surveillant les affichages sur OLED, c'est la raison pour laquelle ce dernier est situé entre les deux. La Fig.6 en page 4 du document **PLANS.pdf** présente clairement la zone relative au pupitre sur l'ensemble de la machine, ou plus particulièrement sur le statif. Il vous sera facile de constater sur les dessins cotés, que l'inclinaison par rapport à l'horizontale est de 36°. Cette pente a été choisie après divers essais sur des maquettes improvisées en carton rigide pour déduire la meilleure inclinaison pour optimiser l'ergonomie matérielle tout en satisfaisant les contraintes matérielles. (*Pour loger les organes comme le galvanomètre 100µA par exemple et accéder au sectionneur de SÉCURITÉ ...*)

L'ergonomie logicielle résulte de plusieurs éléments auxquels il faut toujours consacrer du temps, je crois même qu'il faut commencer par établir un scénario d'utilisation de la machine avant d'écrire la moindre ligne de code pour Arduino et de percer des trous dans des profilés. *On commence par définir tout ce que l'on aura envie de faire sur la machine, et on ajoute tout ce que l'on devra assumer, comme la maintenance par exemple.* Puis on élabore des protocoles. On cogite, on simplifie, on efface, et l'on remet en cause. Arrive le moment où l'on a élaboré une stratégie cohérente. Par exemple, les études initiales incitaient à utiliser un clavier à seize



typique de ce que peut être une machine virtuellement matérielle, oxymore qui traduit un dispositif démonstrateur visant à confirmer la faisabilité, la Fig.12 montre le bric à brac qui sur le bureau de l'ordinateur assemble petit à petit les différents organes de la future machine en gestation. En effet, il serait bien pénalisant de passer des heures à peaufiner l'affichage du contenu d'une carte **SD** si par la suite on n'arrive pas à gérer le lecteur de carte et d'en extraire les informations contenue dans un fichier image. Aussi, la faisabilité consiste à écrire des séquences de programme minimales pour s'assurer que nous serons capables d'afficher des textes sur l'écran, de décortiquer un fichier *gcode*, de faire tourner les moteurs, et d'allumer à notre convenance le LASER de puissance. Aussi, bien que la Fig.12 ne soit qu'une pyrograveuse virtuelle, car pour le moment les chariots n'existent que dans les octets de fichiers informatiques, sur le bureau sont déjà interconnectés tous les modules vitaux de la machine. Comme le développement du programme prend des semaines, vous pouvez constater en **A** le support de l'afficheur et du codeur incrémental ... ergonomie minimale impérative ! En **B** des "bricolos" complémentaires permettent d'élaborer des stratégies, avec un peu caché en **C** un support avec des LEDs et autres composants. Sur cette photographie, on peut remarquer l'approche progressive des solutions adoptées. Par exemple sur l'écran OLED l'affichage du contenu d'une carte **SD** est en cours de développement pour en dégager l'ergonomie visuelle. Les protocoles d'exploitation commencent également à tenir la route, et pour en démontrer la pertinence, le clavier définitif qui sera intégré à la pyrograveuse est développé et mis en service. Prenez un peu de temps pour me rendre une petite visite et voir le bureau de l'ordinateur sur [Image25.JPG](#) qui se trouve dans le dossier <Galerie d'images\Les circuits électroniques>. L'espace "de confinement" **Page 12**

pour programmer Arduino est très réduit. Pourtant, dans ce fatras de liaisons électriques et d'éléments hétéroclites, pratiquement l'intégralité des modules qui conditionneront la future machine est opérationnelle, et le logiciel déjà bien avancé. Ça tourne ...

► Une approche prudente et chronologique.

C'est durant cette phase primordiale où petit à petit les éléments s'ajoutent, tant mécaniques, électroniques, informatiques, et que se dégagent les besoins avec une ergonomie logicielle qui s'étoffe au fil des expérimentations. Développer un projet n'est pas un processus linéaire, mais une suite d'atermolements avec des avancés et des reculs, des remises en cause fréquentes, pour lentement mais sûrement "faire émerger le futur". On peut ainsi s'assurer que les protocoles envisagés sont réellement agréables lors de l'usage de la machine. C'est par exemple au cours de ces "démonstration" que la nécessité de prévenir l'opérateur que le programme `P20_Programme_exploitation.ino` attend une action sur le clavier, qui sur notre machine prend la forme d'une LED verte qui se met à clignoter. *Parallèlement on développe les dessins, on commande les éléments mécaniques, mais surtout on ne commence pas à percer tous les trous dans les plaques qui vont constituer le statif*, car à ce stade, nous ne savons pas encore quel sont tous les modules qui devront s'y voir assembler. La répartition de ces derniers ne sera raisonnable que lorsque électronique et informatiques seront pratiquement aboutis. *Et surtout, lorsque l'on sera certain que l'on a pensé à tout, il faudra prévoir sur le statif dans toutes les zones encore "vierges", des emplacements pour des circuits imprimés supplémentaires et percer les trous pour leur fixation éventuelle*. Le pire ennemi pour un concepteur réside dans la précipitation, ne pas résister et débiter trop prématurément les usinages.

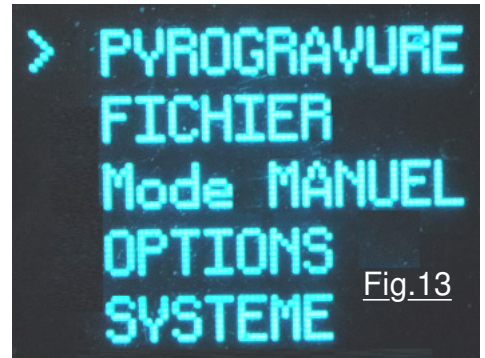


Fig.13

6) Quelques éléments participant à l'ergonomie logicielle.

Particulièrement délicate à formuler, l'ergonomie logicielle étant relative à l'interaction entre l'opérateur et la machine est directement fonction du fonctionnement mental de ce dernier. Chaque individu aura une logique intime qui lui est personnelle. Elle peut s'avérer directement opposée à la vôtre et pourtant ne pas être du tout dénuée de bon sens. Aussi, dans ce qui suit il faut s'attendre à des étonnements de votre part, d'où l'immense avantage de pouvoir éventuellement modifier le programme d'exploitation pour accorder son comportement conformément à vos attentes.

Considérons la Fig.13 qui présente le **Menu de base**, tel qu'il se présente suite à un RESET. Vous remarquerez qu'au sommet de la hiérarchie on trouve **PYROGRAVURE**, ce sera le sous-menu qui sera pointé à la mise sous tension de l'ensemble, car "logiquement" ce sera l'action la plus fréquente sur cette machine. Si l'on désire faciliter le travail de l'opérateur, l'écran doit être dépouillé au maximum. Du reste, conformément aux règles d'écriture en imprimerie, la police de caractère choisie dans la bibliothèque `<U8glib>` est une police sans sérif. Des écrans plus fouillés avec huit menus ont été testés et rapidement écartés pour "éclaircir" et simplifier. Nous avons vu que pour attirer l'attention de l'opérateur quand le programme attend la frappe d'une touche au

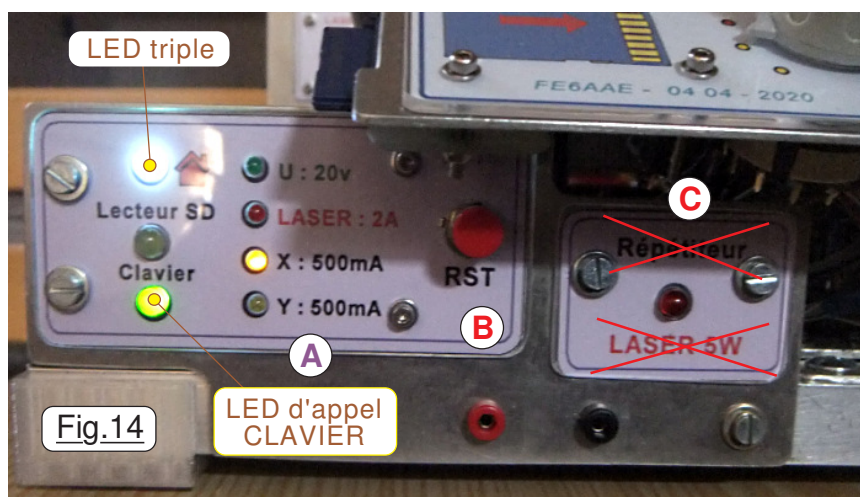


Fig.14

CLAVIER, une LED verte clignote sur le TABLEAU des LEDs. (Fig.14) À l'usage, on se rend compte que ces témoins lumineux deviennent presque secondaires surtout si l'on grave souvent. Aussi, pour ne pas trop attirer l'attention ils sont regroupés sur une zone à part et un peu "à l'écart" du PUPITRE. Toujours dans cette optique, en A les LEDs du répétiteur des calibres de l'ampèremètre sont de diamètre 3mm pour se montrer plus

discrètes que les trois autres de diamètre 5mm plus orientées utilisation. Dans le même ordre d'idée, pour épurer le tableau des LEDs, trois d'entre elles relatives à la saisie des *Origines Machine* sont regroupées en une seule triple de type RVB. Le bouton de RESET en **B** est un peu caché sous le PUPITRE pour des raisons de sécurité. Suffisamment accessible pour l'opérateur, il reste discret, évitant ainsi qu'un visiteur curieux ne clique dessus alors que depuis déjà vingt minutes une pyrogravure est en cours sur une belle plaque en bois de rosier. La LED en **C**, comme le précise l'étiquette qui sur cette photographie n'a pas été encore changée, concernait le "**Répétiteur du LASER**". À l'usage, machine terminée, il s'avère que l'information qu'elle délivre est relativement pertinente et n'était pas assez visible. L'emplacement de cette LED devenue disponible a été réaffecté à une LED triple RVB pour visualiser les "éléments moteur" : Consulter la parenthèse nommée **7) Modification ultime, la der des der !** en page 18. Une autre LED pour le **Répétiteur du LASER** a donc été tardivement ajoutée bien visible en **F** de la Fig.15 et insérée dans un fourreau idoine sur le coté gauche du PUPITRE que l'on retrouve en **G**, avec en **D** le commutateur des calibres de l'ampèremètre. Cette LED fait partie intégrante du PUPITRE, raison pour laquelle elle est indépendante du plateau **A**. Son fourreau support traverse une petite plaque immobilisée en **B** sur le PUPITRE au moyen d'un petit boulon à ϕ M2. Noter au passage que les écrous ϕ M4 qui immobilisent le plateau **A** et le PUPITRE **G** sur les colonnes du statif sont enveloppés en **C** par des cabochons moulés avec une imprimante 3D. D'autres détails sont visibles en gros plan sur [Image26.JPG](#).

