

Machine de TURING

Préambule : PRÉSENTATION GLOBALE et CONCEPTION MÉCANIQUE

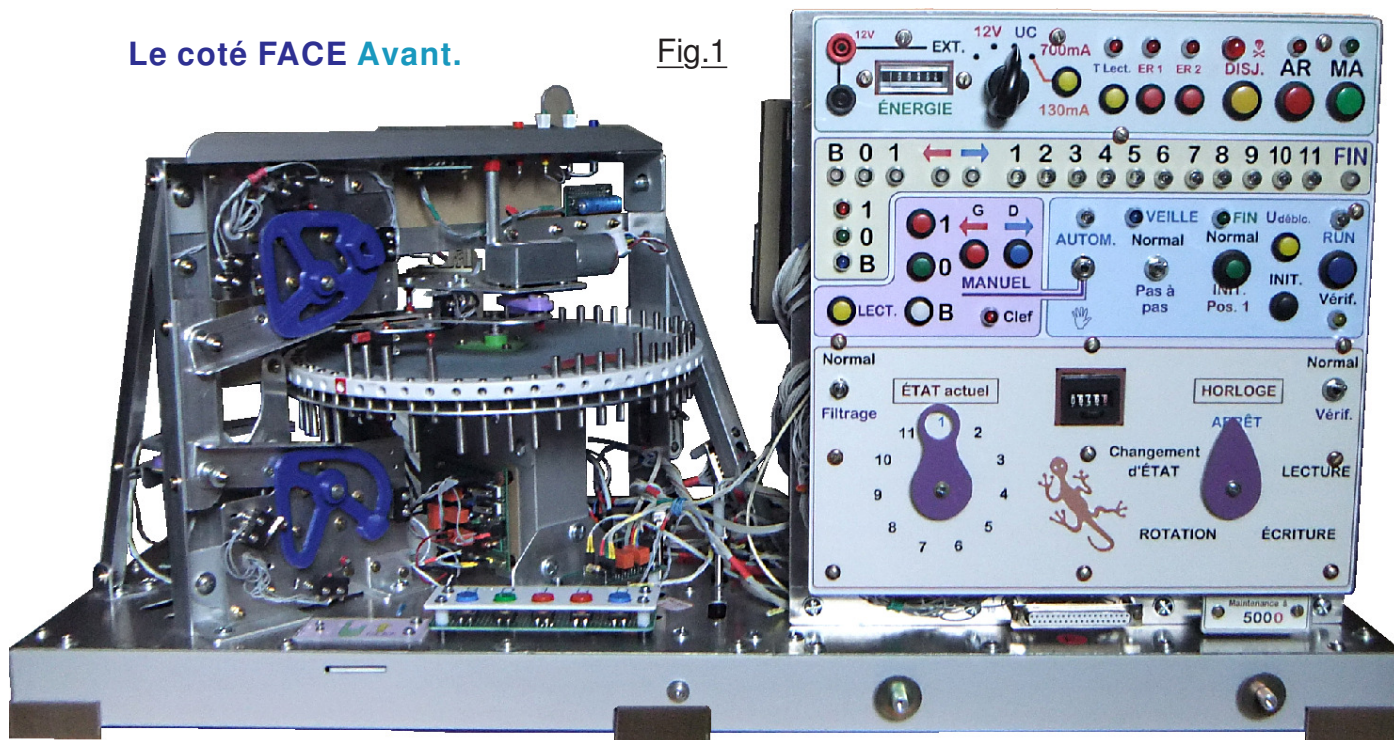
Par Nulentout : Vendredi 4 Août 2022.

Avant de foncer tête baissée dans les procédures de réalisation des nombreux éléments de cette petite machine "d'une autre époque", une présentation globale s'impose. Mais avant d'aborder le vif du sujet, je me dois de rendre à "César ce qui appartient à César". Passionné par de nombreux domaines en tous genres, j'envisageais de me réaliser une ÉNIGMA, la machine de codage secret utilisée durant le conflit de 1939 - 1945 par les Allemands. Effectuant des recherches sur l'Internet, je suis "tombé" sur le lien : <https://www.youtube.com/watch?v=L5O04P2ASRc>
Coup de foudre ! À tel point que j'ai totalement oublié mon projet de réalisation d'une ÉNIGMA, et que sans aucune réflexion j'ai commencé à commander des composants en ligne.
En sois, concrétiser une Machine de Turing n'est pas vraiment original. Il suffit d'aller "trainer" sur les sites qui publient les travaux des étudiants en faculté de Mathématiques ou d'Informatique pour constater que ce thème est fréquent pour leurs études de soutenance de thèses.

Assurément, la grande originalité de la version élaborée par Monsieur Marc RAYNAUD réside dans l'utilisation d'un plateau tournant pour concrétiser la mémoire vive de la machine à la place des classiques dispositifs linéaires animés par un mouvement de translation rectiligne.
C'est en voyant le film de Madame Florence RIOU que j'ai basculé "du côté obscur de la force" et ma machine consomme largement 90% de l'ADN de celle de Marc RAYNAUD dont j'exprime ici mon admiration pour l'intelligence de conception des ses deux prototypes. Aussi, en comparant l'apparence de ma réalisation, il saute aux yeux que ces trois "ordinateurs" sont de la même fratrie.

Le coté FACE Avant.

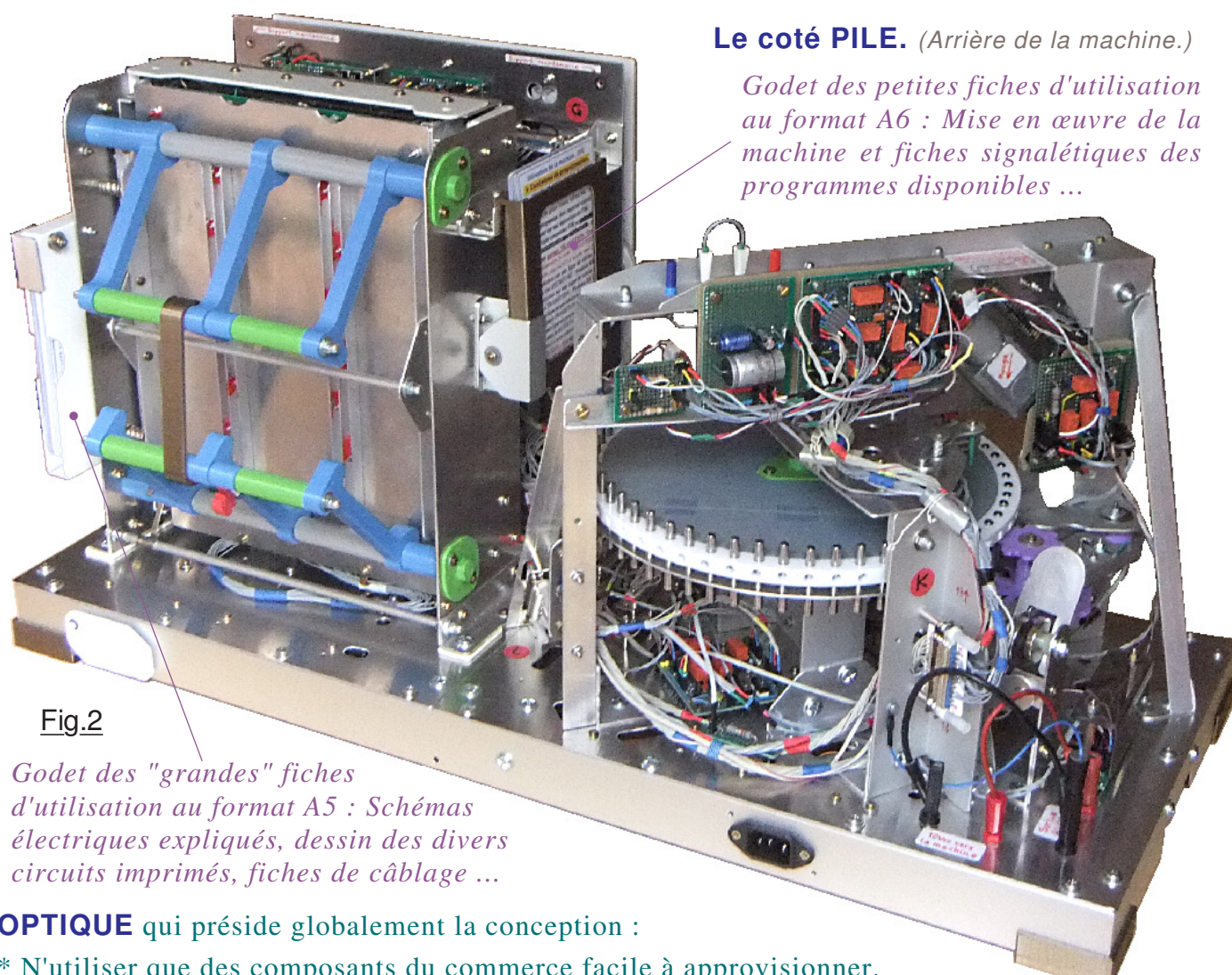
Fig.1



S'il est un domaine particulièrement bien documenté sur Internet, c'est bien celui de la Machine de Turing. *Aussi, il ne me semble vraiment pas pertinent d'en décrire ici le concept et les détails théoriques.* Proposez "Machine de Turing" à un quelconque moteur de recherche, et vous serez saturé d'informations toutes aussi riches les unes que les autres. Ce tutoriel déjà bien trop copieux vous épargnera une narration de plus sur la vie d'Alan Turing et sur l'apport considérable qu'il a apporté à l'humanité durant sa trop courte et "injuste" vie.

Ayant plongé sans effectuer une étude préalable de faisabilité, *j'ai développé ma propre machine avec pour objectif de n'utiliser que des composants faciles à se procurer sur la toile ou dans le commerce local. Je n'ai par ailleurs fait appel qu'à un outillage de bricoleur à l'exclusion de toute machine à commande numérique, (Mis à part les imprimantes 3D et je fournis les fichiers idoines.) pour que n'importe quelle lectrice ou lecteur un tant soit peu bricoleur puisse envisager de réaliser une telle machine.* Dans cette optique, outre une description "intégrale" je me suis limité à des solutions "précises" mais tout à fait à la portée d'un "bricoleur du Dimanche". En particulier, mis à part la contre-MATRICE, j'ai exclus les mouvements de translation délicats à réaliser sans jeux fonctionnels au profit des rotations car créer un pivot "parfait" reste tout à fait abordable.

Avec l'intention "de vous prendre par la main" pour rendre pratiquement certaine la réussite dans votre entreprise, ce didacticiel balaye la totalité des facettes d'un tel projet. Ainsi tout est décrit et expliqué. Naturellement vous pouvez vous contenter de survoler les chapitres qui "ne vous concernent pas". Par exemple il n'est pas obligatoire d'avoir compris en détails le fonctionnement des schémas électriques, vous pouvez parfaitement vous limiter à la réalisation des circuits imprimés et aux raccordements de ces derniers précisés dans les fiches de réalisation. Il est probable que les innombrables dessins illustrant les textes et les photographies commentées jointes au tutoriel seront souvent suffisantes pour passer à l'action. Dans ce cas vous ne lirez que le texte des chapitres pour lesquels vous aurez besoin d'informations précises. Notez qu'en dernière page de ce document je vous livre une adresse pour pouvoir me contacter si d'aventure vous vous engagez dans cette voie absolument passionnante et qu'en cours de route vous butez sur un obstacle. Dans la mesure de ma disponibilité c'est avec plaisir que je tenterais de vous dépanner.



Le coté PILE. (Arrière de la machine.)

Godet des petites fiches d'utilisation au format A6 : Mise en œuvre de la machine et fiches signalétiques des programmes disponibles ...

Fig.2

Godet des "grandes" fiches d'utilisation au format A5 : Schémas électriques expliqués, dessin des divers circuits imprimés, fiches de câblage ...

OPTIQUE qui préside globalement la conception :

- * N'utiliser que des composants du commerce facile à approvisionner.
- * Sauf exception pour le lecteur de feuilles perforées, mécaniquement les mouvements seront des rotations, des liaisons pivot de qualité étant bien plus faciles à réaliser pour un "bricoleur".
- * Prévoir une version minimale et une version de luxe.

01) Architecture globale du prototype.

Fonctionnellement, l'apparence de complexité de cette machine se résume à seulement trois unités fondamentales que l'on retrouve dans tout ordinateur ou microcontrôleur quel que soit sa puissance et ses performances. Une "**Unité Centrale**" qui gère et coordonne le fonctionnement de tous les "périphériques". Une **Mémoire de programme** qui est chargée de conserver le comportement de l'ensemble par l'entremise d'un **LOGICIEL**. Enfin, pour pouvoir manipuler à convenance les variables traitées par le programme, une **Mémoire Vive** dont le contenu peut être modifié "librement et à l'infini". Enfin, un "terminal" de pilotage indispensable pour assurer "**L'interface Homme/Machine**" faisant partie intégrante "des Périphériques".

Reprenant la photographie de la Fig.2 qui a été surchargée par des tracés de contour colorés, la composition de la Fig.3 met en évidence les diverses unités fonctionnelles de notre machine informatique électromécanique. Paradoxalement, l'**Unité Centrale** est répartie dans l'ensemble du volume de notre exemplaire sous forme de circuits imprimés répartis au mieux sur la structure. (Voir l'encadré proposé ci-dessous pour l'origine du vocable **U.C.**) Sur cette image en marron est distingué le **Statif rigide** sur lequel sont immobilisées les divers modules fondamentaux :

- En violet **la structure** qui assure à l'ensemble la rigidité mécanique,
- En marron **le Statif** qui assemble les divers modules fonctionnels,
- En bleu **le lecteur de feuilles perforées** qui matérialisent **le LOGICIEL**,
- En rouge **le carrousel** qui concrétise les **56 BITS de la Mémoire vive** de la machine,
- En vert **le tableau** de maîtrise pour l'**interface Homme/Machine**.

La finalité de ce document vise à décrire en détails ces différents éléments, et surtout de vous préciser les méthodes utilisées pour les réaliser. Il ne se préoccupe que de l'agencement matériel et de la façon dont j'ai procédé pour créer les pièces et les assemblages les plus "critiques". Le descriptif de la partie électromécanique, des schémas et des dessins des circuits imprimés est relégué dans le document **Présentation électrique.PDF** scindé en deux volumes.

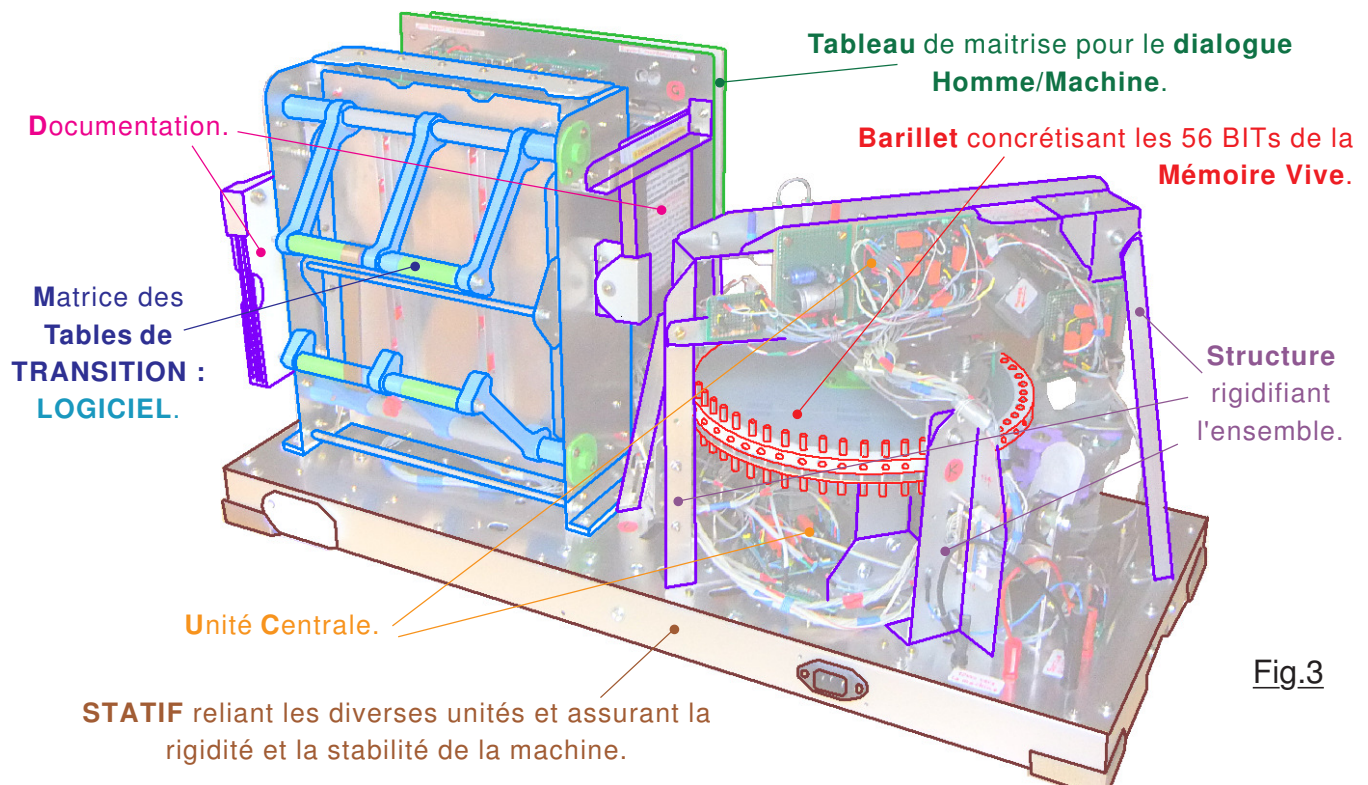


Fig.3

Le tout premier ordinateur digne de ce nom était l'ENIAC (Acronyme d'*Electronic Numerical Integrator And Computer.*) mis en service en 1945. Entièrement électronique et composé de tubes à vide, ce monstre occupait un bâtiment de plusieurs étages. Pour minimiser les longueurs de fils englobés dans ce mastodonte, **la logique de la machine** était globalisée dans l'étage central de l'immeuble, d'où son nom d'**Unité Centrale**.