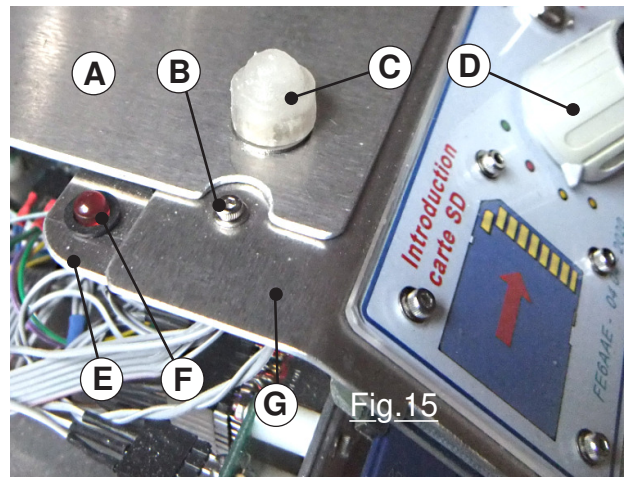


Fig.15

► **Tourner dans le bon sens ... pas si simple à formuler.**

Établissant instinctivement un lien virtuel direct entre le sens de rotation du codeur incrémental et le déplacement vertical du curseur sur l'écran OLED, il importe par ergonomie mentale de respecter la façon dont fonctionne notre intellect. Considérons la Fig.16 qui suppose un "menu" à une seule colonne, comme le *Menu de base* par exemple. Assimiler un sens de rotation positif et un curseur qui "monte" tombe sous le sens. (*Jeu de mot débile !*) La réciproque coule également de source, encore que ce comportement nous semble naturel parce-que le bouton qui tourne est situé à droite de la colonne de texte. On associe une sorte de frottement entre le bouton et le curseur. Si l'écran présente deux colonnes de texte, comme c'est le cas pour afficher la liste des fichiers présents sur la carte **SD**, il en va tout autrement. Autant pour la colonne de gauche, faire monter et descendre le curseur sera psychologiquement analogue au ressenti de la Fig.16, autant quand l'index va arriver en haut ou en bas il se produit un chamboulement, car notre pensée peut alors privilégier deux logiques contradictoires tout aussi pertinente l'une que l'autre. Supposons que sur la Fig.17 le curseur est arrivé en bas. On fait un pas négatif de plus sur le codeur rotatif.

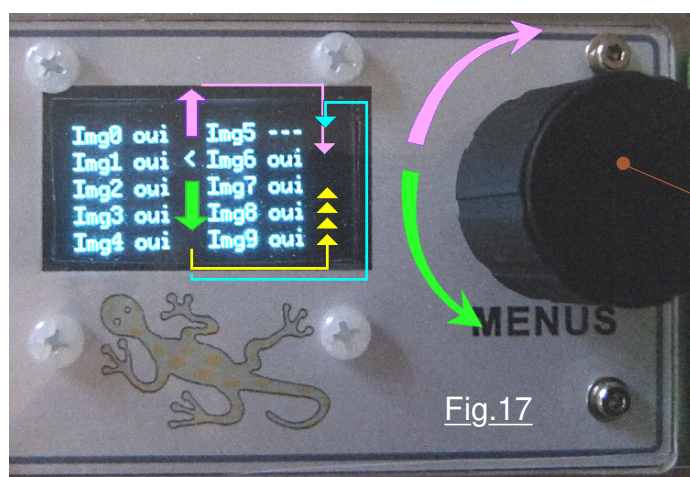


Fig.17

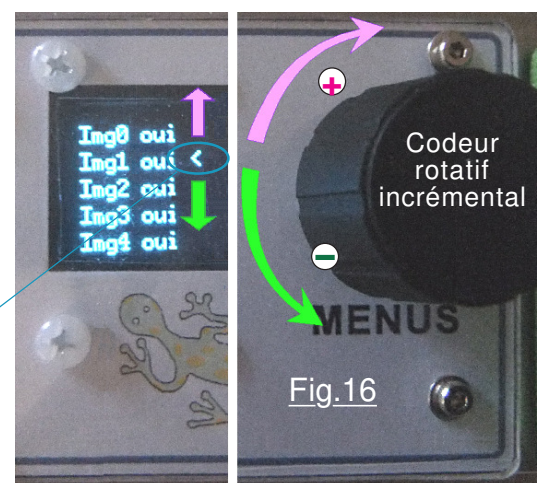


Fig.16

On peut alors imaginer deux cas "naturels". Pour le premier représenté en jaune le curseur effectue une sorte de permutation circulaire et continue de l'autre coté en remontant. Dans la continuité du mouvement du curseur ce

déplacement ne choquera pas "visuellement notre cerveau, et on continuera à tourner dans le sens négatif pour l'amener vers le haut. Sauf que sous l'hypothèse de cette solution, maintenant il y a inversion par rapport à la logique de la Fig.16 si bien que si le curseur est laissé à mi-hauteur, puis qu'en différé on désire à nouveau le déplacer, cette fois notre mental voudra respecter "les sens rose et vert". Deuxième possibilité, on se campe sur nos positions. Puisque le bouton tourne dans le sens négatif, le curseur continuera à descendre. Logique ! Pour ce faire, il suffit de faire "recycler" l'index en haut de la colonne de droite comme le suggère la flèche tracée en bleu clair.

- Et alors, où est le problème Totoche ?

Lorsque le menu **FICHIERS** s'ouvre, il présente la liste des images présentes sur la carte **SD** avec la présentation de la Fig.17 sauf que l'index pointe alors **Img0 oui** qui se trouve en tête d'affiche ce qui semble vraiment banal. Supposons que dans ce contexte, l'opérateur désire pointer **Img6 oui** et y déplacer le curseur *par le plus court chemin*.

- Et alors ?


Il suffit d'utiliser la machine pour se rendre compte que régulièrement on va se tromper dans le sens de rotation, car dans ce cas particulier, notre mental va imaginer une recirculation "par le plus court chemin", c'est à dire le déplacement symbolisé par la flèche rose.

- Et oui Dudule, en ce bas monde deux et deux ne font pas toujours quatre !

- Misère lacrymale, mais alors on n'est fichu pour la conoravivialité truc alors ?

- Ben non Dudule, il suffit de raisonner autrement.

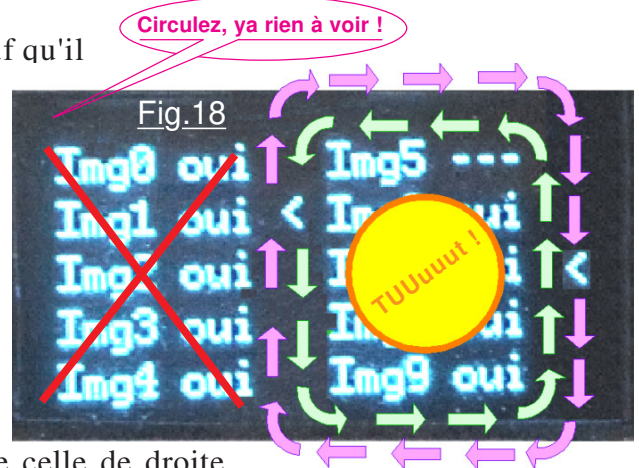
Facile à affirmer péremptoirement après coup, sauf qu'il

faut avouer confusément que je n'y ai pensé personnellement qu'en rédigeant ce tutoriel, idée qui a provoqué la dernière modification du programme le 6 Juin 2020 alors que la machine fonctionne déjà parfaitement depuis des semaines. Lorsque l'on affiche la liste des fichiers, c'est le seul écran à présenter deux colonnes avec le curseur qui circule sur "deux voies". Le sens dans lequel on doit tourner le codeur rotatif  pour indexer un fichier devient "naturel" si l'on imagine, comme montré sur la Fig.18,

que la colonne de texte de gauche n'existe pas, et que celle de droite constitue un "rond point" autour duquel circule de curseur. Il devient alors évident mentalement de tourner dans le bon sens quand on désire faire "déplacer" le curseur "par le plus court chemin". Modifier **P20_Programme_exploitation.ino** pour obtenir ce comportement attendu n'a coûté que 44 OCTETS dans l'ATmega328, c'est vraiment une broutille au regard de la commodité gagnée, et ce d'autant plus que **PYROGRAVER** et **FICHIER** sont les deux menus de loin les plus sollicités.

Si certaines ou certains d'entre vous préfèrent le comportement présenté en Fig.17, la solution est très simple : Il suffit de remplacer par la procédure listée ci-dessous celle de **P20**. - *Fastoche non ?*

```
void TRAITE_LA_ROTATION_DU_CODEUR_INCREMENTAL() {
  INT_active = true; // Armer un nouveau comptage.
  Rotation = false; // Prise en compte du traitement.
  //----- Ajuster la valeur du curseur -----
  if ((Menu_en_cours == 1) || (Menu_en_cours == 2)) { // Indexer l'un des 10 fichiers.
    if (Sens_positif) {if (Num_Img_indexee > 0) Num_Img_indexee--; else Num_Img_indexee = 9;}
    else {Num_Img_indexee++; if (Num_Img_indexee == 10) Num_Img_indexee = 0;}
    Liste_contenu_SD(); // Affiche la liste de l'état des fichiers et positionne '<' sur le fichier pointé.
  } else {if (Sens_positif) {if (Curseur > 1) Curseur--; else Curseur = 5;}
    else {Curseur++; if (Curseur == 6) Curseur = 1;}}
```





Ben Môa môa, il me fiche le tournicoton ce truc rotatif qui recircule dans en sens qu'on sait pas lequel à l'avance !

➤ Le rouge et le noir.

A l'instar de Stendhal, comme pour son roman, ces deux couleurs vont symboliser le repos pour le NOIR et le RISQUE pour le rouge. Ces deux teintes étant adoptées pour les boutons poussoir du CLAVIER ne sont absolument pas le fruit du hasard, pas plus du reste que leur nombre et leur disposition. Toujours dans la recherche d'une simplicité maximale pour manipuler la machine, la géométrie du clavier résulte d'un compromis entre "sobriété" du nombre de touches et besoins générés par les divers menus d'exploitation. C'est principalement le **Mode MANUEL** qui incite à utiliser un clavier de type "quatre directions". Par ailleurs, allumer et éteindre l'écran se retrouve dans plusieurs menus, aussi, ajouter une touche entre les quatre "de déplacement" s'est rapidement imposé. Ainsi organisé géométriquement le clavier se montre agréable à utiliser en toutes circonstances. Comme les quatre touches "de déplacement" peuvent déclencher des actions potentiellement risquées, comme vouloir déplacer alors qu'un obstacle bloque l'un des chariots, ou déclencher intempestivement une gravure, ces boutons poussoir ont été sélectionnés avec une couleur rouge. Quand à la touche centrale, affectée principalement pour éteindre l'écran durant les longues opérations de gravure ou de vérification de fichier, le noir s'est invité tout naturellement.

➤ Philosophie globale du "dialogue Homme / machine."

Respecteur une homogénéité de comportement du programme d'exploitation lorsque l'on passe d'un menu à un autre est strictement impératif pour aboutir à une machine agréable à utiliser. C'est un critère à forte priorité lors de la conception du PUPITRE de maîtrise de la machine. De nombreuses approches ont été testées, très différentes les unes des autres, pour arriver à faire émerger un compromis acceptable pour concilier tous les protagonistes, c'est à dire satisfaire l'utilisateur, simplifier au maximum le matériel et le logiciel, n'adopter que des composants ordinaires et peu onéreux. *(Un écran multicolore par exemple offrirait plus de possibilités, son prix toutefois ne serait pas le même, sans compter la gourmandise en OCTETs de sa bibliothèque.)* Le prototype tel qu'il est décrit dans ces lignes est issu de très nombreuses heures à construire de la convivialité. Les grandes lignes de comportement retenues sont les suivantes :

- **Le codeur rotatif**  **servira à indexer les items dans les divers MENUS** affichés à l'écran,
- **Le bouton central du C.I.**  **servira à valider un item ou à en sortir,**
- Le **CLAVIER servira dans un MENU** à effectuer des actions contextuelles.
- Des items induisant des actions équivalentes, comme allumer ou éteindre l'écran par exemple, utiliseront les mêmes touches du clavier pour les déclencher.
- Si le programme d'exploitation est en attente d'une réponse de l'opérateur de type OUI / NON, seule la touche **Y+ ↑** **correspond à OUI**. Toutes les autres touches seront interprétées comme une négation. La touche **Y+ ↑** est choisie car le rouge correspond à l'avertissement pour l'opérateur que l'action peut être potentiellement "risquée", et **↑** fait penser à la notion de MAXIMUM.
- Quand on sort d'un item activé, le programme ramène l'utilisateur au menu qui a servi à l'appel de ce dernier et continue à indexer l'option que l'on vient de quitter.

On se doute que la rigueur absolue strictement sans cas particulier dans ce domaine n'est pas réaliste. Nous verrons dans le chapitre qui suit quelques exceptions à ces comportements homogènes qui sont globalement respectés par le logiciel **P20_Programme_exploitation.ino**.

➤ S'écarter un peu de la philosophie générale.

Dérogation fortement suggérée par la pratique, l'écart de conduite résulte d'un comportement induit par le contexte dont on sera victime avec le **Menu de base** et en menu **SYSTEME**.

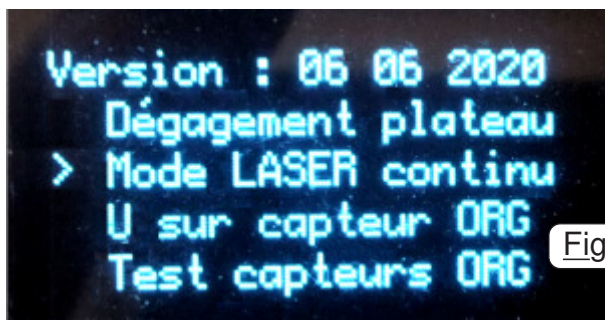





Fig.19


Quand on n'utilise pas la machine depuis un certain temps et que l'on a perdu le réflexe conditionnés qui consiste à cliquer sur le B.P. central du **C.I.**  pour déclencher une action, le curseur orienté vers la droite ressemble tellement à la flèche de **X+ ➡** qu'instinctivement on clique sur cette dernière et on déclenche le BIP sonore d'avertissement qui signale que l'on s'est fourvoyé. Cet incident reste fréquent de devient rapidement agassif. Aussi, pour ne plus risquer de perdre


notre calme, le logiciel a été modifié. Pour les deux menus cités, le B.P. central du **C.I.**  et la touche **X+ →** seront équivalents pour déclencher une action. *Participant largement à la convivialité logicielle, le petit BUZZER* rendra compte de l'état système dans deux cas, attirant l'attention de l'opérateur. Quand on cliquera sur une touche du clavier qui dans certains menus n'a aucun effet, l'avertissement sonore sera déclenché signalant : "Inutile d'insister lourdement Totoche !". Il sera également provoqué à la fin de l'analyse d'un fichier image ou lorsqu'une pyrogravure s'achève. Dans les deux cas, si la machine ne se trouve pas à proximité de l'opérateur mais dans la pièce voisine, le fonctionnement est discret. Prévenir l'utilisateur qu'il peut engager une autre manipulation est indispensable. C'est d'autant plus vrai que lors de l'analyse d'un fichier image qui peut prendre un temps important, la machine est totalement silencieuse. Prévenir de la fin est indispensable.

➤ Le cas particulier du menu **OPTIONS**.



Contrairement à la philosophie générale explicitée en page 16, pour le menu **OPTION** ce sont les deux touches **Y+ ↑** et **Y- ↓** qui vont servir à déplacer verticalement le curseur et non le codeur rotatif . En observant la Fig.20 de la page écran du menu **OPTION** on comprend immédiatement que le paramètre du pourcentage **LASER** peut prendre 100 valeurs différentes. Pour le **Délai** la valeur sera comprise entre 0,01S et 9.99S et peut changer par incréments de 0,01S. Dans



ces conditions traiter chaque paramètre avec le clavier serait vraiment laborieux. Il est infiniment plus agréable de tourner un bouton. Le comportement de programme est dans ce cas assez "naturel". Quand le codeur rotatif  tourne dans le sens **2** le ruban augmente vers droite dans le sens **3** ou le sens **4**. Le paramètre qui se modifie est celui indexé par le curseur en **1**. Lorsqu'il pivote vers **5** alors les rubans évoluent dans les directions **6** ou **7**. Pour déplacer le curseur vers le haut ou vers le bas, c'est instinctivement que

l'on cliquera respectivement sur **Y+ ↑** ou **Y- ↓**. Si l'on désire modifier l'une des valeurs faiblement, des incréments de 1% ou de 0,01S sont parfaits. Par contre passer de 0,01S à 9.99S va prendre des lustres et complètement user le codeur rotatif et surtout la sérénité de l'opérateur. Aussi, les touches **X- ←** et **X+ →** dont les flèches instinctivement signifient "moins" ou "plus" sont les bienvenues pour changer la valeur des incréments. Chaque pas sur le codeur rotatif  changera la valeur de 1 si on a cliqué sur **X- ←** et de 10 dans le cas de la touche **X+ →**. Avec le **LASER** et des incréments de 10 on couvre rapidement la plage complète. Pour le **Délai**, à coups de 0,1S c'est bien plus laborieux. Deux artifices logiciels sont mis à contribution pour faciliter la manipulation. Quand on arrive en extrémité d'échelle, il n'y a pas effet de butée virtuelle. Si on continue de tourner sans changer de sens le ruban "saute à l'autre extrémité". On passe ainsi instantanément de "rien" à "tout" ou réciproquement. Dans cette option, éteindre l'écran n'est pas très utile, vu qu'en principe après avoir choisi les deux paramètres on va enchaîner sur **Mode MANUEL** ou sur **PYROGRAVURE**. Aussi, cliquer sur la touche noire fait passer à 50% et à 0.50S. Comme pour beaucoup de matériaux on va privilégier des pyrogravures rapides avec des valeurs de **Délai** courtes. L'échelle du bas passe à une plage de variation de 1s si le paramètre devient inférieur ou égal à la seconde.

➤ Le cas particulier de l'item **Test capteurs ORG**.