02) Performance de cette petite machine expérimentale.

Avec si peu de matériel d'une autre époque, nous sommes en droit de nous demander ce que l'on peut faire avec une "chose" aussi élémentaire. Et bien sous un aspect hautement ringard frisant l'ère des dinosaures, notre machine bat discrètement plusieurs records mondiaux :

- C'est l'ordinateur le moins puissant du monde.
- C'est l'ordinateur le plus lent du monde.
- Ramené à l'Octet, c'est la mémoire de programme la plus couteuse du monde puisque si l'on compare au prix de celle d'un microcontrôleur ARDUINO possédant 32kO de SDRAM le prix d'un palpeur de la MATRICE est 400000 fois plus élevé que pour un BIT de l'ATmega328, et encore dans cette évaluation n'est pas tenu compte la présence de l'EEPROM sur ARDUINO et le coût des moteurs qui animent l'unité centrale de notre machine !

Avec un tel rapport, heureusement que notre ordinateur n'intègre que 561 BITS !

Outre ces caractéristiques qui devrait lui valoir une place de choix dans le livre des records, voyons ce que l'on peut espérer d'une technologie aussi "poussièreuse" :

➤ **Un chtipeu de mathématiques.**

Analysant la combinatoire "explosive" du potentiel de cette Machine de Turing par des évaluations mathématiques très élémentaires, nous allons constater qu'au final cette mécanique rudimentaire est très loin de se montrer dérisoire. Calculons l'ampleur de ses possibilités :

Pour chaque ligne de programme nous avons :

- Quatre possibilités pour l'écriture : B, 0, 1 ou Rien de coché avec exclusion réciproques.
- Pour les déplacements 3 possibilités : G, D ou Rien avec exclusion réciproque.
- Pour les transitions : 12 possibilités plus "le Rien" avec encore exclusions réciproques.

Donc, pour chaque ligne de programme nous avons :

13 x 3 x 4 possibilités moins une car il est exclus que trois "Riens" soient programmés.

Soit 156 combinaisons valides possibles par ligne.

Avec 2 lignes la combinatoire passe à $156 \times 156 = 24336$ possibilités.

Avec 3 lignes la combinatoire passe à $156 \times 156 \times 156 = 3796416$ possibilités.

Avec 4 lignes la combinatoire passe à $156 \times 156 \times 156 \times 156 = \text{ERR}$ car la calculatrice a dépassé ses capacités. Cette petite machine de "rien du tout" est tout de même apte à dérouler un nombre de programmes égal à 156 élevé à la puissance 33 soit un nombre qui dépasse largement celui de tous les grains de sable que l'on peut trouver sur les plages et les déserts de notre Terre !

Pour les données, le potentiel des variantes possibles est infiniment moindre puisqu'il n'est que de 3 élevé à la puissance 56, c'est à dire à peine deux ou trois fois le nombre d'étoiles qui peuplent notre Galaxie. Au final, cette petite chose n'est pas si ridicule que ça et nous laisse largement de quoi combler toutes les soirées d'hiver à lui proposer des algorithmes différents. Si tous les humains de la Terre se répartissent chacun le nombre calculé de possibilités, pour tout tester il ne faudra que quelques millénaires ... je n'ai pas vraiment calculé le nombre exact !

➤ **Efficacité des technologies d'antan.**

Purement philosophique, par ce chapitre je me fais un petit plaisir en vous livrant mes réflexions sur des systèmes du passé qui n'ont plus rien de commun avec ceux du présent. Pourtant, si l'on prend du recul pour comparer ce qui est comparable, vous allez constater à quel point avec trois fois rien les anciens étaient capables de faire fonctionner des systèmes qui actuellement imposent des myriades de composants pour traiter l'équivalent. Pour s'en rendre compte, il suffit d'envisager la technologie d'un récepteur de télévision de l'époque pour recevoir les deux chaînes noir et blanc de l'époque. Ce téléviseur était équipé de "lampes" qui sont chacune l'équivalent d'un transistor ou d'un relais toutes proportions gardées. Et bien un tel appareil n'intégrait que sept ou huit tubes électroniques, y compris la tétrode de balayage horizontal qui permettait de générer les 30000v indispensables pour le tube cathodique. Je suis certain qu'un téléviseur de 2022 intègre bien plus que huit transistors ... mais on a la couleur !

Bien entendu, il n'est pas question de rebrousser chemin, car les anciennes technologies étaient très volumineuses, et d'une lenteur proverbiale en comparaison "du silicium" actuel.

Quand à la fiabilité, la balance penche directement "du coté obscur de la force". Il suffit d'un orage dans le secteur de votre maison pour avoir à remplacer la carte électronique de votre lave-linge, alors que les "mécaniques" de l'époque n'étaient pratiquement jamais détruites par un "coup de foudre" dans les environs. Dernier argument pour vous "vendre" mon produit. Si les humains déclenchaient un conflit "de plus", avec en particulier l'usage d'une ***Impulsion électromagnétique Nucléaire***, également connue sous le nom **IEM**, l'intégralité des puces électroniques seraient détruites. Le seul ordinateur au monde à pouvoir encore fonctionner sans problème serait notre machine électromécanique, raison pour laquelle je vais la proposer de ce pas aux généraux de nos armées mais Chhhhhutttt ... c'est un secret défense !

Fig.4

Ici il y en a déjà 30 !

Ici il y en a déjà 30 !

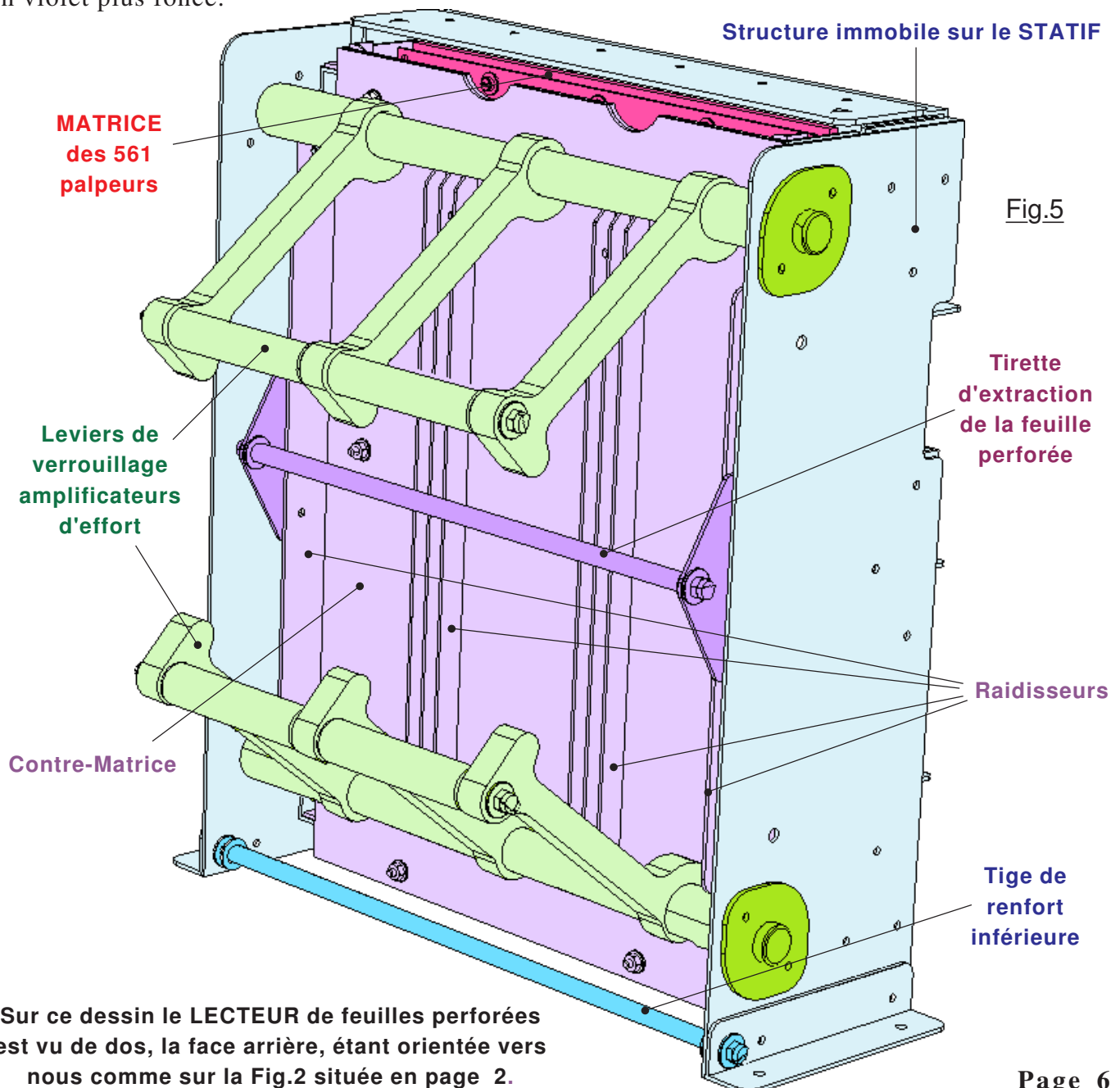
Pendant les phases de développement, d'innombrables incidents ont amené la mécanique au blocage. Les moteurs réducteurs utilisés présentent des couples très élevés pour leur taille, et ils sont irréversibles, c'est à dire qu'il est impossible de les faire tourner "à la main". Si globalement les forçages n'ont pas détérioré "la mécanique", il a fallu dans certains cas changer une vis butée, ou remplacer des Switch qui ont vu à la longue de ces maltraitements leur palette tordue, redressée à la main puis retordue etc. Bref, la mécanique n'a pas aimé du tout !

CONCLUSION : Quand un module associé à son circuit imprimé de gestion est terminé, ne procéder aux essais qu'après avoir vérifié que l'intégralité des liaisons vers les capteurs est bien établie et sur les bons contacts des divers Switch. Ne procéder en première instances à la validation du comportement en actionnant les capteurs manuellement, qu'avec un moteur extérieur au mécanisme pour en analyser les réactions. Enfin, quand les observations confirment les effets attendus, rebrancher le moteur concerné sur le circuit imprimé, et placer un interrupteur de type "panique" sur l'alimentation du module. Déclencher manuellement le début de la fonction à la place de la logique de la machine et si la rotation n'est pas dans le sens attendu couper immédiatement l'énergie pour établir la liaison électrique correcte et le sens de rotation attendu. Cependant, ne pas se faire trop de mauvais sang, le prototype à été se coincer fortement un grand nombre de fois et ... a survécu à sa triste jeunesse. OUF !

03) Agencement global du lecteur de feuilles perforées.

É lément fondamental de la machine en cours de réalisation, cette unité fonctionnelle incontournable est globalement constituée de cinq éléments distinct représentés sur la Fig.5 et mis en évidence par des couleurs différentes. On observe en premier le corps du lecteur colorié en bleu clair immobilisé en liaison complète avec le STATIF de la machine. Lorsque cette unité est déposée du châssis pour sa mise au point ou sa maintenance, sa semelle n'est plus solidarisée avec le socle de la machine. Dans cette configuration, lorsque l'on verrouille le lecteur à l'aide des leviers verts, les efforts sont tels que les flancs latéraux ont une légère tendance à s'ouvrir. C'est la raison pour laquelle la structure verticale est renforcée à la base par la tige coloriée en bleu foncé.

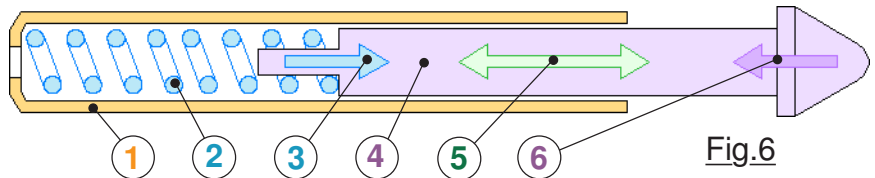
L orsque l'on active les leviers verts, ils amplifient l'effort exercé par l'opérateur pour presser les 561 palpeurs de la MATRICE dont le support fixe est colorié en rouge. Ces leviers poussent sur la Contre-Matrice teintée en violet. Les efforts importants (*Leur origine est explicitée dans les chapitres qui suivent.*) engendrés par les cames vertes ont tendance à déformer la plaque verticale violette de la Contre-matrice, d'où la présence des raidisseurs bien visibles sur ce dessins. Comme nous le verrons dans un chapitre dédié à la Contre-Matrice, cette dernière est équipée de rainures de guidage dans lesquelles on glisse la feuille perforée de programme. Les palpeurs repoussent vers l'arrière la Contre-Matrice, mais pour extraire la feuille de programme, on tire sur la barre coloriée en violet plus foncé.



04) Agencement informatique du lecteur de feuilles perforées.

D' une apparence extérieure globalement simple, ce module fonctionnel présente un réel défi pour le concevoir, puis le réaliser avec des techniques utilisables par tout un chacun. Deux aspects viennent contribuer à rendre cette première étape particulièrement délicate. Pourtant l'idée de base qui préside est d'une simplicité déconcertante. Quand on observe une feuille de programme, cette dernière comporte 33 lignes avec sur chacune 17 possibilités. La grille des TRANSITIONS sera donc organisée sous forme d'une MATRICE de $33 \times 17 = 561$ "positions" réparties régulièrement sur le support papier. En fonction de son algorithme, le programmeur perforera des emplacements bien précis répartis sur la feuille.

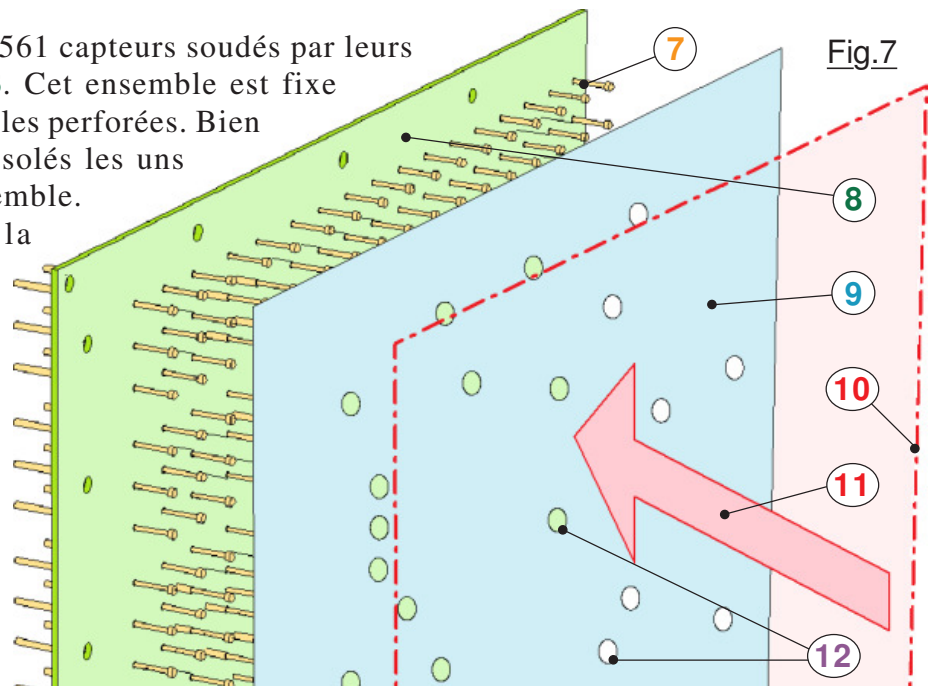
Tous les éléments du capteur avec palpeur sont métalliques et bon conducteurs de l'électricité.



Bien en face des 561 positions repérées par des cercles sur le papier, on dispose sur un ou des circuits imprimés 561 capteurs électriques tel que celui représenté sur la Fig.6 avec un palpeur rétractable 4 poussé intérieurement par un ressort 2 dans le sens 3. Le corps 1 se soude perpendiculairement à la surface d'un circuit imprimé 8. Le palpeur 4 est guidé dans 1 et peut se déplacer librement comme schématisé par la flèche double 5. Si la feuille perforée disposée verticalement devant un tel capteur télescopique vient pousser sur ce dernier dans le sens 6, le palpeur 4 se rétracte et pénètre de quelques millimètres dans le corps 1.

Sur la Fig.7 on retrouve en 7 les 561 capteurs soudés par leurs corps 1 sur le circuit imprimé 8. Cet ensemble est fixe sur la structure du lecteur de feuilles perforées. Bien entendu, tous les capteurs sont isolés les uns des autres et du support de l'ensemble.