Simple servitude d'exploitation, cette option ne sera utilisée que rarement, notamment quand sur **RESET** la LED triple éclaire en violet pour attirer l'attention de l'opérateur sur le fait que la vérification des capteurs d'*Origine Machine* a échoué. Ce sera le cas chaque fois qu'une mise sous tension sera effectuée, alors que pour une quelconque raison l'un des deux capteurs est occulté par le couteau de détection. Dans ce contexte, la machine étant en **VEILLE**, on dégage manuellement les deux origines. Puis dans le menu **SYSTEME** on valide l'item **Test capteurs ORG** avec **X+ →** ou avec le B.P. central du **C.I.** . L'écran OLED repasse au **Menu de base** sans afficher le résultat du test. En réalité on a ouvert et refermé l'option en un seul clic. La réponse est alors sur la LED triple qui reste en violet s'il y a réellement un problème de capteur, ou allume en "Bleu vert" cyan si tout va bien. Ce comportement du programme minimise la taille du code objet car il n'y a pas de texte différencié à présenter sur l'écran OLED. De plus, la manipulation est plus simple pour l'opérateur car il n'a pas à cliquer sur un bouton poussoir de **CLAVIER** pour passer à la suite et revenir au menu **SYSTEME**, puis encore une fois sur  pour retrouver le **Menu de base**.

P our terminer ce chapitre sur l'ergonomie logicielle, citons au passage les nombreux affichages temporaires qui précisent ce qu'est en train de faire la machine comme en **D** de la Fig.21 par exemple. En **E** l'analyseur syntaxique prévient qu'il a détecté une anomalie dans le fichier image. (*Valeur sur X ou sur Y hors limites machine.*) En **C** il s'agit d'une consigne. Le programme attend alors que l'opérateur donne l'ordre de passer à la suite en cliquant sur une touche quelconque du CLAVIER dont la LED verte clignote pour informer l'utilisateur de cette nécessité. L'écran **A** est celui du **Mode MANUEL** qui affiche en permanence les paramètres pertinent durant cette phase. Ici, le texte **LASER : NON** précise que les déplacements se font sans gravure, le B.P. noir inversant ce paramètre. L'écran **B** est celui du début d'une **PYROGRAVURE** précisant dans la ligne du bas une estimation très approximative de la durée que prendra l'opération complète. Le signe **±** qui précède la valeur informe qu'il s'agit d'une évaluation grossière.

Position X : 0.0
Position Y : 202.0
Chaque B.P. : 10.0mm
Délai par pas : 0.01s
LASER : NON

; Img1 LOGO gris.
Taille 294 lignes
Origine X = 0.00
Origine Y = 0.00
Gravure : ± 2 min

C Focaliser le LASER.

D > Capture ORIGINE <

E Valeur X ou Y > MAX.

7) Modification ultime, la der des der !

C omme si c'était la définitive et que le logiciel d'exploitation sera définitivement taillé dans du marbre. Fadaise, nous savons bien qu'à un moment ou à un autre on découvrira un "bug" à corriger, ou une superbe nouvelle idée absolument géniale qui nous oblige à tout refaite.

C'est arrivé le 7 Juin alors que tout allait pour le mieux dans le meilleur des mondes, et dans le but d'avancer ce didacticiel, pour la sempiternelle fois j'ai réactivé le **Mode MANUEL** pour vérifier un ou deux détails d'affichage. La machine était uniquement alimentée par la ligne USB d'Arduino. Comme prévu, le programme commence par rechercher l'origine machine, et la LED rouge de la Fig.14 en page 13 clignotait signalant que l'un des deux moteurs pas à pas était commandé pour déplacer le LASER sur X ou Y. Comme les moteurs n'étaient pas en énergie, je m'attendais à un clignotement sans fin de cette LED jusqu'à intervention manuelle de ma part. Et d'un seul coup ... POUF, plus rien ne se passe, le programme semblant bloqué. Frustrant non ?

S uite à une analyse fébrile et nerveuse de **P20**, j'ai fini par trouver la cause de ce comportement parfaitement normal : La procédure de déplacement engendre dans ces conditions un débordement virtuel des limites machine. Du coup, les impulsions qui font faire des pas ne sont plus envoyées pour protéger des collisions. La LED rouge reste alors noire et tout semble coincé. Cet incident n'est donc survenu que par le fait que je n'avais pas d'information sur le débordement des limites machine, car le BIP sonore d'avertissement n'est généré que si l'on dépasse une limite par une commande clavier. Ne pas avoir cette information m'a alors semblé inacceptable sur une machine expérimentale. Aussi, le circuit imprimé de la LED rouge a été remplacé par une nouvelle plaquette pas bien plus grande, mais qui supporte maintenant une LED triple. Elle s'illumine en **Verts** quand le moteur X'X est sollicité. Elle clignote à **Bleu** lorsque c'est Y'Y qui bouge. Enfin, que ce soit X ou Y qui engendre un dépassement de limite machine, alors elle s'illumine en **Rouge**. Sans rien changer au tableau de maitrise ou à la plaque qui supporte le module des LEDs, actuellement la LED cachée sous le pupitre nous fournit trois fois plus d'informations. - **Génial non ?**

Cette modification est d'autant plus aisée à conduire que sur le multiplexeur il restait huit sorties PWM non affectées. Les broches correspondant à **S1** et **S2** ont été choisies car relativement "dégagées" sur le module PCA9685. Actuellement on en sollicite 10 sur 16, la rentabilité matérielle d'exploitation des ressources informatique s'améliore. Naturellement, la Fig.48 en page 19 du fichier

PLANS.pdf a été corrigée en conséquences, et également remplacée sur la machine.



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

8) Quelques détails relatifs à la conception de cette machine.

Chaque projet en gestation va générer une foule invraisemblable de possibilités parmi lesquelles il faut faire des choix, si possible pertinents. Durant la majorité de ma vie professionnelle, j'ai formé un grand nombre de concepteurs en génie mécanique. Pour ce qui est de la visserie, par exemple, il était hors de question d'employer des vis à têtes sphériques fendues. Ce sont les plus malcommodes. Dès que le tournevis saute, on en dégrade rapidement la forme. Hors, dans ce projet, les vis poêlier ont été privilégiées pour construire le statif : Une sacré contradiction avec ce que je préconisais haut et fort en présence de mes étudiants. Concevoir ne sera jamais encadré par des absolus irrémédiables, chaque décision sera le fruit d'une "pondération", une acceptation permanente de contrarier des principes dont il faut éviter d'être trop esclave mentalement

- Les capteurs d'*origine machine* utilisent une *technique optique bien plus fiable que les "classiques" micro-contacteurs* de fin de course. Rien n'interdit de remplacer cette technologie par l'ancienne, il suffira de reprendre la mécanique pour le support des micro-switch et de placer ces derniers entre GND et les entrées A6 et A7. La résistance interne de "pull-up" de l'ATmega328 sera validée, ou une résistance de 1kΩ sera ajoutée entre l'entrée concernée et le +5Vcc.
- La machine en configuration dégagée, (*Arrière gauche.*) est à 10mm de l'*origine machine* sur X'X et sur Y'Y. La raison réside dans l'hypothèse où certaines et certains lecteurs envisageraient de simplifier l'électronique et l'assemblage mécanique en utilisant deux micro-switch à la place des LASERS et cellules photorésistantes. C'est une solution parfaitement viable. Dans ce cas, lorsque la machine n'est pas utilisée, il est préférable de libérer ces micro-contacteurs pour ne pas que leurs ressorts soient sollicités en permanence. Par ailleurs, le logiciel d'exploitation actuel commence par vérifier le fonctionnement correct des capteurs d'*origine machine*, opération qui impose qu'ils soient tous les deux non masqués par les "couteaux de détection".
- Le choix des vis poêlier ϕ M4 est justifié par la grande surface disponible sous leurs têtes assurant une portée correcte. Quand au diamètre c'est un compromis entre dimensions et efficacité. Peu commodes à serrer ou libérer avec un tournevis, *elles seront systématiquement mises en œuvre par une clef à pipe qui élimine cet inconvénient.* (*Par ailleurs une fois en place on n'y touche plus.*)
- Contrairement à certains dessins initiaux, noter que les rondelles d'appui ne sont plus placées systématiquement sous les têtes des vis poêlier ϕ M4 du statif car estimées inutiles à l'usage.
- Pour constituer le statif de la machine, deux plaques sont assemblées et réunies au centre par un raidisseur de renforcement. Une seule plaque serait envisageable et rendrait la conception plus simple. Mais ce serait avec pour désavantage un coût d'achat des plaques nettement plus élevé.
- Compte tenu de l'échantillonnage disponible et de l'optimisation dans les découpes, ces deux plaques n'ont pas la même largeur. La plus large est placée à gauche, car paradoxalement elle autorise un placement du moteur PAS à PAS plus proche du guidage le plus chargé. Ainsi la traction par la courroie crantée est décalée vers le côté le plus "résistant" et ainsi engendre une meilleure répartition des efforts longitudinaux et ainsi diminuent le risque d'arc-boutement. (*Voir page 7.*)

➤ Hauteur du plateau.

L'enchaînement des contraintes qui définissent la hauteur du plateau et la longueur des entretoises qui le supportent est le suivant : Le moteur PAS à PAS immobilisé sur une équerre associée du commerce impose la hauteur de l'axe de rotation de la poulie crantée. Cette hauteur conditionne à son tour le dessus lisse de la courroie crantée qui est directement immobilisée sur la traverse du corps du chariot Y'Y. C'est le dessous de cette traverse qui à son tour définit la hauteur des douilles de guidage à billes et par conséquent la position des tiges de guidage par rapport à la base de la machine. *Comme les supports des tiges sont trop courts, il faut les rehausser ce qui impose l'interposition des cales "moulées" à la demande sur une imprimante 3D.*

➤ Hauteur du LASER par rapport au plateau.

Compte tenu de la plage de focalisation avec l'objectif du LASER, initialement la distance entre objectif et plateau avait été prévue à 115mm sachant que la convergence la plus courte semble se situer vers 80mm. Cette distance assurait une marge de sécurité notable et la possibilité de pyrograver sur des pièces épaisses. Sur la version finale, cette distance a été augmentée à 155mm ce qui augmente encore la marge possible, tout particulièrement pour le cas où le LASER approvisionné focaliserait au plus court à bien plus que les 80mm de celui assemblé sur le prototype.