La feuille perforée est dans la pratique glissée en contact direct de la Contre-Matrice symbolisée ici par son contour en traits mixtes 10. Quand on vient plaquer la contre matrice par l'effort représenté en 11 sur l'ensemble des palpeurs, tous ces derniers se rétractent de quelques millimètres. La feuille de programme en papier format A4 (Éventuellement plastifiée pour en augmenter la rigidité.) isole



électriquement les palpeurs 7 de la grande plaque cuivrée 10. Cette dernière est constituée d'une plaque de circuit imprimé bien rigide, dont la face cuivrée a été rainurée pour établir 19 bandes verticales isolées électriquement les unes des autres. Par nature la feuille isolante 9 est perforée en divers points 12 concrétisant la Matrice des TRANSITIONS du programme envisagé par l'opérateur. La Contre-Matrice 10 est reliée au +12Vcc. Partout où un trou a été pratiqué, le palpeur qui le traverse sera alors porté à ce potentiel. L'ensemble des 561 capteurs est connecté à la circuiterie du rotor des TRANSITIONS et constitue les Sorties binaires de la MATRICE de programme.

Sur le lecteur des grilles de programme, la Contre-Matrice sert de guide pour l'introduction correcte des feuilles perforées dans le module. Logement des feuilles perforées et Contre-Matrice constituent le seul sous-ensemble sur le prototype qui est guidé en translation rectiligne sur le corps de la machine. Bien que d'une architecture vraiment très simples, cette unité engendre deux défis à relever :

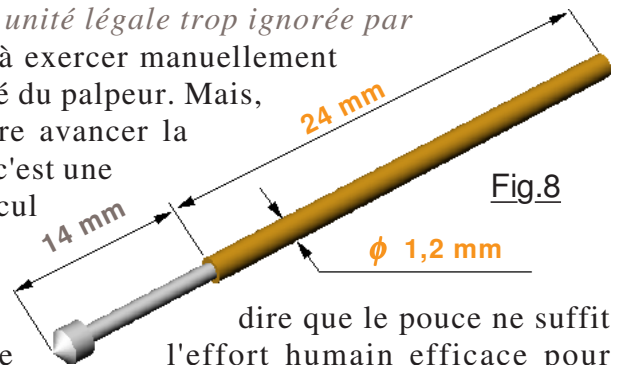
- Exercer et Supporter la force totale nécessaire à comprimer l'ensemble des palpeurs,
- Assembler les 561 capteurs pour utiliser au mieux une surface A4.

05) Conception de la matrice de palpeurs.

Chapitre consacré à la réalisation du lecteur de "cartes perforées", nous allons détailler les techniques employées pour relever le double défi annoncé dans le chapitre précédent, sans oublier de passer en revue les nombreux autres aspects de cette phase particulièrement importante dans la création de notre prototype. Nous allons commencer par le premier challenge relatif aux efforts qui s'exercent dans cette unité, actions mécaniques internes qui en influencent directement la conception globale des éléments principaux.

► **Contraintes mécaniques engendrées par les palpeurs.**

Mécaniques de précision, les frêles capteurs avec palpeurs télescopiques n'imposent qu'une faible sollicitation pour les comprimer d'environ 4mm lorsque le lecteur est fermé et verrouillé. La Fig.8 en précise les dimensions, ce sont vraiment des petites pièces d'horlogerie. Une mesure montre que l'effort à fournir dans ces conditions avoisine 62 "Grammes Force". (*Que les spécialistes acceptent la non utilisation du Newton, unité légale trop ignorée par le grand public.*) C'est un effort assez dérisoire facile à exercer manuellement quand tenu à la main on pousse dans l'axe sur l'extrémité du palpeur. Mais, c'est bien connu, l'union fait la force. Quand on désire avancer la Contre-matrice vers les circuits imprimés des capteurs, c'est une troupe de 561 palpeurs qu'il faut rétracter. Un rapide calcul élémentaire prédit que l'effort total à exercer sur le système sera de $62 \times 561 = 34782$ grammes, soit la bagatelle de 34,8 Kg Force. (*Soit environ 341 N.*) Autant plus, et qu'il faut prévoir un dispositif d'amplification de ramener la force à exercer à une valeur très raisonnable. Par ailleurs, cet effort va se retrouver sur les circuits imprimés supportant les palpeurs, sur la Contre-Matrice et sur le corps du lecteur de feuilles de programme. Il faut impérativement rigidifier tous ces organes vitaux de la machine.



dire que le pouce ne suffit l'effort humain efficace pour

► **Contraintes de conception de la MATRICE de palpeurs.**

Concilier l'inconciliable serait un titre plus approprié, car les incompatibilités sont nombreuses, et il importe de faire appel à un compromis qui optimise au mieux les divers critères qu'il faudrait respecter pour aboutir à une solution raisonnable. Nous allons détailler dans la suite de ce tutoriel les solutions envisagées et les techniques mises en œuvre pour les concrétiser.

Contraintes de conception de la grille de palpeurs télescopiques :

- Utiliser des plaques préperçées du commerce,
- Éloigner le plus possible chaque palpeur de ses voisins et des vis de fixation des C.I,
- Répartition pour utiliser au mieux une feuille A4, (*Qualité opérationnelle.*)
- Répartition pour favoriser la présentation de la grille, (*Le haut dépasse très peu !*)
- Répartition pour ménager des marges imprimante, (*Difficile pour le bas.*)
- Répartition pour disperser au mieux les colonnes de soutien. (*Et les contre-fiches.*)
- Assembler et souder de façon à garantir le parfait parallélisme des palpeurs.
- Faciliter au maximum le travail de soudure.

REMARQUE : Compte tenu des limites imposées par l'imprimante disponible, l'avant dernière ligne de perforation n'est qu'en partie imprimée, et la dernière ligne inexistante. Il faut donc réaliser un patron pour repérer les trous du bas de la feuille, ce qui ne présente aucune difficulté. De plus, l'expérience montre qu'il n'y aura que six ou sept orifices maximum à percer dans la grille.

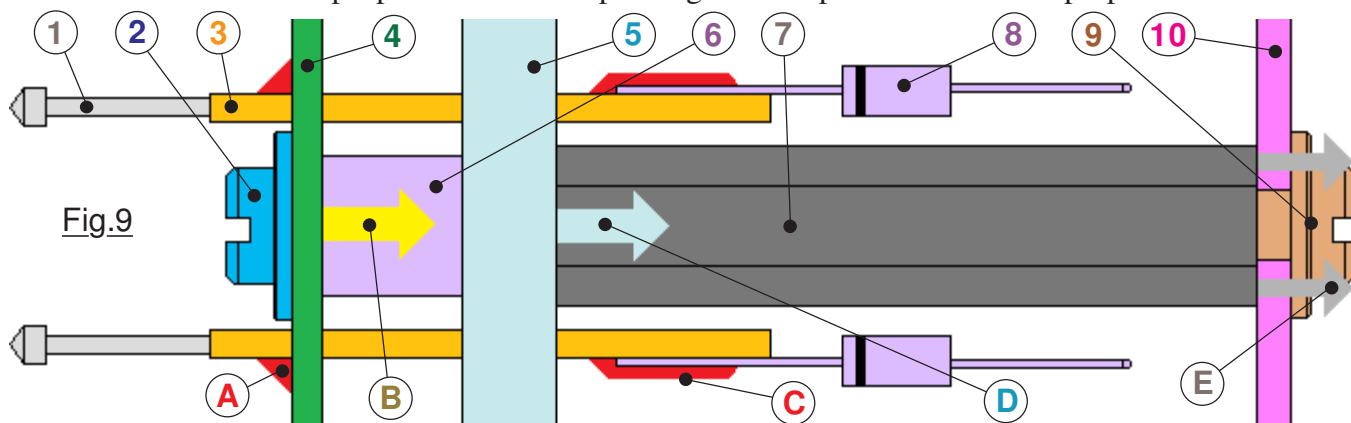


PUB ! Matrice de capteurs militarisée avec blindage de 1,mm d'épaisseur résistant à l'impact d'un moustique lancé à plus de 150km/h. (*Le moustique ne résiste pas!*) Protège sans problème contre des radiations de type V sur l'échelle salamandresque.

➤ Conception de la matrice de palpeurs.

Étudiée pour réduire au maximum les dimensions de la machine et utiliser au mieux la surface d'une feuille de programme au format A4, l'usage de circuits imprimés prépercés du commerce prévus pour le prototypage facilite considérablement la réalisation, car le circuit imprimé est directement utilisable et les trous déjà percés avec une précision "industrielle". La répartition des palpeurs se fait dans un quadrillage de 2,54mm. ($1/10^{ième}$ de pouce.)

Les contraintes de conception sont nombreuses, et la **Matrice** de palpeurs est étudiée pour obtenir une rigueur de perpendicularité des 561 aiguilles par rapport à la **Contre matrice**, c'est à dire la plaque cuivrée sur laquelle s'établissent les contacts électriques à travers la feuille des transitions. Il faut donc aboutir à une perpendicularité la plus rigoureuse possible entre les palpeurs et les circuits



imprimés. Dans ce but le lecteur de feuilles de programme est globalement architecturé comme présenté sur la Fig.9 avec les palpeurs 1 dont le corps 3 est maintenus par la plaque d'Altuglas 5 qui sont soudés en A sur le circuit imprimé 4. Pour assurer la perpendicularité entre 3 et 4 le corps 3 des palpeurs télescopiques traverse la plaque d'Altuglas 5 distante de 4 de 6mm par l'entremise des entretoises en nylon 6. Les vis 2 et leurs rondelles d'appui immobilisent 4 sur les entretoises hexagonales 7 qui sont également en matériau de type nylon. Ces entretoises 7 sont immobilisées sur le dos de la structure 10 par les vis et leurs rondelles d'appui 9. Les entretoises d'écartement 7 ont une longueur suffisante pour souder en C les diodes 8 en laissant un espace suffisant avec 10.

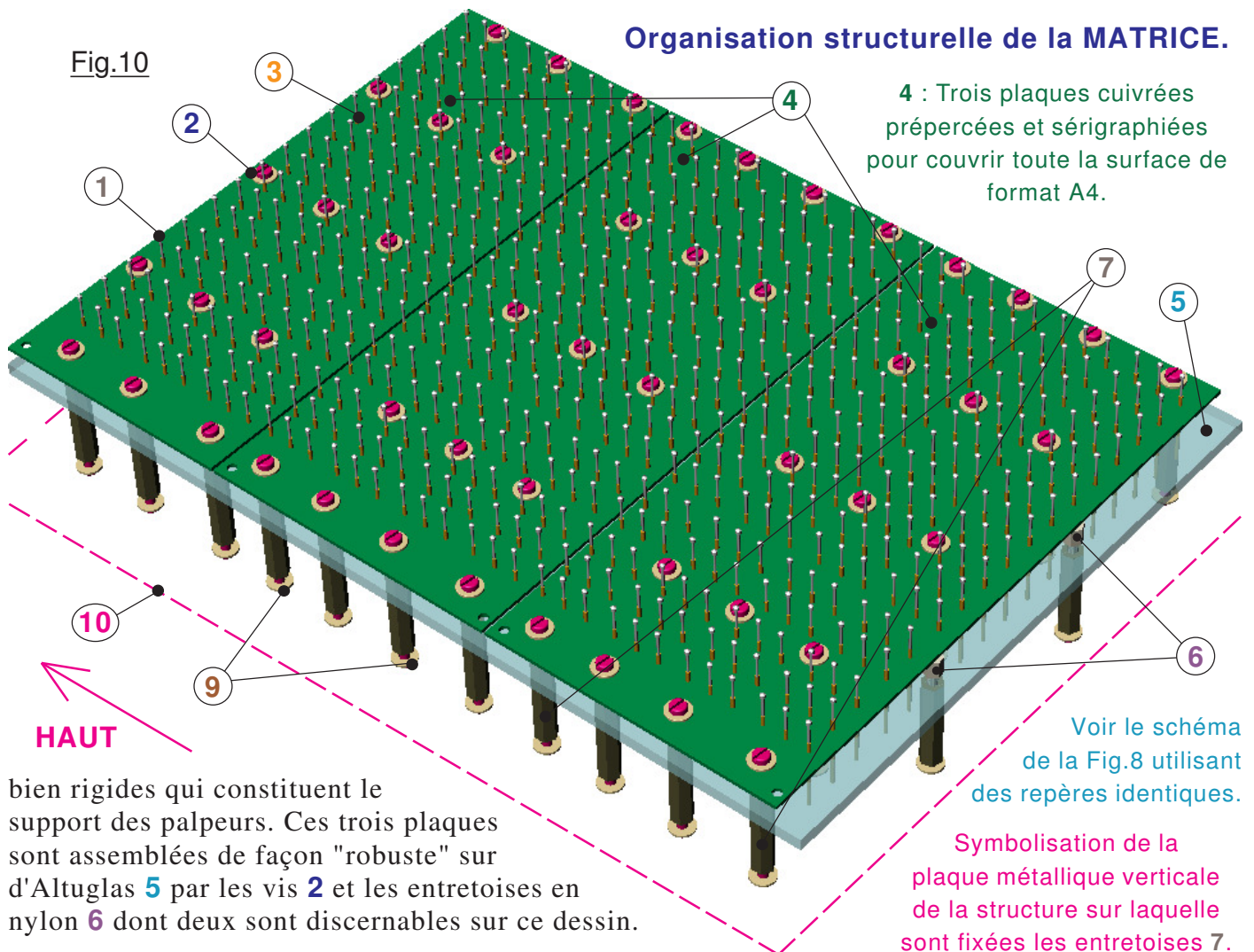
➤ La propagation des efforts.

Pour rétracter un palpeur d'environ 2mm à 3mm il suffit d'une pression que l'on peut qualifier de dérisoire. (62g force à 65g force environ comme déjà précisé dans le chapitre précédent.) C'est la poussée qui sera engendrée par 3 sur le circuit imprimé 4, largement supportée par ce dernier et par la soudure A. Nous avons vu qu'il en va tout autrement quand on multiplie ce "dérisoire" par 561. En effet, la pression engendrée par l'ensemble des capteurs sur les trois circuits imprimés 4 totalise environ 34,8kg force à 36kg force. (Oui, je sais que les puristes vont me reprocher de ne pas écrire 341N à 353N, mais je préfère ici un "langage" très approximatif acceptés par tous au détriment de la rigueur ...) Cette poussée globale est considérable et engendre des déformations de la structure et de la **Contre matrice** qu'il faudra absolument contrer par des raidisseurs. En résumé, 4 pousse sur 5 en B. L'entretoise 5 à son tour agit sur 7 en D. Enfin, D pousse sur 10 en E. Ces efforts se propagent intégralement sur 10, en remarquant que sur chaque entretoise la "force" totale reste modérée car divisée par le nombre de 55 colonnes hexagonales qui sont réparties sur la surface de la grille des palpeurs. Réalisées en matériau de type "nylon", les entretoises 7 résistent mal au cisaillement, c'est à dire à l'arrachement des filets des taraudages. C'est sans importance, car les vis 2 et 9 peuvent se voir implanter avec un serrage très modéré car elles ne sont absolument pas sollicitées en traction, les colonnes étant comprimées et non tendues.

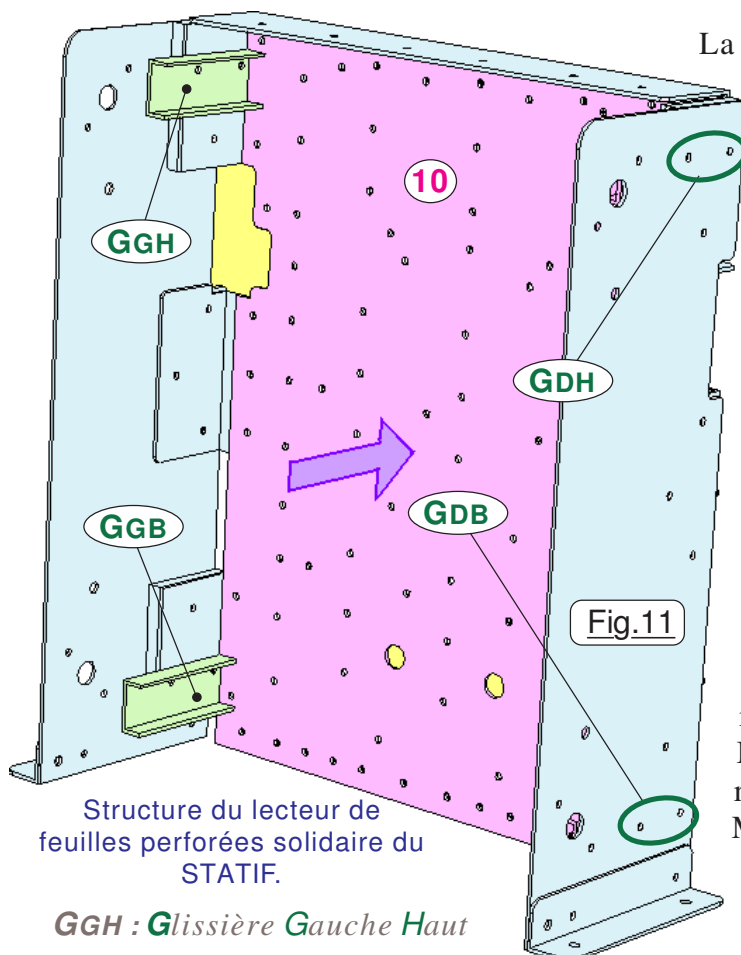
Toujours sous forme de maquette virtuelle cachée dans les entrailles de l'ordinateur, la Fig.10 présente le module complet de la MATRICE de capteurs formant un sous-ensemble constitué de la plaque en d'Altuglas 5 assemblée rigidement sur la structure métallique 10 non représentée du corps vertical du lecteur de feuilles de programme. (La Fig.10 reprend les repères de la Fig.9) Cette plaque est rendue solidaire par les quarante neuf entretoises 7. Trouver un circuit imprimé de format A4 prépercé n'est pas vraiment réaliste. Aussi, c'est trois plaques cuivrées

Fig.10

Organisation structurale de la MATRICE.



bien rigides qui constituent le support des palpeurs. Ces trois plaques sont assemblées de façon "robuste" sur d'Altuglas 5 par les vis 2 et les entretoises en nylon 6 dont deux sont discernables sur ce dessin.