Ben Môamôa je dis que fumer avec une clef à pipe c'est pas bon pour les poumons !

9) Quelques accessoires pas forcément inutiles.

P rincipe absolu des vendeurs de concessionnaires automobile, ce n'est pas la qualité du moteur, la solidité des structures, la fiabilité des ensembles vitaux de la berline qui accrochera le client, mais l'allume cigarette interconnecté, l'autoradio directement piloté par satellite géostationnaire et la boîte à gants thermostatée par pipette thermonucléaire en emballage moléculaire. (*Comme si on conduisait encore avec des gants blancs !*) Bref, ce sont les accessoires secondaires qu'il faut absolument proposer au futur acheteur en leur faisant croire que c'est indispensable. Dans ce chapitre, je vais tenter ma chance et vous "fourguer" quelques bricoles.

➤ Protéger la carte Arduino.

B ien que le coût d'une carte Arduino NANO soit relativement modique en comparaison de la technologie qui y réside, détruire le microcontrôleur parce qu'une clef nous a échappé et a créé un court-circuit exactement où il ne fallait pas est assez agassif. D'une part on doit attendre d'en approvisionner une autre, puis il faut réinscrire les textes en EEPROM de l'ATmega328, puis recharger **P20_Programme_exploitation.ino** dans le silicium. Aussi, consacrer un peu de temps à réaliser un protecteur sera largement rentabilisé. On voit bien sur la Fig.22 que l'électronique située sous le plateau **1** est relativement protégée. En revanche, sans le carter **4**, la carte Arduino située en **2** serait totalement dégagée, et donc vulnérable. Ce couvercle improvisé est réalisé en deux pièces assemblées sur le dessus par trois boulons ϕ M3. (*Deux éléments réunis qui sont taillés dans un boîtier en matériau thermoplastique de récupération.*) Sur la face arrière on trouve la lumière prévue pour le passage de la ligne USB **3** qui assure le dialogue série avec le Moniteur de l'**IDE**. On y observe également à la partie inférieure les deux petits boulons ϕ M3 qui assurent la liaison avec le profilé arrière qui constitue la semelle du statif. Pour comprendre en détails l'agencement de cet élément, précipitez-vous sur **Image1.JPG** à **Image3.JPG** qui sont dans le dossier < **Les protecteurs** > du répertoire < **Galerie d'images** >.

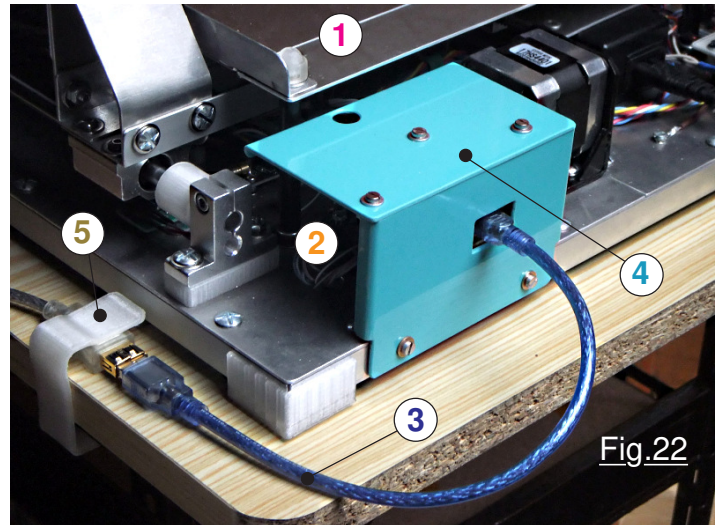


Fig.22

➤ Ça va chauffer !

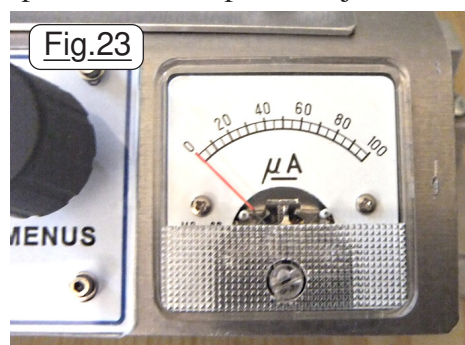
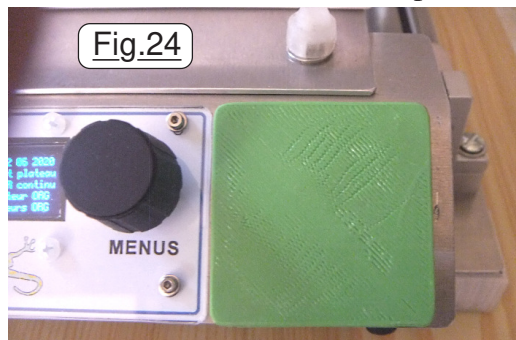
C omme dirait Totoche, Pyro est le préfixe de "ça va cramer" ! Si on pousse un tant soi peu le pourcentage du LASER, et surtout que l'on immobilise ce dernier un certain Délai en position, en quelques secondes une plaque de bois va littéralement prendre feu. Si on valide une énergie trop importante, même si la vitesse de gravure est maximale, avec certaines feuilles de papier ou de carton on réalise carrément du découpage comme on peut le vérifier sur **Image1.JPG** à **Image5.JPG** du dossier < **Pyrograver** >. Chaque fois que l'on va chercher à pyrograver sur des matériaux nouveaux, voir volontairement effectuer du découpage, la machine va générer des suies qui par nature sont conductrice de l'électricité. Aussi, dès l'opération terminée, ne pas attendre pour faire un ménage soigné. Si le faisceau traverse la cible, notamment si cette dernière est constituée de carton ou de papier, une trace de souillure va adhérer au plateau. Un chiffon imbibé d'alcool ménager fait merveille pour enlever toute trace de l'opération. Pour résumer, la pyrogravure par nature génère "des pollutions" qui ne demandent qu'à souiller la machine. Faire le ménage régulièrement ne sera vraiment pas un luxe. Par ailleurs, à titre préventif il sera judicieux de temps en temps, de déposer le plateau et "briquer" l'électronique et les glissières.



Ben Môa môa, j'ai acheté le LASER le plus puissant que j'ai trouvé, c'est un 500W. Il a pulvérisé en gaz le gros lingot d'or pur que m'avait légué Grand Mère en moins de trois minutes. N'en reste plus rien du lingot !

➤ Protéger le galvanomètre de 100µA.

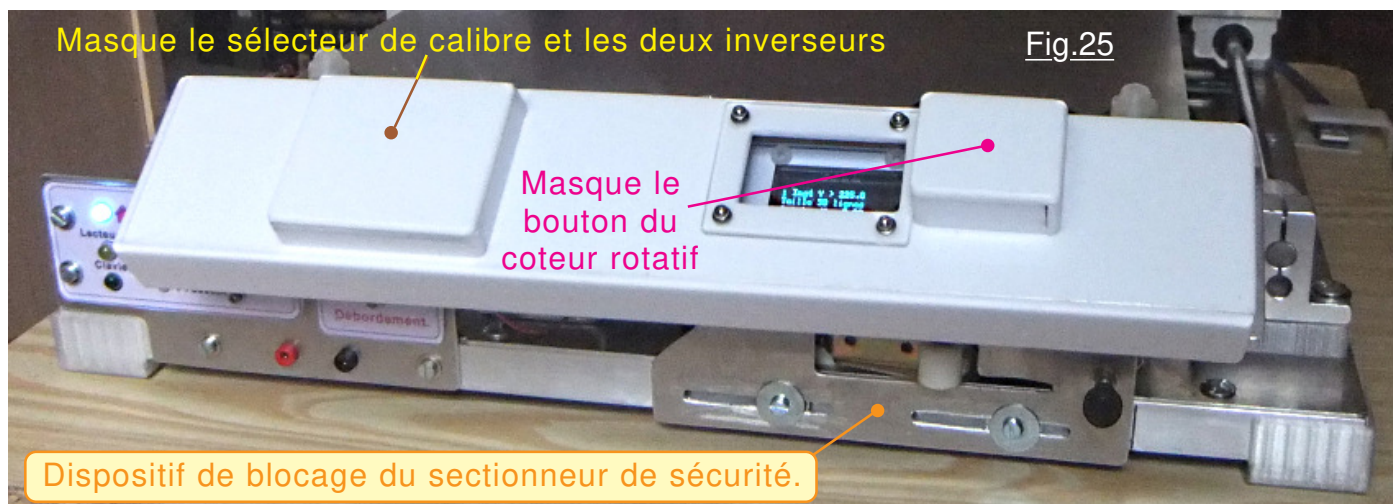
Aussi bien mécaniquement qu'électriquement, le galvanomètre de la Fig.23 constitue un dispositif vulnérable. Le tournevis qui échappe malencontreusement des mains tombera forcément "pointe" vers le bas sur le beau cadran transparent ... et paf, une fente pour toujours. De plus, quand on a vu [Image4.JPG](#) du dossier <Pyrograver> on se dit que tout comptes faits, un petit dispositif de protection serait le bienvenu. Alors, l'imprimante 3D va nous tricoter le petit capot de protection de la Fig.24 qui s'emboîte sur le galvanomètre pour le coiffer entièrement quand il n'est pas utilisé, c'est à dire la majorité du temps. Ne pas oublier quand il est



masqué de passer l'inverseur **Machine** sur la position Multimètre. La partie inférieure du périmètre est pourvue d'une sorte de languette qui permet de le clipser. Ainsi, il reste bien sagement en place. Consultez maintenant [Image4.JPG](#) du dossier <Les protecteurs> pour observer "le revers de la médaille". À l'intérieur, a été collée une étiquette plastifiée qui facilite l'interprétation des mesures d'intensité en présentant la valeur du courant en rapport direct avec l'échelle graduée du galvanomètre. Pour rester au fond quand on manipule ce capot, elle est collée au fond de ce petit couvercle. (Pour la circonstance un bâton de colle UHU fait merveille.)