La Fig.11 également fournie par le monde virtuel des ordinateurs présente l'allure globale du corps de la structure du lecteur des cartes perforées. Sur ce dessin l'ensemble du corps est colorié en bleu pastel, et la plaque rigide du fond 10 en rose. En vert pastel sont mis en évidence les profilés qui servent à guider en translation rectiligne la structure de la Contre-Matrice dont il sera question plus avant. La grosse flèche violette montre la façon dont l'ensemble de la Fig.9 est assemblé en liaisons rigides sur la plaque verticale du fond 10. Les deux trous circulaire et la lumière jaunes servent à faire transiter vers l'arrière les innombrables liaisons entre les diodes, le circuit imprimé de la Contre-Matrice avec les prises DB25 non visibles sur le dessin et immobilisées sur les profilés de renfort et de rigidification disposés au dos de la plaque 10. Maintenant que nous avons une idée relativement précise de l'agencement de la MATRICE et de la structure globale de cette unité, nous pouvons passer à l'aspect réalisation. Dans ce but consultez le fichier **RÉALISER.pdf** très documenté ... **Page 10**

06) Conception de la Contre-Matrice.

Constituée d'une grande plaque cuivrée **3** prévue pour réaliser un circuit imprimé rigide, cette plaque doit venir en contact avec les 561 palpeurs de la MATRICE quand on verrouille le LECTEUR de feuilles perforées. Ce sous-ensemble se déplace en translation rectiligne, guidé par les profilés coloriés en vert sur la Fig.10 de la page 9. Sur les dessins des Fig.12 et Fig.13 les guidages complémentaires **6** sont coloriés en jaune. La Fig.13 montre la Contre-Matrice avec l'orientation qu'il faut lui imposer pour la glisser en translation dans le corps principal de la MATRICE. (*Translation dans la direction de la grosse flèche violette de la Fig.11*) Associé aux deux flancs latéraux **1**, au dos de la structure et à la grande plaque cuivrée rigide **3**, les deux cornières **2** réalisent un guide vertical pour introduire ou extraire facilement la feuille de programme **5** dans le LECTEUR. Le schéma situé dans le médaillon circulaire représente, relativement agrandie, la solution retenue pour agencer le guidage de la carte perforée. (*Pour ma part, quand un programme a été validé sur la machine, je plastifie sa feuille perforée pour en augmenter la rigidité et la résistance mécanique.*) Quand on tracte complètement vers l'arrière la **Tirette d'extraction de la feuille perforée**, la feuille glisse librement vers le bas jusqu'à buter sur

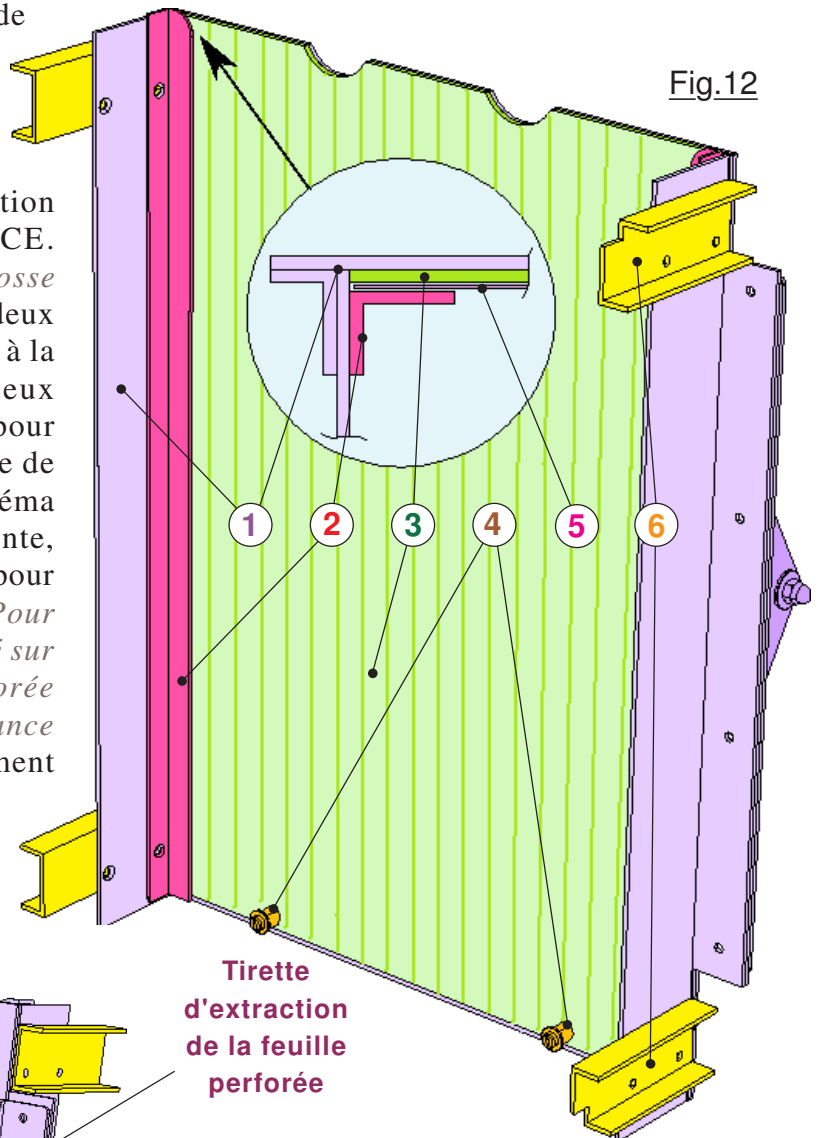


Fig.12

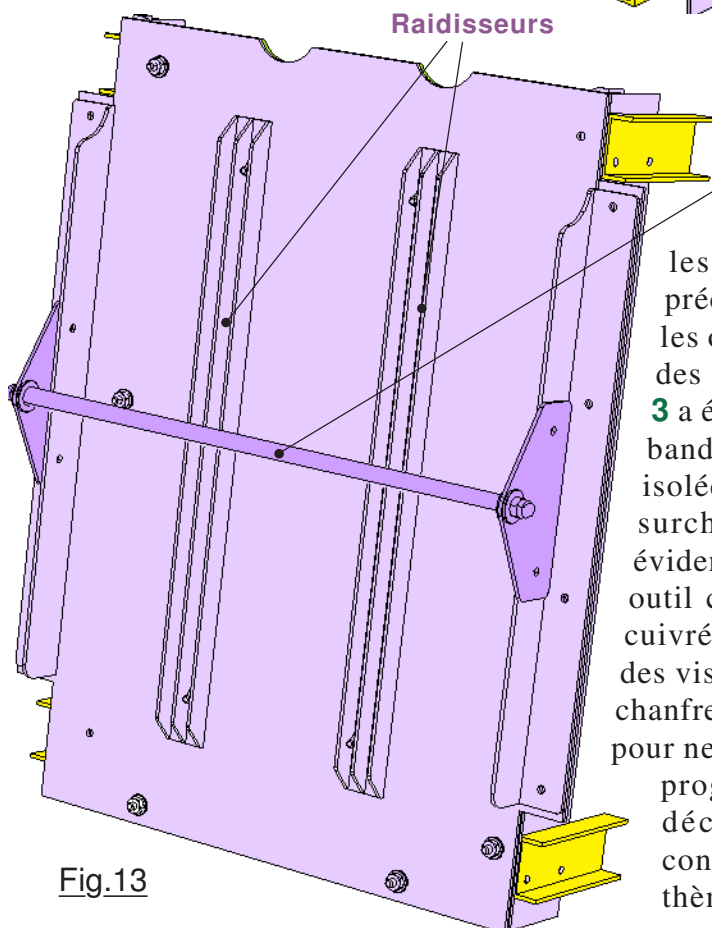
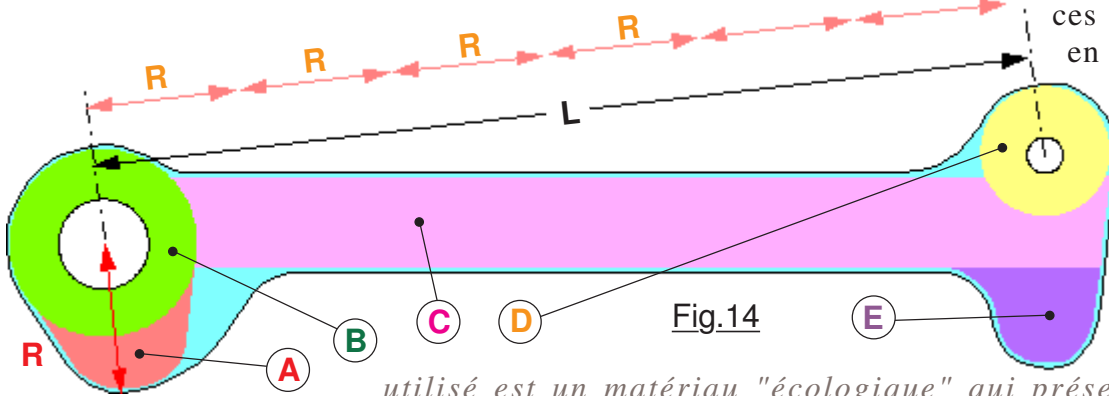


Fig.13

les tenons **4**. Ces derniers sont implantés avec précision vers le bas de la structure de façon à ce que les orifices de l'algorithme soient exactement en face des 561 palpeurs. La plaque cuivrée de grand format **3** a été rainurée de façon à créer sur cette dernière des bandes verticales conductrice du courant électrique, isolées les unes des autres. Le dessin de la Fig.13 a été surchargé par des traits vert foncé pour mettre en évidence ces rainures d'isolation réalisées au moyen d'un outil coupant. (*Un cutter en l'occurrence.*) La plaque cuivrée **3** est immobilisée sur le dos de la structure par des vis de type F 90 dont les têtes sont noyées dans des chanfreins pratiqués dans l'épaisseur de la plaque cuivrée pour ne pas qu'elles ne dépassent du côté de la feuille de programme. La Contre-Matrice étant globalement décrite, nous pouvons passer maintenant à la conception du système de pressage des 561 palpeurs, thème abordé dans le chapitre suivant.

07) Conception du système de pressage des 561 palpeurs.

Optimisé pour répartir le plus judicieusement possible l'effort de 34,8KgF nécessaire au verrouillage du LECTEUR de cartes perforées, le dispositif adopté met en œuvre six leviers bien visibles sur la photographie de la Fig.2 et regroupés mécaniquement par trois pour former deux poignées indépendantes l'une articulée en bas, l'autre en haut de la structure. Morphologiquement, ces leviers comportent diverses zones fonctionnelles repérées par des couleurs sur la Fig.14 représentée en respectant les proportions de cette pièce. Compte tenu de leurs formes spécifiques,

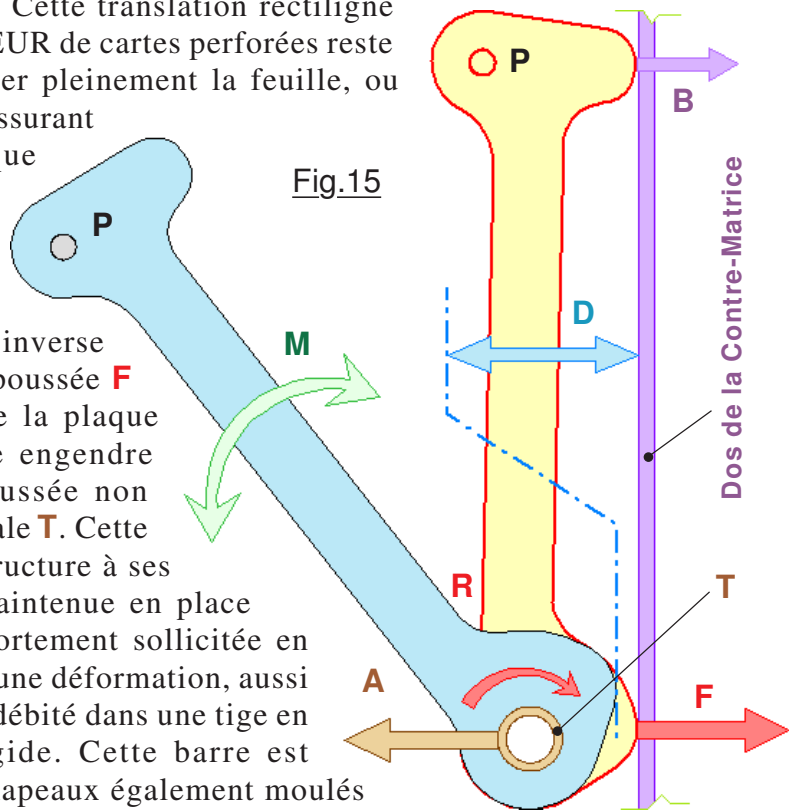


ces pièces sont moulées en fils de PLA sur une imprimante 3D. Naturellement ce didacticiel est accompagné des fichiers *gco* pour que vous puissiez facilement réaliser des clones. (*Le PLA*

utilisé est un matériau "écologique" qui présente une résistance mécanique largement suffisante.) En **C** on trouve le corps longitudinal du levier terminé en **B** et en **D** par des manchons assurant la rigidité indispensable. En **A** se trouve la partie active de la came de verrouillage. Enfin en **E** le bossage sert de butée sur le dos de la structure en phase verrouillée. On peut vérifier sur ce dessin que le rayon actif **R** de la came est six fois inférieur à la longueur **L** du levier. L'amplification d'effort avoisine donc six. L'effort à fournir pour fermer le lecteur par chaque groupement de levier est de $34,8 \text{ KgF} / 2$ soit $17,4 \text{ KgF}$. La poussée à exercer sur la poignée **D** sera alors égale à $17,7 / 6 = 2,9 \text{ KgF}$ soit environ $28,5 \text{ Newtons}$. Cet effort est très facile à produire.

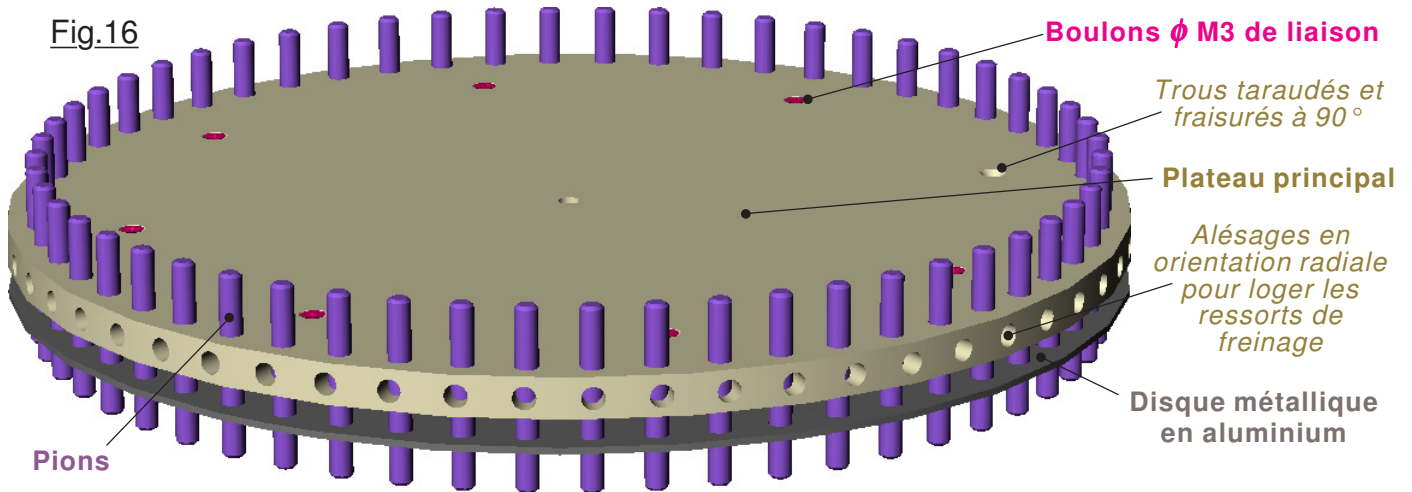
➤ **Fonctionnement du dispositif de verrouillage.**

Réprésenté sur le dessin (*Réalisé à l'échelle.*) de la Fig.15 il montre le mécanisme en position verrouillée obtenu par la rotation **R** jusqu'à ce que le levier butte en **B**. Quand on manipule un groupe de leviers par sa poignée **P**, un mouvement de grande amplitude **M** se réduit sur le mécanisme à un débattement **D** relativement modeste. Cette translation rectiligne de la Contre-Matrice sur le corps du LECTEUR de cartes perforées reste toutefois largement suffisante pour dégager pleinement la feuille, ou rétracter tous les palpeurs d'environ 5mm, assurant un contact électrique franc avec la plaque cuivrée. Quand le système est verrouillé, il y a arc-boutement, c'est à dire que la poussée des 561 palpeurs sur les leviers par l'entremise du dos de la structure ne peut en aucun cas engendrer une rotation inverse des leviers. Quand les leviers exercent la poussée **F** de 17,4 kilogrammes force sur le dos de la plaque verticale, réciproquement cette dernière engendre l'action mécanique inverse **A**. Cette poussée non négligeable passe des leviers à la tige centrale **T**. Cette dernière est retenue par les flancs de la structure à ses extrémités. Sollicitée en son centre et maintenue en place proche de ses extrêmes, cette pièce est fortement sollicitée en flexion. Aussi, pour éviter qu'elle n'accuse une déformation, aussi faible soit-elle, cet arbre d'articulation est débité dans une tige en acier soudé de diamètre 10mm très rigide. Cette barre est maintenue latéralement en place par les chapeaux également moulés avec une imprimante 3D, et visibles en verts sur la Fig.2 de la page 2.

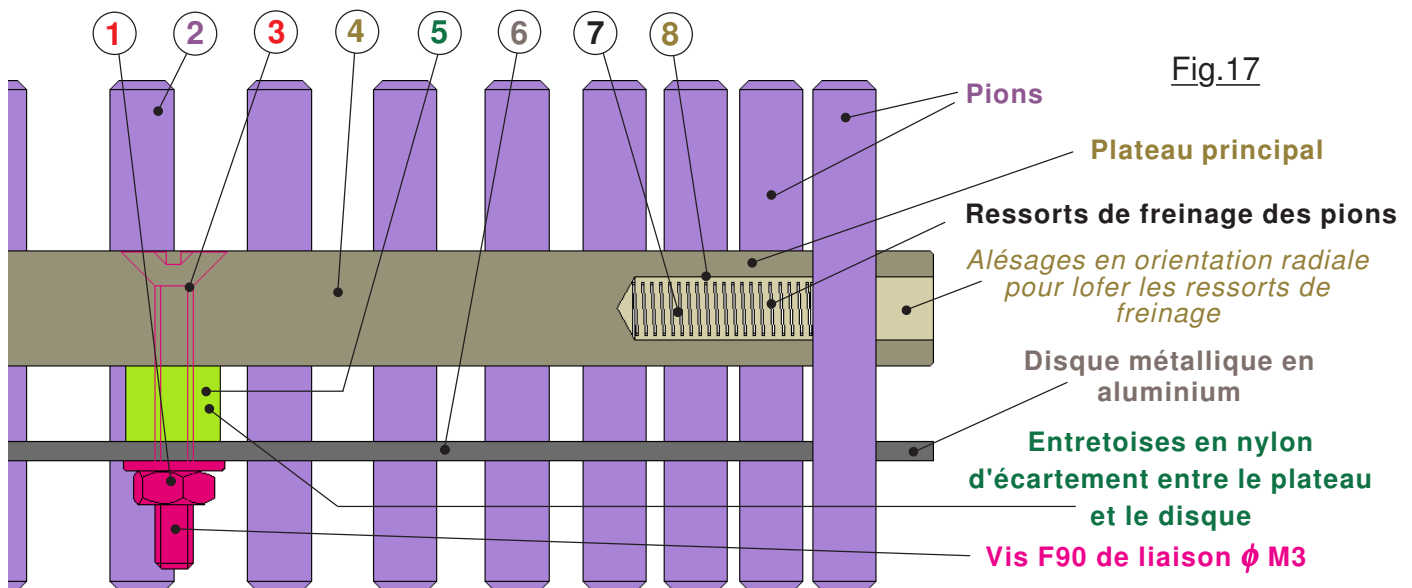


08) Conception du carrousel pour les 7 OCTETs de Mémoire Vive.

Constitué de 56 BITS disposés en cercle sur un plateau tournant, cette unité indispensable pour tout ordinateur constitue la mémoire vive de la machine qui hébergera les diverses données manipulées par les algorithmes. Barillet tournant avec 56 pions cylindriques freinés sur le plateau principal, et par autant de petits ressorts, (Voir les Fig.16 et Fig.17) le sous-ensemble de la mémoire vive est incontestablement l'une des unités fonctionnelles les plus délicates à réaliser.



Sur la Fig.16 le dessin en perspective présente une vue globale du plateau tournant, alors que le dessin réalisé à l'échelle et en coupe sur la Fig.17 précise quelques détails constructifs du dispositif. Les différents pions métalliques 2 qui matérialisent les BITS de cette RAM (*Random Access Memory*) mécanique couissent à frottement doux dans le barillet du carrousel. Cet ensemble tournant rigide est constitué du disque épais 4 réalisé en *polystyrène choc*, matériau décrit dans le fichier [RÉALISER.pdf](#), et assemblé avec le disque métallique 6 par les boulons ϕ M3 repérés 1 et 3. Pour assurer un mouvement vertical précis, la longueur de guidage est augmentée en intercalant entre 4 et 6 les entretoises 5. Les petits ressorts 7 exercent une poussée faible sur les pignes 2, qui engendre une adhérence sur 4 et 6 suffisante pour s'opposer à leur poids et les maintenir en place. Ces ressorts sont logés dans des alésages 7 usinés en orientation radiale sur le plateau 4. Les vis de liaison 3 sont de type F60. Le plateau est alésé avec des chanfreins pour que les têtes de vis soient "noyées"



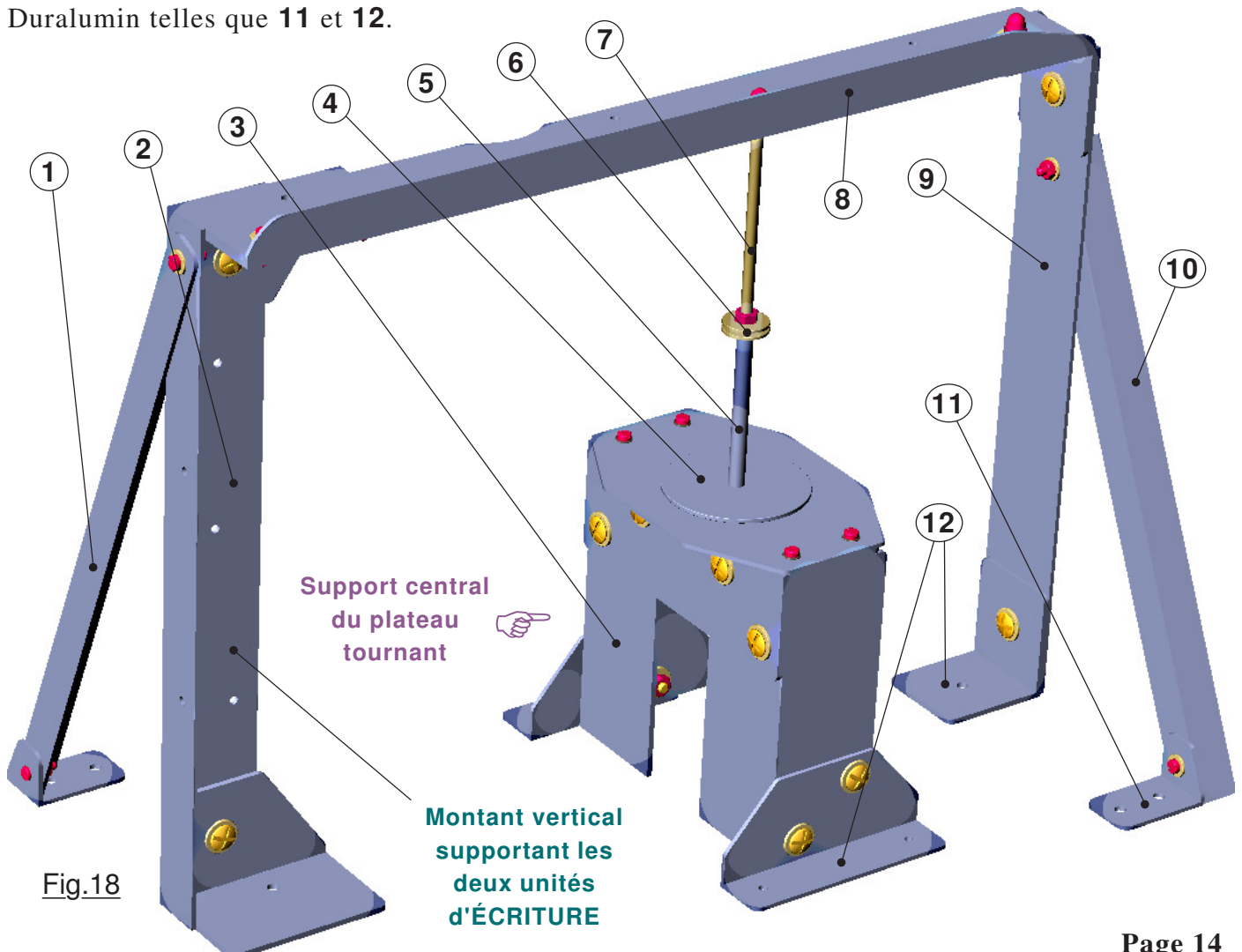
et ne dépassent pas sur le dessus du disque 4. Comme les pignes et les ressorts sont des composants spécifiques, leurs références sont ajoutées aux nombreux liens donnés dans le fichier [ACHATS.pdf](#) qui accompagne ce tutoriel. Maintenant que la constitution et l'organisation de cette unité très importante n'a plus de secret de conception pour nous, il reste à l'implanter sur la machine au moyen d'une liaison pivot de qualité, puis de l'entraîner en rotation.

09) Architecture de la structure de la Mémoire Vive.

Ossature et colonne vertébrale de l'ensemble tournant et support des diverses motorisations, la structure présentée sur la Fig.18 qui s'immobilise sur le STATIF de la machine joue un rôle primordial. Ce sous-ensemble doit présenter une rigidité sans faille tout en restant d'un poids le plus faible possible, positionner et orienter avec précision les unités fonctionnelles suivantes :

- Guidage en rotation précis du Carrousel, (*Orientation et position en Hauteur précises.*)
- Maintien et positionnement rigoureux du système de LECTURE,
- Support des deux unités d'ÉCRITURE. (*Orientation et position fines de leurs plans médians.*)
- Mécanisme d'entraînement en ROTATION du Carrousel. (*Hauteur à respecter soigneusement.*)
- Outre les modules mécaniques, cette structure supporte également divers circuits imprimés.

Élément de base supportant le plateau rotatif, l'étrier **3** contre lequel est immobilisé le circuit imprimé de l'unité d'ÉCRITURE du bas est constitué de diverses pièces taillées dans des profilés en aluminium. (*Ou plus exactement en Duralumin.*) Décrit dans le prochain chapitre, le disque du Carrousel repose en **4** sur une butée à aiguilles qui en assure la stabilité et l'orientation précise. Le centrage de ce dernier est assuré par un tube en aluminium **5** immobilisé avec rigidité sur **3** et sur la traverse supérieure **8** au moyen d'une tige filetée de diamètre nominal ϕ M4 qui traverse l'ensemble. Cette tige passe dans un tube en aluminium **7** servant d'entretoise pour solidariser fermement l'axe vertical avec **3** et **8**. Pour annuler le jeu vertical, le plateau est poussé vers le bas par un ressort de compression non représenté qui prend appui sur **6**. La tige filetée centrale est immobilisée par deux écrous qui prennent appui sur les rondelles **6**, serrage effectué sur une plaque horizontale non représentée qui supporte le mécanisme de LECTURE. La traverse supérieure **8** est immobilisée sur les montants verticaux **2** et **9** débités dans des cornières de 35mm x 20mm. Les deux cornières **1** et **10** de 15mm x 15mm rigidifient considérablement l'ensemble latéralement. (*Structure triangulée.*) Enfin, l'ensemble de la structure est solidarisée avec le STATIF par des cornières métalliques en Duralumin telles que **11** et **12**.



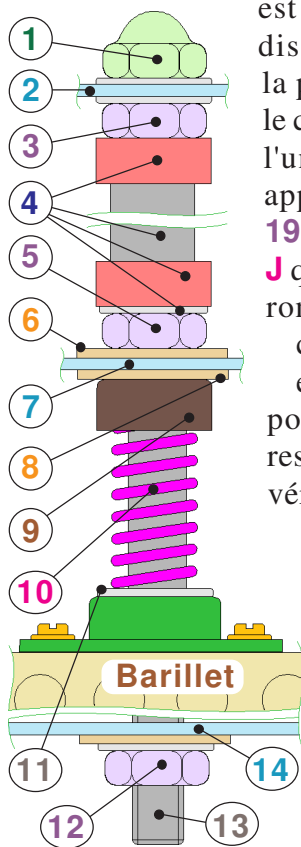
10) Conception du pivot du Carrousel.

Désirant positionner avec précision les pions du Barillet sous les têtes d'ÉCRITURE et dans l'environnement proche de la tête de LECTURE, le plateau tournant doit se mouvoir sur un pivot de qualité. Par qualité il faut intégrer un critère d'orientation précise dans le volume de la machine, et un jeu radial le plus faible possible. Il existe une infinité de solutions envisageables, limitées par notre manque d'imagination et surtout des ressources que nous avons à notre disposition. Ayant assemblé une petite imprimante 3D, dans l'accastillage du KIT approvisionné se trouvait une cage à aiguilles qui n'avait pas été employée. Cette dernière étant disponible et présentant une "grande surface active" est idéale pour orienter avec précision l'ensemble tournant. Elle a donc été intégrée dans le pivot du Carrousel, la Fig.20 précisant les aspects techniques de sa mise en œuvre.

➤ Agencement du pivot du barillet.

L'organisation du pivot de guidage en rotation du barillet sur la structure support inférieure **14** (Repérée 4 sur le Fig.18.) est représenté sur la Fig.19 et sur la Fig.20 les repères étant communs. L'axe central de pivotement est rendu solitaire de la structure représentée en Fig.18 par une tige filetée de diamètre nominal ϕ M4 qui traverse l'ensemble. Cette tige **13** est immobilisée sur la

Fig.19



traverse supérieure **2** par l'écrou **3** et l'écrou borgne **1**. Vers la zone inférieure **13** est solidarisée du support **14** par l'écrou **12** qui plaque **14** vers le haut sur le disque **15**. Ce dernier prend appui sur l'entretoise **18** qui à son tour se serre contre la plaque horizontale **7** retenue par l'écrou **5** et la rondelle **6**. Le Barillet repose sur le chemin de roulement inférieur **17** et sur la cage à aiguilles **16**. Le plateau **7** supportant l'unité de LECTURE porte directement sur tube pivot central fixe **18** qui prend appui sur la bague de centrage **15** de la butée à aiguilles **16**. Le tube pivot extérieur **19** sur lequel se centre le Barillet est légèrement plus court que **18** ménageant un jeu **J** quand on bloque l'écrou **5** vers le bas. S'opposant à cet effort, l'écrou **12** et ses deux rondelles bloquent le support inférieur de la structure **14** contre la rondelle de centrage **15** immobilisant l'ensemble. Quand cette liaison est assurée, le Barillet est pressé vers le bas par le ressort **10** centré par le manchon **9** pour obtenir une portée correcte sur la butée à aiguilles **16**. Les dimensions sont prévues pour que le ressort **10** puisse conserver un *intervalle entre spires d'environ 2 mm* dont il faudra vérifier l'effectivité à l'assemblage final.

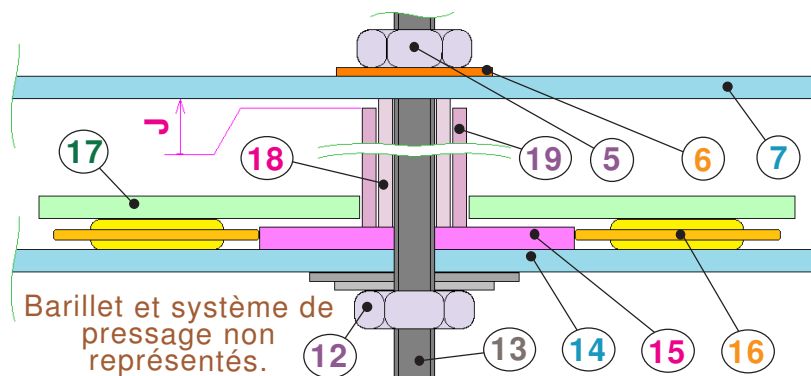
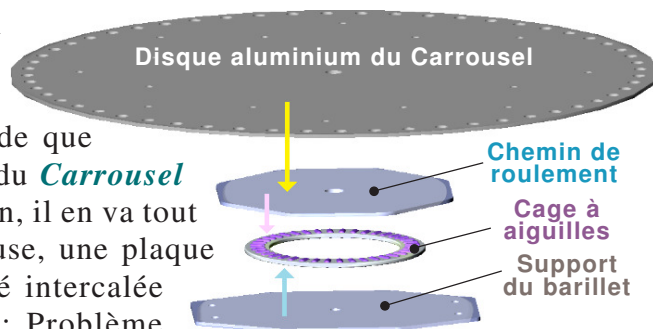


Fig.20

➤ Laminage et chemin de roulement. (Pas le temps ? 🤔 Sauter ce chapitre.)

Quand on utilise des roulements complets, les divers éléments qui les composent sont en acier trempé très dur et à haute résistance, et le problème évoqué dans ce chapitre n'existe pas. Par contre, le guidage du CARROUSEL se fait sur une cage à aiguilles. Les chemins de roulement, c'est à dire les surfaces sur lesquelles roulent les aiguilles sont constitués respectivement du disque métallique pour le Carrousel, et de la plaque du dessus de la structure qui supporte l'ensemble. Ces deux éléments sont en alliage d'aluminium, donc en métal "mou". Ils sont particulièrement sensibles au laminage, sorte de dégradation que produisent les aiguilles lors du roulement. Par ailleurs, nous sommes dans les pires conditions, car les butées à aiguilles accompagnent leur roulement par pas mal de frottement, donc de l'usure va se produire. Dès les premières expériences, après cinq ou six tours du Carrousel, ces deux plaques ont déjà montré des traces de fonctionnement.