➤ Pas vu, pas pris !

Toujours traumatisé par [Image4.JPG](#) du dossier <Pyrograver> on se demande ce que va devenir la belle plaque transparente qui recouvre l'étiquette du PUPITRE et qui a pris tant de temps pour son façonnage. Pas la peine de se poser la question, il est plus judicieux d'agir ! Sans avoir à retirer le protecteur du galvanomètre, on va se concocter un protecteur qui englobe l'ensemble du clavier quand la machine est en train de pulvériser une cible qui laisse s'échapper molte petites flammèches qui ne demande qu'à se déposer sur le PUPITE. Cet accessoire doit se manipuler très



facilement et laisser les informations fournies par OLED visibles. Mis en place sur la machine, la Fig.25 le présente dans toute sa splendeur. Sa forme et ses dimensions enferment entièrement le pupitre apportant une défense globale. Technique abondamment décrite sur mes publications disponible sur ce site, <https://www.robot-maker.com/ouvrages/> je ne vais pas reprendre ici les méthodes utilisées. Tous les didacticiels que vous trouvez dans l'onglet **Expérimentons avec Arduino** en parlent en détail. Le **Dispositif de blocage du sectionneur de sécurité** est décrit en

détails en page 24. Ce long capot muni de la petite fenêtre pour observer l'écran OLED se pose tout simplement sur le PUPITRE et se centre facilement sur les deux gros boutons coniques. Quand on le retourne comme sur la Fig.26 on observe bien les deux trous de centrage

C'est l'heure, on ferme !

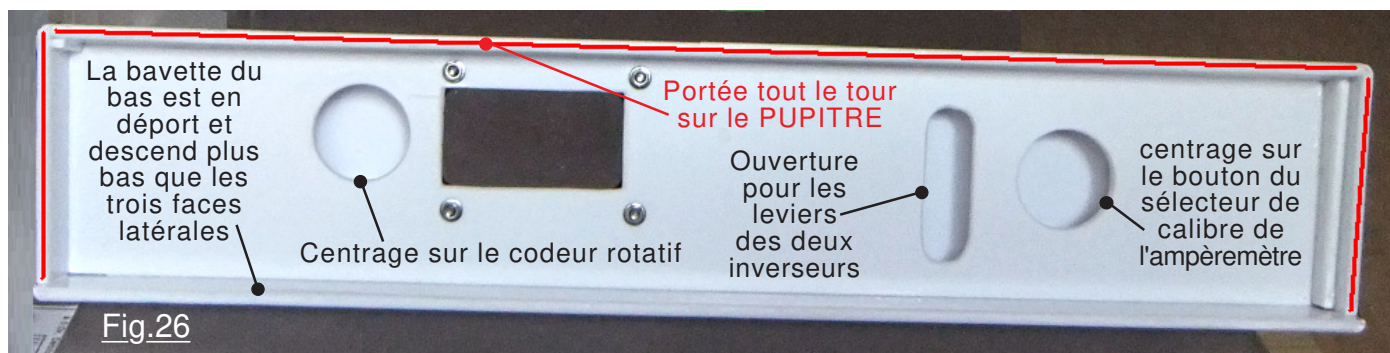


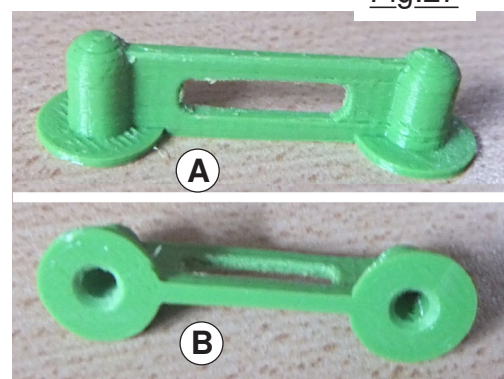
Fig.26

sur le corps des boutons rotatifs. Les orifices circulaires ne font que positionner l'ensemble qui repose sur toute la périphérie. La zone de contact est surchargée en rouge sur la photographie donnée ci-dessus. [Image5.JPG](#) et [Image5.JPG](#) du dossier < Les protecteurs > complètent avantageusement ces explications par leurs commentaires.

➤ Cacher deux LEDs trop présentes.

Bien commode, le petit module de régulation 5Vcc est pourvu d'un bouton poussoir qui éteint ou rallume les deux LEDs d'état et l'afficheur à sept segments qui indique la valeur de la tension. Aussi en utilisation normale de la machine on peut l'éteindre et ainsi l'oublier. En revanche, les deux LEDs bleues du circuit imprimé des shunts de mesures du courant débité par l'énergie de puissance s'avèrent pénalisantes, car leur lumière se reflète sur les montants verticaux du charriot **Y'Y**. Ces LEDs sont parfaitement visibles sur [Image26.JPG](#) du dossier < Les circuits électroniques >. Lorsque l'on effectue des manipulations avec une puissance réduite sur le LASER, elles ont un effet trompeur qui fait penser à un flux parasite du transducteur lumineux. Aussi, en usage normal on peut les "coiffer" avec un cache montré sur la Fig.27 moulé sur une imprimante 3D et dont le modèle **gco** est fourni avec ce didacticiel. En **A** la macrophotographie présente une vue plongeante alors qu'en **B** est montrée une vue de dessous de ce tout petit complément. Noter que le moulage 3D est très fin, car même la petite lumière sur la traverse est directement obtenue sur l'imprimante. Les deux trous sont légèrement alésés à 3,5mm de diamètre.

Fig.27



Beaucoup trop d'informations lumineuses !

Lorsque l'on procède aux premiers vols expérimentaux d'un avion, par exemple, les sièges et les passagers sont remplacés par une myriade d'instruments de mesures et d'enregistreurs. Lorsque l'appareil est au point, toutes ces informations deviennent inutiles, et on remplace cette machinerie d'enregistrement par l'aménagement de la cabine. C'est un peu pareil pour notre machine. Lors de la réalisation et de la validation, l'intégralité des informations disponibles s'avère précieuse, et en particulier les multiples LED disséminées un peu partout sur le châssis.

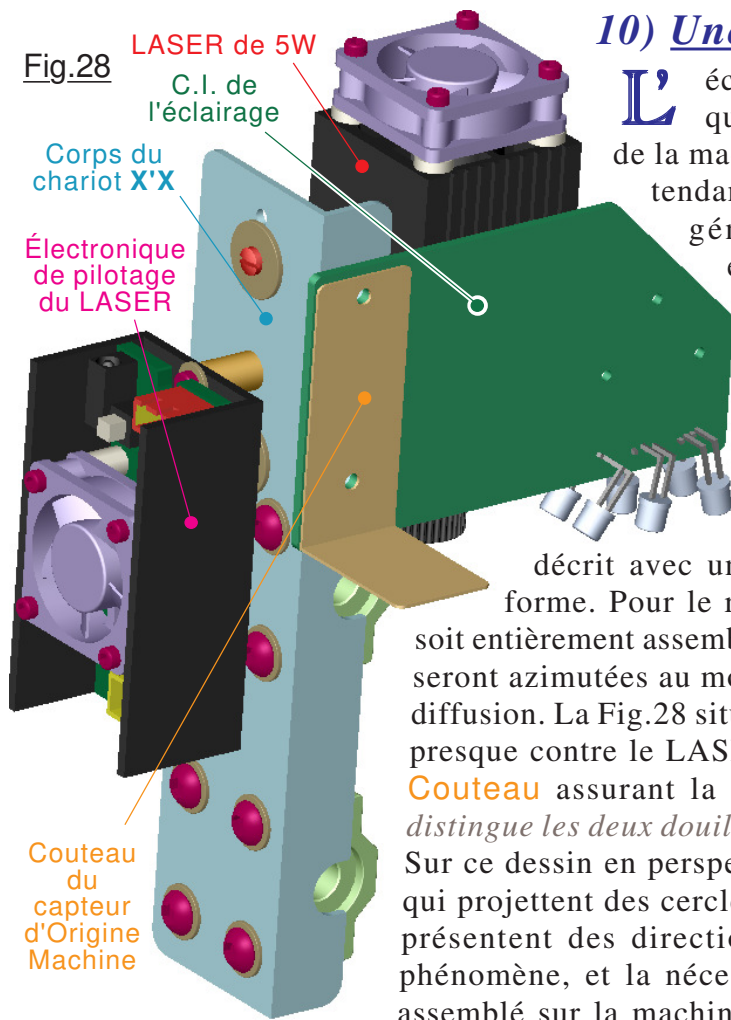
➤ LEDs trop lumineuses.

Constituées par des MASERs, (Voir l'encadré en page 8.) ces composants nommés LEDs qui équipent une bonne globalité des petits modules électroniques du commerce présentent des rendements excellents. Du coup la lumière émise est trop intense. Aussi, je recouvre systématiquement ces petits voyants lumineux d'une petite couche d'encre de chine bien noire. La lumière n'est alors plus visible que sur les cotés, ce qui à l'usage est largement suffisant.

➤ Témoin lumineux utile ... sans plus.

Autre cas particulier : Celui de la LED triple qui visualise les impulsions envoyées pour faire effectuer un pas au moteur. Pour l'utilisateur "lambda", ce clignotement ne sera pas souvent bien utile, et surtout pourrait attirer inopinément le regard. C'est la raison pour laquelle on a vu chapitre précédent, qu'il est "caché" sous le PUPITRE. Sans vraiment se baisser on l'oublie complètement, à tel point que durant la mise au point de la machine, pour éviter un torticolis j'avais placé un petit miroir de courtoisie pour le voir sans me pencher.

Fig.28



10) Une idée lumineuse qui fait tâche !

L'éclairage soigné du plateau est l'un des éléments qui participe nettement à la qualité opérationnelle de la machine. Si les nouvelles LEDs de couleur ont une tendance à se montrer trop envahissantes, quand elles génèrent une lumière blanche pour créer un éclairage, leur rendement avantageux confine à une révolution. Avec une énergie vraiment dérisoire, (*Moins de 0,2W!*) il est possible d'aboutir à une illumination tout à fait satisfaisante, mais il faut bricoler un chtipeu. En ouvrant le [MANUEL.pdf](#) à la page 6 on découvre le schéma électronique retenu et sa justification. C'est en page 9 que la Fig.10

décrit avec un fort agrandissement le circuit imprimé et sa forme. Pour le réaliser, il faut impérativement que la machine soit entièrement assemblée mécaniquement, car les six LEDs d'éclairage seront azimuthées au moment du soudage pour répartir leur faisceau de diffusion. La Fig.28 situe le circuit imprimé de l'éclairage, qui se trouve presque contre le LASER et bridée sur le corps du chariot **X'X** par le **Couteau** assurant la détection de l'*Origine Machine*. (*En vert on distingue les deux douilles à billes de guidage en translation rectiligne.*) Sur ce dessin en perspective, on devine que la direction des six LEDs qui projettent des cercles lumineux diffus sur le plateau de la machine présentent des directions un peu divergentes. Pour comprendre le phénomène, et la nécessité de souder les LEDs quand le circuit est assemblé sur la machine, observons [Image3.JPG](#) à [Image6.JPG](#) du

dossier **<Assemblage mécanique>**. Azimuter les LEDs va consister à les souder sur le circuit imprimé de façon à ce que leur axe d'éclairage soit dirigé vers le centre du cercle de repérage la concernant. La technique consiste à plier les queues des composants de façon à ce que globalement elles soient dirigées "latéralement" et répartissent grossièrement les faisceaux lumineux vers l'avant et vers l'arrière de la machine. On ne soude qu'une seule broche pour faciliter ensuite leur soudage définitif. Le circuit imprimé est alors assemblé sur le chariot **X'X**. Conformément à [Image6.JPG](#) on a immobilisé la feuille de repérage sur le plateau et "centré le LASER". L'obscurité est alors faite dans le local. Puis, luciole par luciole on alimente cette dernière, on dirige son faisceau dans son cercle cible, puis on soude sa deuxième broche.

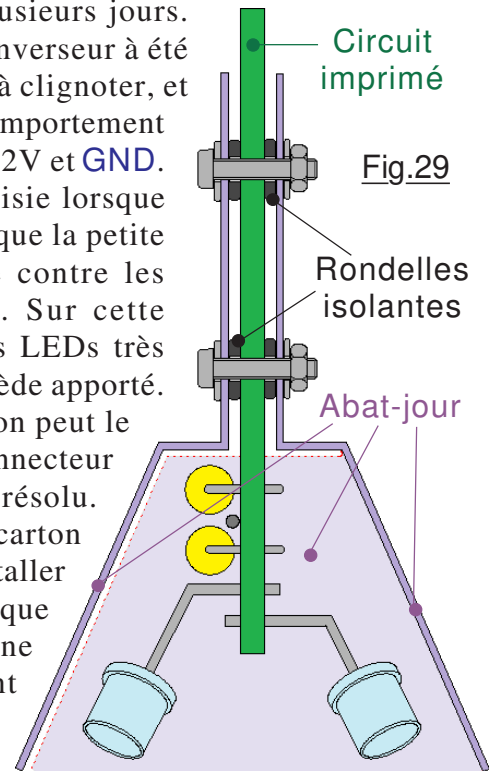
- **Objection Maître !**
- **Quel est la source de cette interpellation cher Dudule ?**
- **Ben ya neuf cibles sur le plateau, et nya que six luminiurestruc.**
- **Hé bé Dudule, tu es bien clairvoyant ce jour !**

Concrètement, on va orienter les directions de façon à pointer les six repères latéraux externes. Comme la diffusion des photons ce fait sur un diamètre important, car ces LEDs présentent un angle d'ouverture important, les tâches lumineuses débordent largement vers le centre. Comme l'intensité lumineuse diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'axe optique de la LED, au final le milieu de la feuille témoin sera éclairé de manière homogène. On trichera un peu s'il le faut tout à la fin, car autant modifier l'orientation d'avant en arrière quand les deux broches sont soudées est infaisable, autant plier légèrement plus ou moins latéralement est strictement sans difficulté. Quand on aura terminé de souder les six éléments, comme sur [Image4.JPG](#) on vérifiera que l'étalement lumineux est "parfait". En revanche, et [Image3.JPG](#) le confirme, la lumière parasite diffusée sur les cotés des LEDs est très important et engendre une gêne par éblouissement intolérable. Hors, il suffit de deux petits morceau de carton placés de part et d'autre du circuit imprimé pour résoudre provisoirement le problème. Sur [Image5.JPG](#) sont immobilisés deux échantillons pliés pour déterminer l'angle optimal que devront présenter les flancs de l'abat-jour.

Ben Môamôa je prétend qu'elle est complètement azimuthée cette pyrotrucmachine !

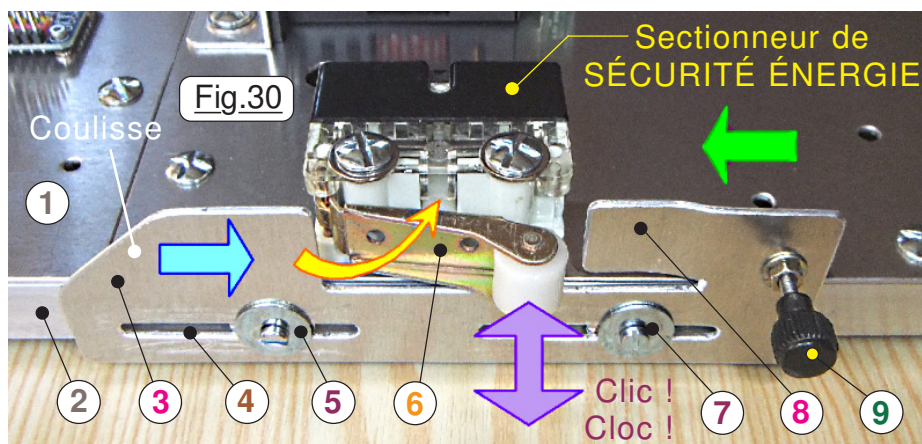
➤ Un patron qui ne donne pas d'ordres !

Initialement, l'ensemble de l'électronique était isolée électriquement des structures métalliques de la machine. Puis, pour des raisons explicitées dans le chapitre ➤ **Arduino à la masse** du document [Réaliser la pyrograveuses.pdf](#) la référence **GND** a été reliée au statif. Quand cette modification a été effectuée, l'éclairage était terminé depuis plusieurs jours. Puis, lors d'une manipulation dans un environnement sombre, l'inverseur a été basculé pour éclairer le plateau. **GLUPS !** La machine s'est mise à clignoter, et Arduino à partir en RESETs répétitifs. La raison de ce brusque comportement bitrange autant qu'ézare résultait d'un court circuit entre le plus 12V et **GND**. L'origine est parfaitement visible sur [Image7.JPG](#) qui a été saisie lorsque l'éclairage venait d'être installé. Cet incident "anodin" a prouvé que la petite alimentation secteur à découpage est parfaitement protégée contre les surcharges, conformément à l'annonce de son fournisseur. Sur cette photographie on constate que vers l'avant aussi on masque les LEDs très lumineuses. Sur [Image8.JPG](#) les commentaires précisent le remède apporté. En allongeant les deux trous de fixation sur le circuit imprimé, on peut le décaler vers l'avant de 1,5mm environ. Du coup la soudure du connecteur HE14 ne touche plus le radiateur du LASER et le problème est résolu. Toutefois, à titre de précaution supplémentaire, actuellement un carton épais isole entièrement le circuit imprimé du LASER. Il reste à installer l'abat-jour dont les deux éléments sont découpés dans une plaque métallique très fine en aluminium ... de récupération. Ceci dit, une cannette de jus de fruit découpée fera également parfaitement l'affaire. Le plus "délicat" consiste à déterminer le profil des deux éléments lorsqu'ils sont développés à plat, et avant cette opération, définir l'inclinaison optimale des deux faces latérales. Trop "laborieux" à conduire sur ordinateur, un tantinet de cartonnage, montré sur [Image9.JPG](#) et sur [Image10.JPG](#) est suffisant pour créer les deux profils. Pour ne pas que ces deux plaquettes métalliques ne puissent créer des problèmes électriques, comme précisé sur la Fig.29 elles sont écartées du circuit imprimé par des rondelles isolantes. C'est suffisant pour éliminer tout contact électrique inopiné.



11) Le dispositif de blocage du sectionneur de sécurité.

Innombrables sont les incidents qui se produisent lors du développement ou lors de la validation des systèmes mécaniques et électroniques de la petite machine. Si l'on engage un processus potentiellement risqué pour le matériel, et que l'énergie de puissance 12V est impliquée, on laisse un doigt paré pour intervenir rapidement sur le bouton du **sectionneur de SÉCURITÉ ÉNERGIE**. Brusquement une alerte nous interpelle : Clic on pousse sur le palpeur et immédiatement le 12V est coupé sur l'ensemble de la machine, sauf sur l'éclairage et sur le régulateur 5V qui alimente Arduino. Comme il s'agit d'un "fin de course", si l'on libère l'effort il revient au repos et réenclenche l'énergie. Il serait peu commode d'avoir à maintenir la position durant tout le temps qui sera nécessaire à l'analyse du contexte. Bien que ce ne soit absolument pas impératif, un petit dispositif qui verrouille la sécurité sera vraiment commode. Par ailleurs, il y a Dudule qui reste "scotché" devant la machine



en train de graver depuis déjà presque une heure. Avec des yeux tout ronds cachés derrière les lunettes de protection, il a remarqué la présence de ce gros bouton sur le statif. Dès que l'on va tourner la tête ... Paf, il va cliquer dessus pour voir ce que ça fait, comme sur sa console de jeux. Aussi, autant **prévoir également "une interdiction mécanique de disjonction"**.