Pour la plaque de la structure, s'il faut la refaire au bout de quelques mois de fonctionnement intensif, *(Je suis très certainement pessimiste !)* ce n'est pas grave, car elle est de formes simples et ne demande que peu de précision. Par contre, le disque métallique du **Carrousel** avec ses 72 trous à percer avec beaucoup de précision, il en va tout autrement. Aussi, pour ne pas qu'il soit mis en cause, une plaque octogonale servant de **chemin de roulement** a été intercalée entre la butée à aiguilles et l'ensemble tournant : Problème potentiel entièrement résolu, on peut passer à la suite.



11) Entrainement en rotation du Carrousel.

Présentée en vue plongeante sur la Fig.21 la motorisation du carrousel fait appel à divers éléments dont les chapitres suivants décrivent les agencements retenus et les fonctions respectives. Ce dessin a pour but de situer les sous-ensembles répartis sur la structure. On retrouve en **1** le montant vertical situé à l'avant de la machine avec en **2** une équerre en complément qui supporte le bras oscillant **3**. Sur ce bras est solidarisé le support **4** du capteur de position angulaire. Cette pièce **4** est immobilisée sur **3**, mais peut s'ajuster finement en orientation pour assurer un positionnement angulaire précis des pions dans les plans médians des têtes d'Écriture. Le plateau tournant est entrainé en rotation par le pignon **5**. La roue à bossages **6** active le Switch immobilisé sur **4** qui détecte les positions angulaires précises de **5**. Dans la pratique **5** et **6** constituent une

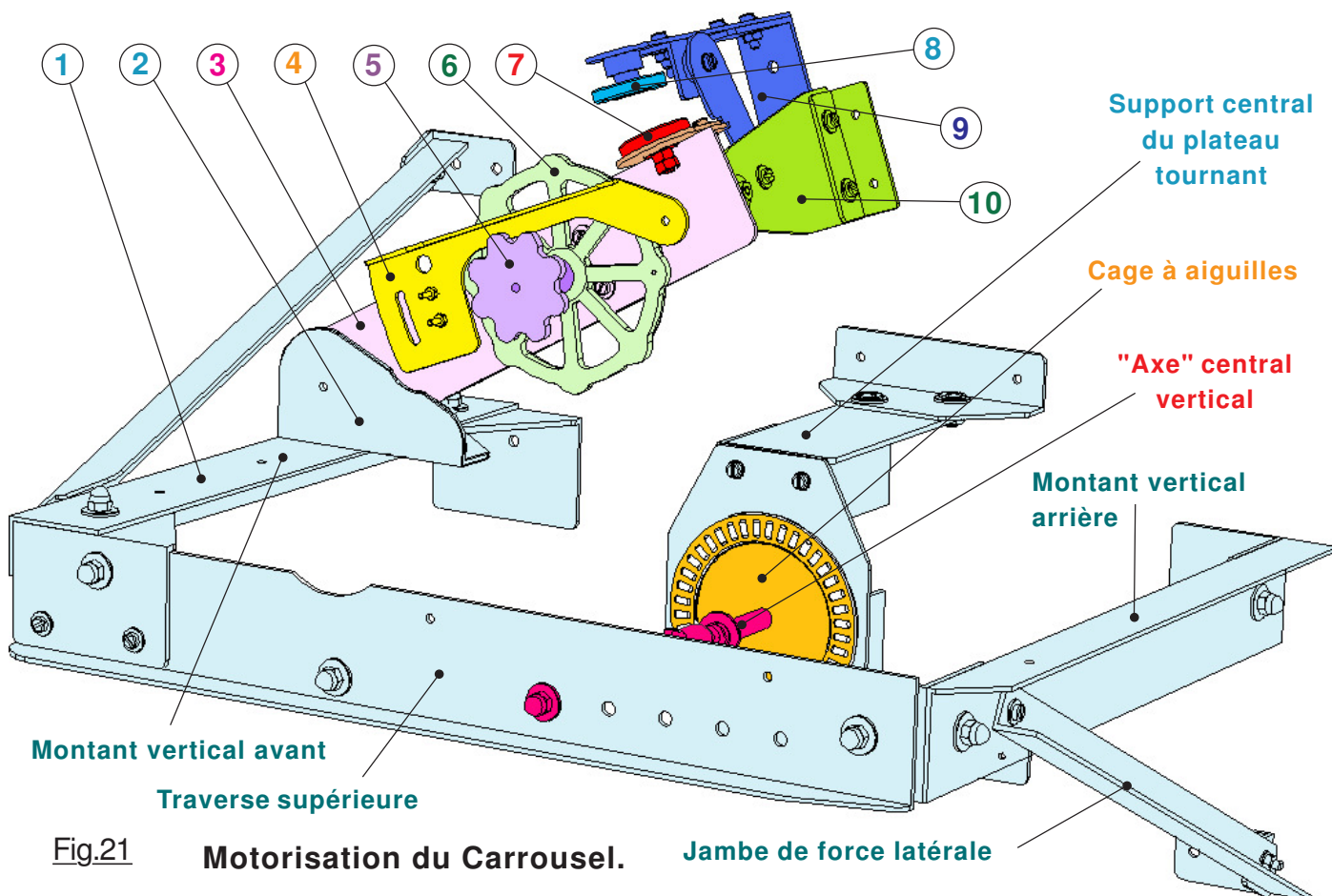


Fig.21

Motorisation du Carrousel.

Jambe de force latérale

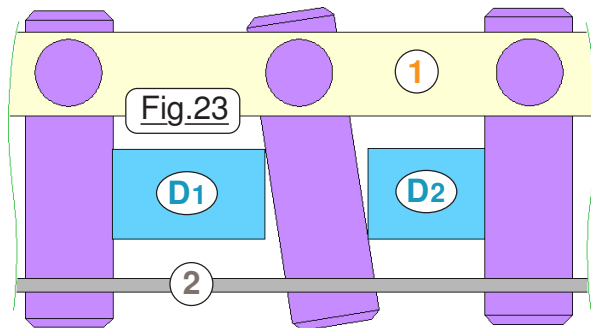
même pièce moulée sur une imprimante 3D et solidaire de l'arbre de sortie du moteur réducteur. Ce dernier est supporté par le bras oscillant **3** qui est poussé par l'aimant **7** vers le plateau qui avec ses pignes constitue la roue dentée de cet engrenage. Le contre-aimant **8** dont l'orientation oppose ses pôles avec ceux de **7** est supporté par la structure **9**. Le support oscillant avec son moteur sont relativement lourds et **3** est articulée à son extrémité sur l'équerre **2**. De ce fait elle se trouve en porte à faux. Il faut impérativement la soutenir de l'autre côté. C'est le rôle du petit montant **10** relié rigidement à **9** par une petite pièce latérale. Le montant vertical **10** soutient **3** par l'intermédiaire d'un galet pour minimiser les frottements dus aux oscillations angulaire de l'ensemble.

12) Engrenage de mauvaise qualité.

L'engrenage formé avec le pignon à huit dents **P** et la roue dentée **R** à 56 "dents" sur la Fig.22 pourrait avoir ses deux axes de rotation à une distance fixe sur la structure. L'entraxe serait ajusté pour obtenir un jeu **J** très faible entre **P** et les deux cylindres en prise **C1** et **C2**. Impératif pour ne pas forcer la mécanique, il faut le minimiser car il engendre un positionnement imprécis du barillet.

Quelle que soit l'attention investie dans la réalisation du barillet, si le plateau épais **1** (Vu

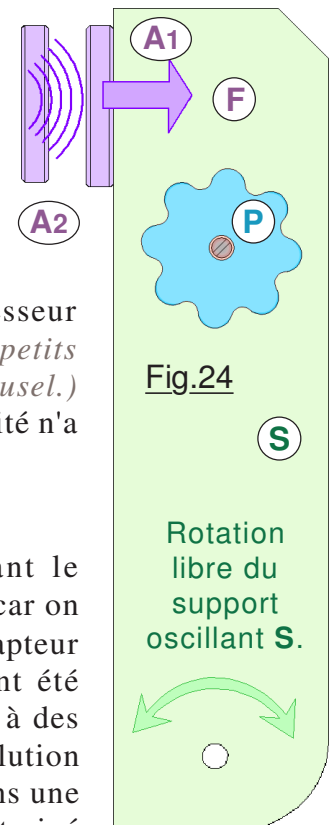
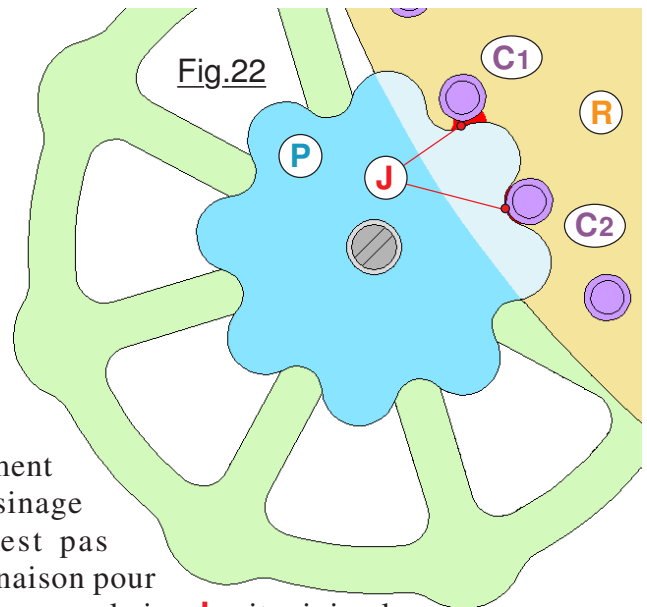
par la tranche.) et le disque de dessous **2** sont relativement précis pour la position angulaire entre deux pions, l'usinage final de l'alésage vertical en contre perçage n'est pas parfaitement vertical. Il en résulte une très légère inclinaison pour certains pions que la Fig.23 caricature sur ce dessin. Pour que le jeu **J** soit minimal il faudrait que la dent en prise **D1** et la dent en prise **D2** présentent des largeurs circonférentielle



le jeu **J**, la solution retenue consiste à placer le pignon **P** sur un support oscillant **S**, lui ménageant ainsi une position flottante de l'axe de rotation. Un contact sans jeu est maintenu en exerçant un effort **F** à l'extrémité de ce support. Sur la Fig.24 présentant cette approche, **A1** et **A2** sont deux aimants permanents qui placés en opposition polaires engendrent cet effort presseur relativement faible mais suffisant. (*Faible pour minimiser le battage sur les petits cylindres, l'arbre de sortie du réducteur et le guidage en rotation du carrousel.*) Noter que la Fig.24 n'est qu'un schéma de principe, le support **S** dans la réalité n'a pas les dimensions et les formes représentées sur ce dessin.

13) Capturer la position angulaire du barillet.

Problème particulièrement épineux, l'expérience acquise pendant le développement de ce projet a montré que ce n'est pas facile du tout, car on se heurte à plusieurs phénomènes difficiles à maîtriser. On se doute qu'un capteur de type Switch va se voir confier cette mission. Plusieurs solutions ont été envisagées avec des fortunes diverses, allant du fonctionnement aléatoire à des forçages intempestifs sur le corps d'épreuve. Après diverses tentatives, la solution retenue consiste à détecter la rotation du pignon et de stopper le moteur dans une orientation spécifique de ce dernier. N'oublions pas que le barillet est entraîné "sans jeu" par le pignon, et c'est une transmission dite positive, c'est à dire sans glissement possible sur le long terme. Donc, **à une orientation particulière du pignon à 8 dents correspond une position bien déterminée du plateau.** Il "suffira" de caler avec précision le système de détection pour que le pion correspondant "au BIT" en cours de traitement soit "à la verticale" des palettes du système d'écriture. (*Le dispositif de lecture étant lui-même à une position relative spécifique du dispositif d'écriture.*) Après diverses études sur le papier, et de nombreuses tentatives aboutissant à un échec, l'idée retenue consiste à faire basculer le Switch de capture d'événement par le sommet de proéminences pratiquées sur une came associée au pignon de huit dents **P**.



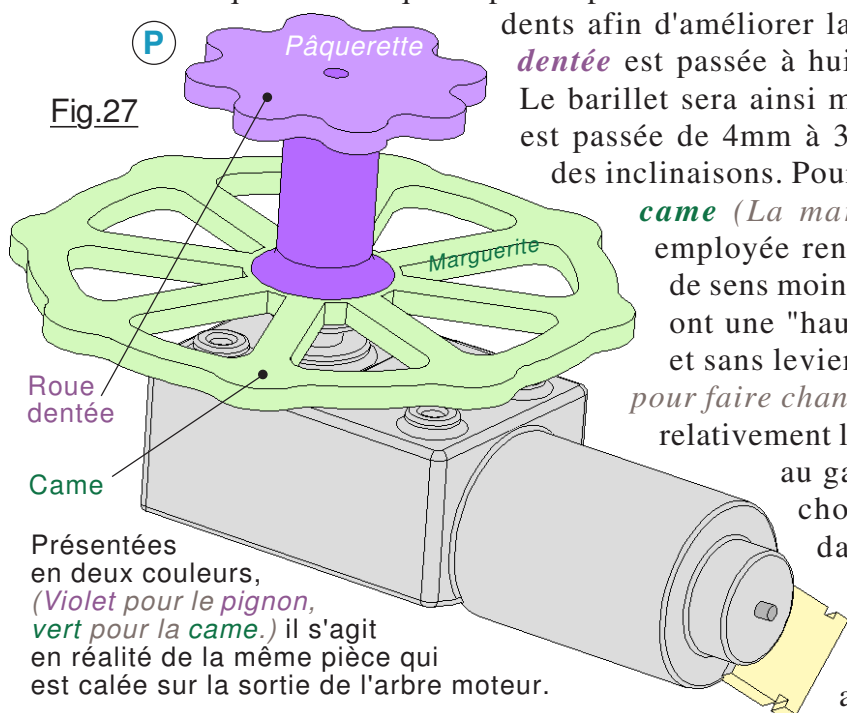
➤ Changement de stratégie.

L'idée de base initiale consistait à utiliser directement le sommet de la denture pour pousser sur la roulette du capteur comme montré sur la Fig.25 sur laquelle la flèche bleue montre que **P** tournera dans les deux sens de rotation possibles. Ce système fonctionne, mais la position à imposer au capteur est très délicate à ajuster. Il faut trouver l'enfoncement radial le plus faible possible, car *plus le déclenchement sera proche du sommet de la dent, plus précise sera la détection de l'orientation*. Il faut que le Switch pénètre d'au moins sa course, voir légèrement plus pour basculer avec certitude. Cette approche bien qu'acceptable à été estimée mécaniquement "scabreuse". Pour justifier le bienfondé de cette appréciation, examinons la Fig.26 qui présente le système lors de la rotation "à rebrousse poils". Un postulat de mécanique fondamentale précise que l'effort de contact entre deux corps se fait perpendiculairement aux surfaces qui se touchent. Dans notre cas la poussée **F** de la dent sur le capteur respecte ce principe. On peut pour l'analyse remplacer cette résultante par deux efforts **U** et **P** dont la somme vectorielle

correspond à **F**. (Mécaniquement **U** plus **P** ont un effet strictement identique à celui de **F**.) On constate que l'action **U** est plus faible que la composante **P** parasite. Mécaniquement médiocre, et bien que fonctionnant, cette solution a été abandonnée au profit de la solution avec une came associée au pignon à huit dents. Avant de détailler cette approche, la solution adoptée découle d'une solution initiale qui utilisait un moteur plus lent. Pour avoir un déplacement assez rapide du barillet, ce moteur entraînait un pignon à vingt dents. La distance de capture qui correspond au pas circonférentiel n'était que de 13mm, nettement insuffisante. Le déplacement était amplifié par un système de levier. Le résultat final s'est montré inutilisable, car le déclenchement de la rotation par l'horloge restait incertain, avec des loupés. Et surtout le positionnement du barillet se faisait avec une incertitude d'environ 3mm.

➤ De la pâquerette à la marguerite.

L'approche issue de cette expérience malheureuse consiste à changer la motorisation au profit d'une unité analogue à celle des références utilisées pour les modules d'écriture. Outre une meilleure homogénéité dans les éléments à approvisionner, ces produits ont une bien meilleure rigidité de l'arbre de sortie ce qui améliore significativement le comportement de l'ensemble. Le moteur tourne quatre à cinq fois plus rapidement. Pour augmenter l'angle de rotation entre deux



dents afin d'améliorer la capture de position angulaire la roue dentée est passée à huit dents. (La pâquerette sur la Fig.27)

Le barillet sera ainsi moins "brutalisé". L'épaisseur des dents est passée de 4mm à 3mm pour avoir une influence moindre des inclinaisons. Pour augmenter la précision de capture, une

came (La marguerite.) de diamètre important est employée rendant ainsi l'influence des changements de sens moins importante, et les bossages sur la came ont une "hauteur" de 3mm pour une capture directe et sans levier. (Cette course est largement suffisante pour faire changer d'état le Switch.) Ces bossages sont relativement larges pour présenter des pentes "faibles"

au galet du capteur. La forme du pignon est choisie pour une pénétration importante dans le barillet et ainsi engendrer une transmission positive. Ces divers critères aboutissent, suite à une étude sur ordinateur, à une denture assez large au sommet, et assez "ronde". **Page 18**

14) Ajustement précis de la position angulaire du barillet.

Écrit dans le chapitre précédent, le mécanisme est apte à faire tourner d'un pas le barillet dans les deux sens. Quel que soit ce sens de rotation, les pions se trouveront dans une même position. Mais ce n'est pas suffisant. Il faut de plus que cette position soit exactement à la verticale des palettes des deux unités d'Écriture. Il faut donc pouvoir annuler finement "le déphasage".

Considérons la Fig.28 qui présente l'ensemble oscillant sous un autre angle.