Ajouté sur le profilé avant **2** du statif **1**, le petit mécanisme de la Fig.30 réalise cette double fonction. Il est constitué d'une came double **3** guidée en translation rectiligne sur **2** au moyen de deux lumières oblongues **4**. Cette pièce mobile est plaquée sans jeu contre **2** par un ressort qui sous la semelle tire sur la vis **5** et reste en position par adhérence. La vis **7** ne fait que guider. Sur cette photographie la came **3** est en position centrale, et l'on peut agir librement sur la palette du **sectionneur de SÉCURITÉ ÉNERGIE**. Quand pour une quelconque raison on a cliqué sur le galet de la palette **6**, la petite tige solidaire de **3** et munie du bouton de manœuvre **9** peut être déplacée vers la droite dans le sens de la flèche bleue. La came **3** passe alors devant la palette **6** et la maintient en position travail. (Symbolisé par la flèche courbe orange et jaune.) On peut alors relâcher le palpeur et passer à l'analyse du contexte. Au contraire, quand le dispositif est au repos, coulisse en position centrale, si l'on déplace la came **8** vers la gauche, flèche verte, cette dernière passe derrière le galet. La palette est alors verrouillée en position de repos et l'on ne peut plus disjoncter. En fonctionnement standard, la coulisse sera placée en position neutre, le dispositif restera discrètement disponible si le besoin s'en fait sentir. [Image12.JPG](#) et [Image12.JPG](#) dévoilent les secrets de cette petite mécanique réalisée elle aussi avec des éléments de récupération. Il faudra donc adapter votre version personnelle ...

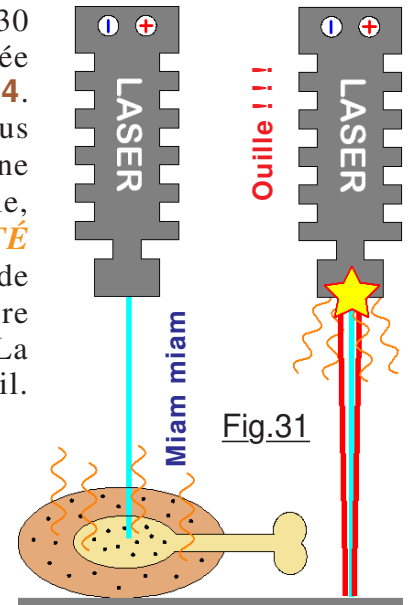


Fig.31

12) Le déflecteur d'absorption.

Autant en utilisation courante sur des matériaux "tendres" il ne sera pas fréquent d'avoir à pousser la puissance du LASER au maximum, autant pour les essais et validation du matériel il sera bien utile de transformer l'énergie du faisceau lumineux en chaleur sans pour autant brûler toutes les poutres de la maison. (*Allusion à Bernard Palissy.*) Par exemple pour tracer le graphe de consommation du LASER sur le 12V en fonction du pourcentage de commande. La fiche nommée **Protocole de validation du matériel**. 7/8 montre qu'il sera sage de réaliser un dispositif qui ressemble à celui de sa Fig.1 pour pouvoir pousser le LASER au maximum de sa puissance en toute sécurité pour le matériel et pour les personnes éventuellement présentes dans le local ... qui dans ce cas ont toutes des lunettes de protection ... ça va sans dire !

Ne jamais faire fonctionner le LASER avec une puissance notable sans que sur le plateau ne soit disposée une cible qui absorbera l'énergie. (Fig.31) Cette manipulation est potentiellement dangereuse pour le LASER, car une fraction non négligeable du faisceau est renvoyée sur ce dernier et s'y transforme en chaleur. Aussi, un dispositif très simple permet de consommer toute l'énergie lumineuse sans risque pour le matériel et pour les personnes présentes dans le local.

L'idée de base est simple : Comme montré sur la Fig.32 on **D**évie le faisceau avec un miroir sur une surface **A**bsorbante et correctement "ventilée". (*Non, il ne sera pas nécessaire de prévoir une circulation forcée par ventilateur ou un refroidissement par cellule à effet Peltier.*)

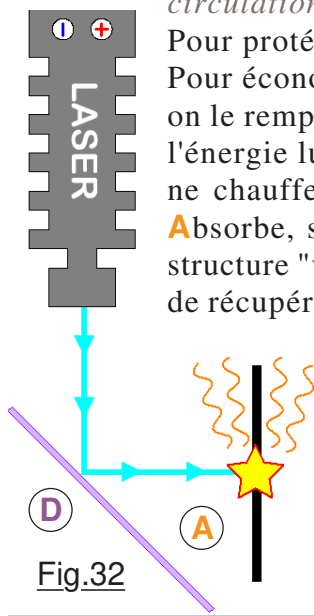


Fig.32

Pour protéger l'environnement, le miroir est enfermé dans un cube.

Pour économiser le miroir de **D**éflexion, qui sur le long terme finirait par se détériorer, on le remplace par un radiateur en aluminium anodisé en noir qui **A**bsorbe presque toute l'énergie lumineuse et la transforme en chaleur. Du coup, la paroi du cube de protection ne chauffe plus. Le **D**éflecteur va chauffer en fonction de l'énergie lumineuse qu'il **A**bsorbe, soit environ 5,5W à pleine puissance du LASER. Il faut le placer dans une structure "ventilée". Sur le dispositif adopté, le prototype utilise un radiateur électronique de récupération. Les modèles pour l'imprimante 3D sont fournis, ainsi que la petite cible

qui facilite le centrage sur la machine. Sur la photographie [Image7.JPG](#) du dossier < **Les protecteurs** > le dissipateur n'est pas encore immobilisé sur le cube par des boulons ϕ M2 comme on peut le voir sur la fiche dédiée citée ci-avant. Sur [Image8.JPG](#) on peut constater l'efficacité de ce dispositif. Dans la pratique, même si on expose le déflecteur pendant une longue période, LASER à 100%, sa montée en température reste faible. La mise en œuvre est détaillée dans le document PDF d'utilisation et d'expérimentation de la pyrograveuse qui accompagne ce didacticiel.

13) 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. Notre petite machine à pyrograver expérimentale n'échappe pas à ce principe non démontré mais qui frise l'absolu. Il a fallu composer avec les réalités matérielles, (*Et financières également !*) et l'on peut noter un certain nombre de "regrets" :

- Si c'était à refaire, probablement que pour les profilés de 15 x 15 qui forment le périmètre des raidisseurs du statif, j'utiliserais des modèles de 20 x 20 qui procurerait une plus grande rigidité de l'ensemble, encore que le prototype à ce point de vue n'est pas à plaindre.
- Déposer le plateau de la machine n'est pas bien compliqué et n'exige qu'une dizaine de minutes. Il suffit d'enlever les quatre écrous des colonnes, d'enlever le boulon central du pupitre, d'extraire le plateau et de replacer provisoirement le pupitre sur les deux colonnes situées avant. Toutefois, enlever et replacer le boulon central de liaison entre le pupitre et le plateau n'est pas très convivial. Il serait beaucoup plus simple si l'on pouvait par le dessous passer une clef à pipe pour serrer l'écrou. Je vous conseille fortement, lors de la réalisation du statif de prévoir un tel orifice sur la semelle, l'opération deviendra vraiment élémentaire.
- Enfin, sachez que malgré mes faiblesses notoires en orthographe et en syntaxe, je suis un fervent amoureux de notre langue et gavé d'entendre en permanence des "playlist, live, et autres cash" alors que nous avons chez nous des équivalents tellement plus évocateurs. Rien ne m'agace plus dans les médias que cette maladie du "franglais" qui pollue en permanence les émissions de radio ou de télévision. C'est l'école de la médiocrité par excellence, ce n'est pas ainsi que nos jeunes apprendront à s'exprimer avec richesse. Et bien je finis par être intoxiqué par ce fléau. Vous n'avez pas remarqué ? Mais si, regardez-bien ... j'ai ici et là utilisé des "barbarismes" comme "switch", "strap" et autres atrocités ... mea culpa !

Peu importe, ces petites tracasseries sont en fin de compte dérisoires, c'est du reste l'un des rares projets de mon fait sur lequel il y a si peu d'ombre. Ne boudons pas notre plaisir. La petite machine est bien vivante et la voir s'affairer avec précision reste vraiment étonnant. Quand je la présente à des amis, ils sont chaque fois un peu dubitatifs. Pourtant, avec ce que montrent nos écrans en imagerie "Guerre des étoiles" nous pourrions être blasés. Et bien force est de constater que face à un petit robot bien réel aussi rudimentaire que la pyrograveuse, les invités sont toujours séduits et ravis ... surtout s'ils repartent avec un bout de bois sur lequel est gravé leur portrait. 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 engagex vos heures de liberté dans une telle réalisation et que vous rencontriex une difficulté, les amis du forum pourront probablement vous aider. Dans le pire des cas, vous pouvez me contacter sur : michel.droui@laposte.net et dans les limites de mon temps de libre, c'est avec grand plaisir que je tenterai de vous dépanner. Je vous souhaite à toutes et à tous agréable lecture et ... ne mettez surtout pas le feu à votre maison !

Chaleureusement : Nulentout.



Totoche, amène le LASER on va faire griller les côtelettes !

LOUPÉ !

Ben Mâmôa je ne trouve que des pages paires et en triple dans mon manuel. C'est normal ça ?