Le **Support de Switch** est articulé sur le **Plateau oscillant** par un pivot d'axe **X'X**. Quand la fixation à l'autre extrémité par le **Boulon d'immobilisation du Support du Switch** est libérée, le **Support de Switch** peut bénéficier d'un positionnement angulaire **A'A** par rapport au **Plateau oscillant**. En modifiant cet angle, le **Switch** sera activé plus tôt ou plus tard. Il en résultera un décalage de la position angulaire du barillet que l'opérateur pourra ajuster finement lors de la première mise en service du

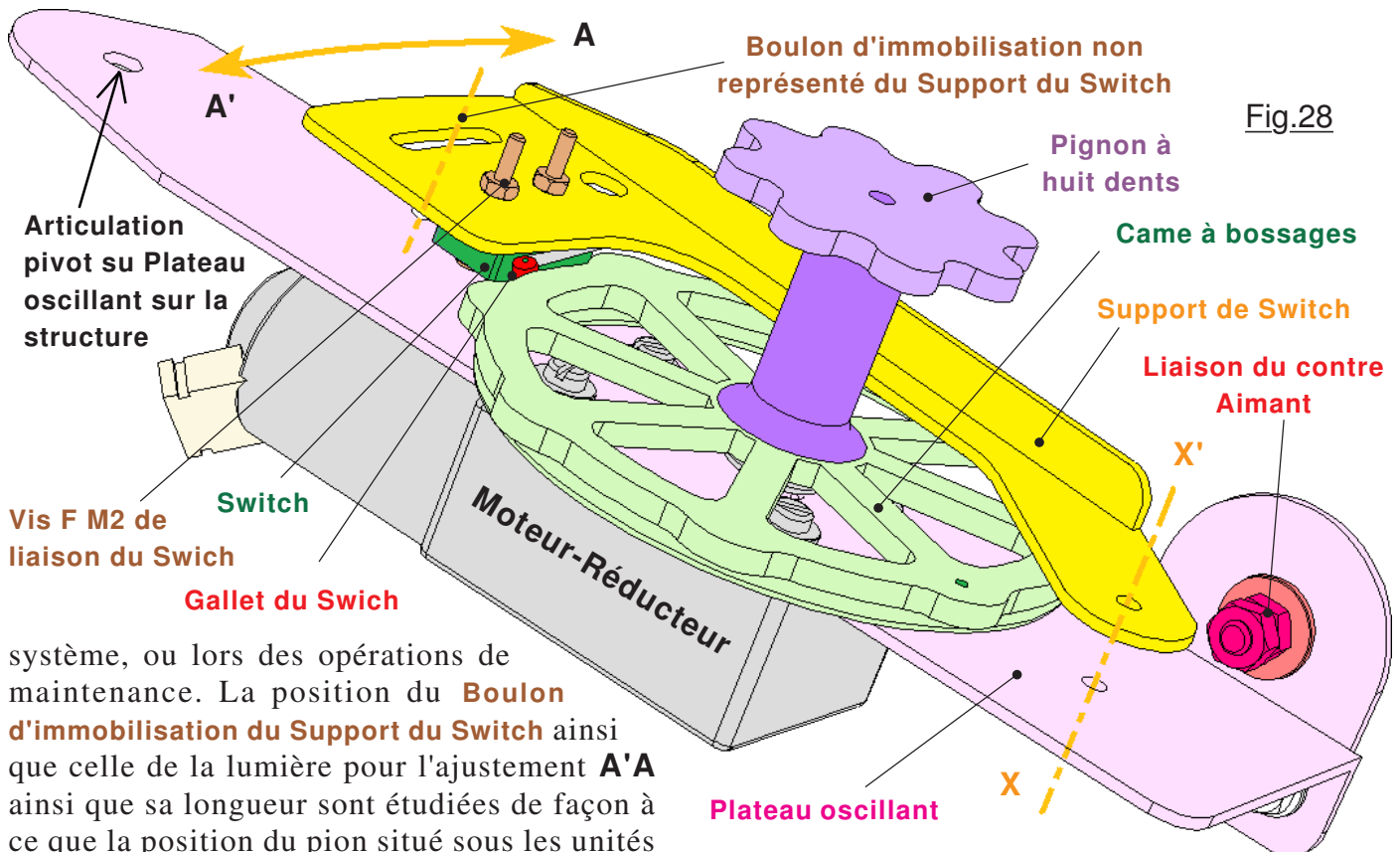


Fig.28

système, ou lors des opérations de maintenance. La position du **Boulon d'immobilisation du Support du Switch** ainsi que celle de la lumière pour l'ajustement **A'A** ainsi que sa longueur sont étudiées de façon à ce que la position du pion situé sous les unités d'Écriture puisse être ajustée exactement dans leurs plans médian tout en ayant une bonne marge de manœuvre. Lorsque l'immobilisation du plateau se fait avec précision au bon endroit, et ce pour les deux sens de rotation possibles, alors on serre les **Boulon d'immobilisation du Support du Switch** pour pérenniser l'ajustement.

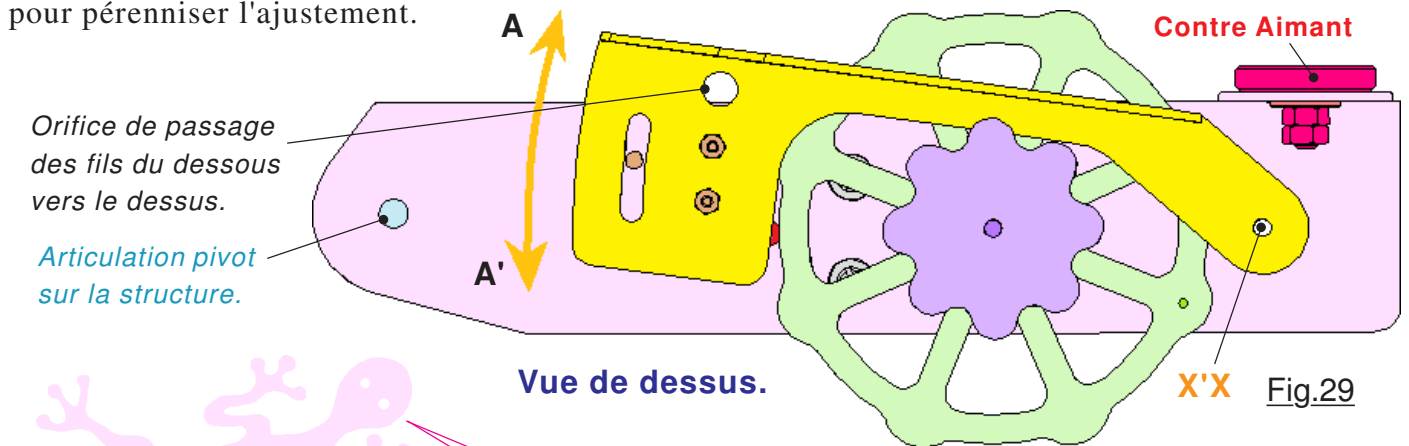


Fig.29



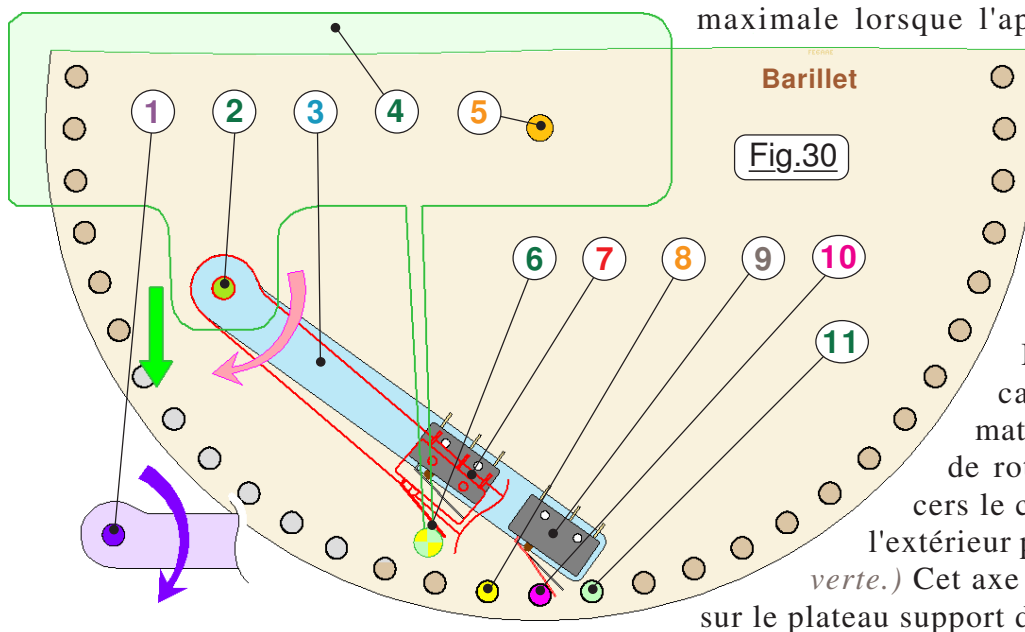
Ben Môa môa je dis que ce mécanisme
carrouseltrucmachin qui tournicote : il fonctionne :
- Un peu - Beaucoup - Passionnément - à la Folie ...
PAS DU TOUT !

15) Agencement mécanique de la fonction LECTURE.

Chronologiquement c'est l'action LECTURE qui sera traitée dans le début d'un cycle d'HORLOGE. Cette fonction est sollicitée à chaque traitement d'instruction, c'est donc celle qui sera de loin la plus activée en exécution d'un programme. Pour optimiser la rapidité de traitement de cette machine informatique, il convient de réduire au maximum le temps nécessaire à une opération de LECTURE. C'est la raison pour laquelle on utilise un moteur-réducteur relativement rapide.

➤ LIRE des BITS, une fonction pas facile à agencer.

Fidèle à un choix technologique qui consiste à n'utiliser que des rotations pour les guidages, car faciles à agencer par un bricoleur ne disposant que de faibles moyens dans son atelier, le principe de base est caricaturé sur la Fig.30 sur laquelle l'ensemble est vu par dessus, le pion **10** qui se trouve dans le plan moyen du dispositif d'écriture, donc le BIT à tester, étant colorié en rose sur ce dessin. La grande difficulté de conception réside dans le faible volume restant libre entre les deux mécanismes d'écriture, et surtout de l'amplitude très réduite pour la détection des trois états logiques à tester. Les deux Switch **9** pour détecter respectivement les états "**0**" et "**1**" sont superposés, et sont immobilisés sur le bras oscillant **3** par les mêmes petits boulons ϕ M2. Pour différencier les deux états à détecter, le capteur du haut doit toucher le pion avant celui de bas. (*Cas d'un état "1".*) Pour que ce soit effectif, il suffit de plier légèrement la palette du Switch du haut, cette petite "brusquerie" étant prévu sur ce type de composant. En théorie, l'efficacité de détection serait



maximale lorsque l'approche de la palette des capteurs serait dirigée du centre du barillet vers l'extérieur. Le pivot de rotation pour **3** devrait logiquement se trouver à l'extérieur du barillet en zone voisine de **1**. (*Flèche violette.*) Mais ce n'est pas possible, car il y aurait interférence matérielle avec les pions. L'axe de rotation **2** est donc déplacé vers le centre, mais placé le plus à l'extérieur possible. (*Flèche rectiligne verte.*) Cet axe de rotation est immobilisé sur le plateau support du système de lecture en **4**.

Cette plaque est immobilisée sur la colonne centrale **5** guidant le Carrousel, et sur la gauche assemblée sur un montant vertical lié au statif de la machine. Dès que l'un des capteurs est activé, il provoque immédiatement la rétraction du bras oscillant **3** en position dégagée vers le centre de la machine. Pour détecter l'état "**B**", c'est à dire lorsque le pion est au maximum vers le bas et indétectable par les Switch dédiés à "**0**" et "**1**", le capteur **7** vient en contact avec la butée fixe **6** solidaire de **4**.

Optimiser les formes et les dimensions n'est pas aisé, car il faut concilier de nombreuses contraintes dont on peut citer les principales. Par exemple on cherchera à obtenir la plus grande sécurité possible dans la différenciation des états captés, sachant que l'amplitude maximale de l'angle balayé entre la détection de "**1**" et celle de "**B**" reste très limitée. Les deux capteurs **9** doivent se trouver le plus loin possible de l'axe de rotation **2**, sans pour autant que **3** ne risque de toucher le pion voisin **11** à droite de **10**. Le Switch **7** doit être activé par la butée fixe **6** bien avant que **9** ne fasse une fausse détection sur le pion **8** voisin à gauche de **10**.

➤ La structure qui supporte l'unité de LECTURE.

Avant d'envisager d'associer sur la machine le moteur, les Switch et les pièces mobiles de l'unité de LECTURE, commençons par examiner sur la Fig.31 l'agencement de la structure en potence immobilisée sur le STATIF. Ce dessin est totalement analogue à celui de la Fig.18 de la page 14, sur laquelle on a ajouté de nouveaux éléments. On retrouve les deux montants verticaux **2** et **12** avec leurs jambes de force **1** et **13**, supportant la traverse supérieure **13**. En **10**

Structure en potence immobile de la machine.

Fig.31

**Étrier
supportant
le Barillet**

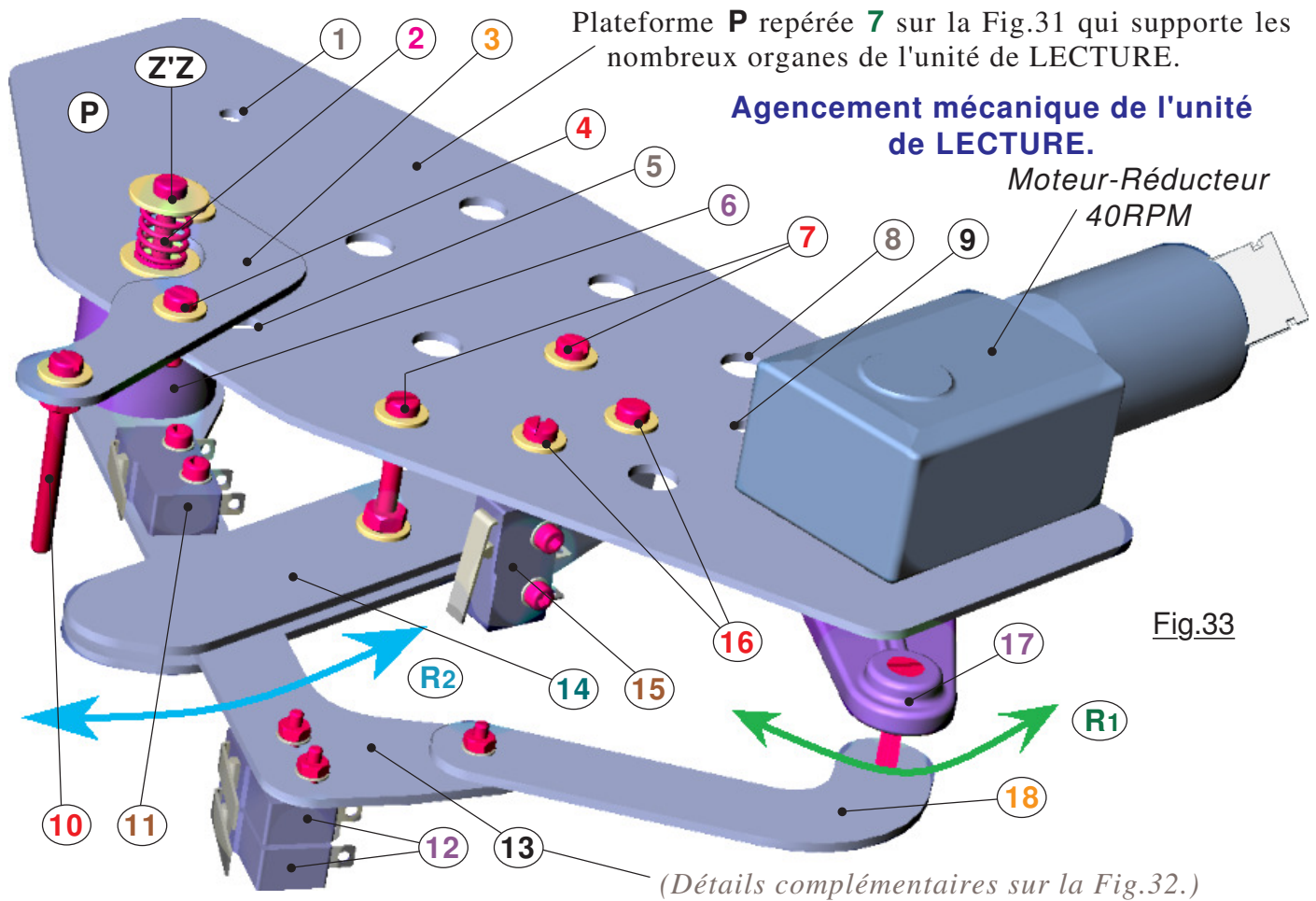
Plateforme 7

Fig. 32

Proposé en vue de dessus, le dessin de détails de la Fig.32 présente le dispositif qui permet d'ajuster finement la position de la butée **F** qui active le Switch **G** de détection de la configuration "**B**" du BIT en cours de LECTURE. Ce petit dessin permet d'illustrer en grand l'une des zones critiques de la Fig.32 donnée en page 22. Le capteur **G** est immobilisé sur le levier oscillant **H** articulé en **X'X**, l'axe vertical étant ici colorié en gris. Lorsque le boulon **B** est libéré, le support coudé **C** peut tourner autour de la vis servant alors de pivot. Un deuxième boulon de liaison **E** (*Qui doit aussi être desserré.*) limite l'amplitude de l'ajustement en position précise de **F**. C'est le corps de la vis **E** qui se déplace dans la lumière **D** pratiquée sur **A** qui limite le positionnement. C'est le fait d'avoir éloigné l'axe de rotation **B** qui procure une amplitude d'ajustement largement suffisante. Cet éloignement impose la forme coudée de **C** pour contourner l'axe **X'X**. Quand **F** est parfaitement positionné, on serre les deux boulons **B** et **E** pour assurer une liaison complète de la poutre **C** sur la plateforme **A**.

Page 21

M ontré en Fig.33 le cœur du module de LECTURE est agencé cinématiquement avec un système Bielle / Manivelle pour animer le mouvement du levier **13** qui supporte les détecteurs de LECTURE. (*Sans un système Bielle / Manivelle un ensemble aussi complexe qu'il soit n'est pas vraiment une machine : Citation d'un certain Nulentout en 2022.*) Pour rappel, la plateforme **P** est immobilisée sur l'équerre du montant vertical en **1** et sur l'axe central du Carrousel en **9**. Les nombreux orifices tels que celui repéré en **8** servent à laisser passer les fils électriques du dessous vers le dessus. Le levier coudé **13** animé d'une rotation pendulaire supporte le capteur pour "**B**" en **11** et les deux Switch pour "**0**" et "**1**" en **12**. La palette de celui du haut détectant le "**1**" dépasse légèrement de celle du "**0**" pour cliquer avant ce dernier si le pion est poussé vers le haut. Si le BIT en cours de lecture est rétracté en configuration "**B**" le Switch **11** va cliquer sur la butée verticale **10** solidaire du levier coudé **3**. Pour effectuer une lecture le moteur fait tourner la manivelle **17** pour que la rotation **R1** se fasse vers l'extérieur. La bielle coudée **18** à son tour pousse sur le levier



oscillant **13**, dans la rotation **R2** toujours effectuée vers l'extérieur. Dès que l'une quelconque des trois configurations "**B**", "**0**" ou "**1**" est détectée, le moteur-réducteur inverse son sens de rotation. La chaîne cinématique **17**, **18** et **13** rétracte alors le mécanisme vers l'intérieur, jusqu'à ce que le Switch **15** détecte le dégagement complet de l'ensemble. Dans la pratique l'équerre qui supporte **15** immobilisée par les deux boulons **16** dépasse nettement plus de **P** vers l'avant de la machine pour diminuer la course de **13** et ainsi réduire le plus possible le temps nécessaire à une LECTURE, opération dans un cycle d'HORLOGE la plus fréquente puisque effectuée systématiquement à chaque instruction. Le levier oscillant **13** qui supporte les trois capteurs est articulé en rotation autour de la longue vis verticale qui matérialise l'axe **Z'Z**. La distance verticale qui sépare **13** de **P** est obtenue au moyen de l'entretoise "volumineuse" **6** moulée en 3D. Le jeu axial de cette liaison pivot est annulé par le ressort de compression **2**. Pour que le déplacement plan sur plan de **13** soit parfaitement horizontal, deux glissières rigides **14** sont immobilisées sur la structure par les boulons **7**. Le jeu vertical entre ces deux poutres est faible et garanti un mouvement précis de **13** dans l'espace, condition indispensable à satisfaire pour obtenir un fonctionnement fiable de l'unité de LECTURE.

Après avoir appris à lire ... passons à l'étude de l'ÉCRITURE.

16) Conception mécanique de la fonction ÉCRITURE.

Chronologiquement cette action suit immédiatement la LECTURE dans le cycle d'HORLOGE à condition toutefois qu'elle soit programmée dans le feuille perforée. La difficulté de conception réside dans le minimum de place disponible sur la machine, la faculté de dégager suffisamment pour assurer le libre passage des capteurs de LECTURE et des nombreux pions du barillet. Une fourche saisissant la pige à ses deux extrémités et assurant les trois positions "B", "0" ou "1" avait été envisagée, car un seul moteur aurait été nécessaire. Le schéma électrotechnique aurait également été "divisé par deux". Toutefois, cette architecture séduisante a été abandonnée car elle aboutissait à un volume trop important de l'ensemble. Aussi, la fonction ÉCRITURE a été construite à l'aide de deux unités indépendantes, qui toutefois sont sollicitées simultanément lors de l'écriture d'un "0".

➤ Le royaume des cames.

Développer un projet aussi "dense" que celui-ci prend des mois, voir des années. Sur d'aussi longues périodes, il est presque impossible d'adopter une ligne de conduite continue, et forcément, parfois on change de stratégie. Initialement, j'avais envisagé de mélanger et rédiger de front l'aspect mécanique et l'aspect électrique. Puis la raison m'a poussé à scinder les deux approches dans des documents différents. Ce changement est arrivé ... un peu tard, et la description mécanique des unités d'ÉCRITURE se trouve dans le chapitre 03) *Schéma électrotechnique de la fonction ÉCRITURE* du fichier *Présentation électrique 1.pdf* en page 12. Par ailleurs, au cours des semaines de développement d'autres pierres d'achoppement sont venu bousculer les belles solutions imaginées en virtuel sur l'ordinateur. Aussi, toujours concernant l'aspect mécanique de l'unité d'ÉCRITURE je vous invite fortement à consulter également le chapitre 09) *Remise en cause fondamentale du mécanisme d'écriture* proposé pour sa part en page 31. Enlever ces deux chapitres pour les insérer ici n'est plus faisable, car l'intégralité de la pagination et des repères des figures serait à mettre à jour, y compris pour le document *Présentation électrique 2.pdf*. Aussi, bien que ce ne soit pas très élégant, vous voudrez bien me pardonner, de conserver en l'état cette double verrue.

NOTE : *Non précisé dans les chapitres cités, la came n'agit pas directement sur les pions pour des raisons de longévité. Sa rotation rapide engendre un frottement notable, origine d'une usure. Pour éliminer ce phénomène, les palettes ont été ajoutées au mécanisme.*

➤ Le royaume de l'impression 3D.

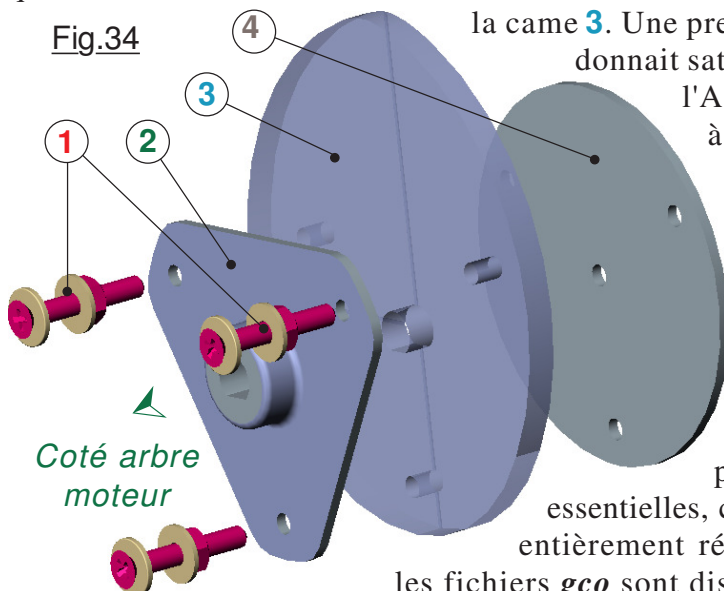
Initialement, les cames envisagées 3 étaient plates et usinées dans de l'Altuglas de 4mm d'épaisseur. L'éclaté de la Fig.34 montre comment cette came 3 était immobilisée en sandwich entre le flaque 2 et la contre-plaque 4, le tout serré par les trois boulons ϕ M3 repérés 1. Le manchon 2 s'insère directement sur l'arbre moteur dont le couple de torsion est transmis par le méplat. Ce manchon est moulé sur une imprimante 3D et immobilisé sur l'arbre moteur par une longue vis ϕ M3 qui traverse l'ensemble. Ce sont les trois boulons 1 qui à leur tour appliquent le couple moteur sur

la came 3. Une première unité a ainsi été réalisée sur ce principe et donnait satisfaction lors des essais de validation. Toutefois,

l'Altuglas est un matériau particulièrement délicat à usiner comme précisé en partie dans l'encadré spécifique du document de réalisation de la machine. Il s'avère extrêmement indigeste d'élaborer avec rigueur le profil périphérique d'une telle pièce. Et surtout, comme on le constate sur les photographies de réalisation de la MATRICE, de nombreuses microfissures apparaissent sur le pourtour de la came 3. Aussi, ces minuscules fentes n'étant pas du tout propices à une bonne fiabilité de ces pièces

essentiels, cette solution a été abandonnée au profit de cames entièrement réalisées sur imprimante 3D, dont naturellement

les fichiers *gco* sont disponibles dans le répertoire dédié. **Page 23**



17) Le plan d'occupation des sols.

S'il est un domaine pour lequel toute erreur ou oubli sont interdits, c'est bien celui de l'aménagement du STATIF de la machine. L'étude est particulièrement délicate, car il faut implanter tous les petits compléments qui s'ajoutent à la structure principale. Non seulement il faut prévoir les emplacements pour des dispositifs comme le réceptacle de la Clef de sécurité avec son capteur, le clavier du Répétiteur, les divers circuits imprimés qui seront sur la bâti de la machine, mais également les connecteurs de type DB25, DB15 reliant les différentes unités indépendantes les unes aux autres, sans oublier le bloc d'alimentation secteur etc. De plus, il importe aussi de définir comment vont "circuler" les torons de fils, certains sur le dessus, d'autres sur le dessous. Enfin il faut également prévoir sur le dessous des moyens de plaquer vers le haut tout ce qui sera relatif au câblage. Il faut bien se dire que lorsque la machine sera entièrement assemblée, si l'on a oublié un connecteur, un pontet de maintien des fils etc, il sera pratiquement impossible de percer de nouveaux trous. Bref, il faut IMPÉRATIVEMENT penser à tout et ne strictement rien oublier.

➤ Un peu de stratégie.

Deux approches sont envisageables. La première consiste à effectuer une étude particulièrement attentive qui va englober facilement huit à dix heures pour déterminer avec précision tous les ajouts nécessaires et leur implantation. *(Avec de toute façon le risque d'oublier des éléments.)* La deuxième consiste à prendre un stylo feutre, et sur le plateau de la machine tracer des emplacements pour loger cinq à six fois plus d'éléments qu'il n'en faudra lors de l'intégration des systèmes. Prévoir une multitude exagérée de connecteurs de type DB25, DB15. En loger également sur certains montants de la structure. Percer ensuite sur les surfaces encore non utilisées une foultitude d'orifices et de lumières pour pouvoir faire transiter des faisceaux de fils du dessus vers le dessous et réciproquement. Enfin quand on a prévu les emplacements pour les circuits imprimés actuels plus un ou deux "pour le cas où", percer un peu partout et à profusion des trous de ϕ M3 pour pouvoir fixer des pontets d'attache des fils etc. Tous ces éléments surabondants sont prévus lorsque les éléments principaux sont déjà affectés dans des zones stratégiques. *(Bloc secteur, logement pour la clef...)*

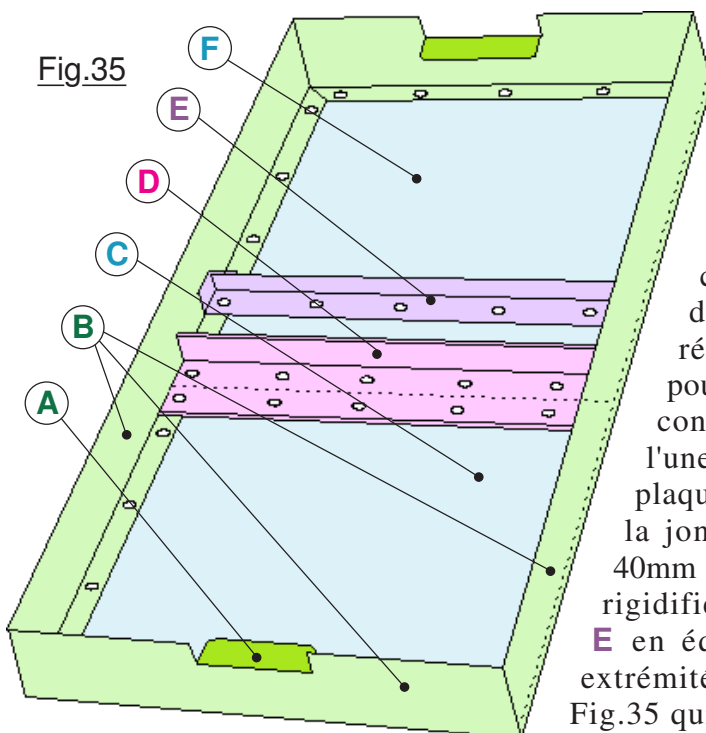
Finalement c'est la deuxième approche qui semble la moins rationnelle qui a été adoptée, car ce projet a pris des mois pour son développement, et l'on approche de l'hiver. À l'atelier la température commence à baisser, et je désirais absolument terminer entièrement "la mécanique" avant qu'il ne fasse trop froid. Déjà en ce moment, c'est à dire fin Octobre, les outils sont "polaires" le matin et je dois attendre au moins 10H avant d'aller me geler les pieds !

Cette décision c'est avérée très judicieuse, car avec une perceuse à colonne réaliser une multitude de trous est rapide, quand aux lumières rectangulaires terminées "à la main", avec un peu d'habitude ce n'est pas du tout la mer à boire. En une journée de huit heures "à bride abattue" l'intégralité du

châssis était terminée. Avec bénéfice "collatéral" une souplesse maximale par la suite pour disposer les éléments au mieux, voir en ajouter si la machine bénéficiait d'évolutions ultérieures.

Constitué de profilés et de deux plaques en Duralumin **C** et **F**, le STATIF mesure 720mm de longueur et 300mm de largeur, conditionnée par les dimensions des deux plaques d'aluminium. Quand à la hauteur de 40mm, elle résulte des profilés **B** en L de 40mm x 15mm utilisés pour faire l'encadrement. Le dessus du châssis est donc constitué de deux plaques de 400mm x 400mm dont l'une, **C** est réduite à 320mm de longueur. Ces deux plaques disposées sur le dessus sont l'une contre l'autre, la jonction étant renforcée par un profilé **D** en L de 40mm x 15mm. Le centre du STATIF est quand à lui rigidifié dans le sens de la largeur par un dernier profilé **E** en équerre de 30 x 15mm. On retrouve aux deux extrémités les poignées **A** sur le dessin simplifié de la Fig.35 qui montre le châssis vu par dessous.

Fig.35



Il n'est pas inutile d'en ajouter des lignes et des lignes pour décrire le châssis. Le fichier [Réaliser.pdf](#) est bourré d'informations relatives au STATIF avec un nombre considérable de figures. Ce fichier est en outre particulièrement bien complété par les très nombreuses photographies commentées et préservées dans la [<Galerie d'IMAGES>](#) qui accompagne ce didacticiel. Il est évident que la description proposée dans mes documents techniques est directement tributaire des profilés en Duralumin que j'ai approvisionné dans un magasin de bricolage local. Mais vous ne devriez pas, à mon sens, avoir de réelles difficultés à trouver des équivalents très proches. Par ailleurs dans [ACHATS.pdf](#) figurent les références pour approvisionner les plaques d'aluminium indispensables.

18) 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 Machine de Turing n'échappe pas à ce principe non démontré mais qui frise l'absolu, et il est évident qu'avec l'expérience acquise, une nouvelle réalisation serait bien différente en termes de simplicité et de fiabilité. Les marges d'ajustement des éléments critiques seraient plus souples, la connectique repensée, regrouper des circuits imprimés etc.

Il a fallu composer avec les réalités matérielles, et l'on peut noter un certain nombre de "regrets" :

- Initialement j'ai commandé des moteurs à 30RPM et à 40RPM ne sachant pas lesquels seraient utilisables. L'expérience a montré que 40RPM est préférable pour tous les modules car augmente la rapidité d'un cycle machine. Donc si c'était à refaire je n'utiliserais que des 40RPM et dans un descriptif je ne mentionnerai que ces derniers. Ma machine sera un peu plus lente que la votre !
- Enfin, sachez que malgré mes faiblesses notoires en orthographe et en syntaxe, je suis un fervent amoureux de notre magnifique langue. Rien ne m'agace plus dans les médias que cette maladie du "franglais" qui pollue en permanence les émissions de radio ou de télévision. Et bien je finis par être intoxiqué par ce fléau. Vous n'avez pas remarqué ? Mais si, regardez-bien ... j'ai dans ce long descriptif utilisé des "atrocités" comme Switch, ne pouvant pas vraiment les éliminer. Dommage !

Peu importe ces petites tracasseries. Ne boudons pas pour autant notre plaisir. La mécanique chatouilleuse est bien vivante et la voir se trémousser avec nervosité 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 notre petit ordinateur d'une autre époque, les invités sont toujours séduits et ravis. C'est du reste pour ces observateurs occasionnels, que j'ai prévu des programmes éloignés du codage Binaire, de la LOGIQUE booléenne ou de calculs un peu laborieux. Ainsi sont prévus des algorithmes dont on comprend facilement la finalité et ce qu'ils doivent produire sur les nombreuses pages du plateau tournant.

Tout compte fait, les humains ne sont que de grands enfants qui ne demandent qu'à s'émerveiller, et parfois il suffit de si peu de chose ...

Chères lectrices, chers lecteurs, cette (trop) longue saga arrive à son terme. Tout à une fin, mis à part l'Univers, et arrive forcément un moment où il faut raisonnablement considérer que "le travail" est terminé.

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