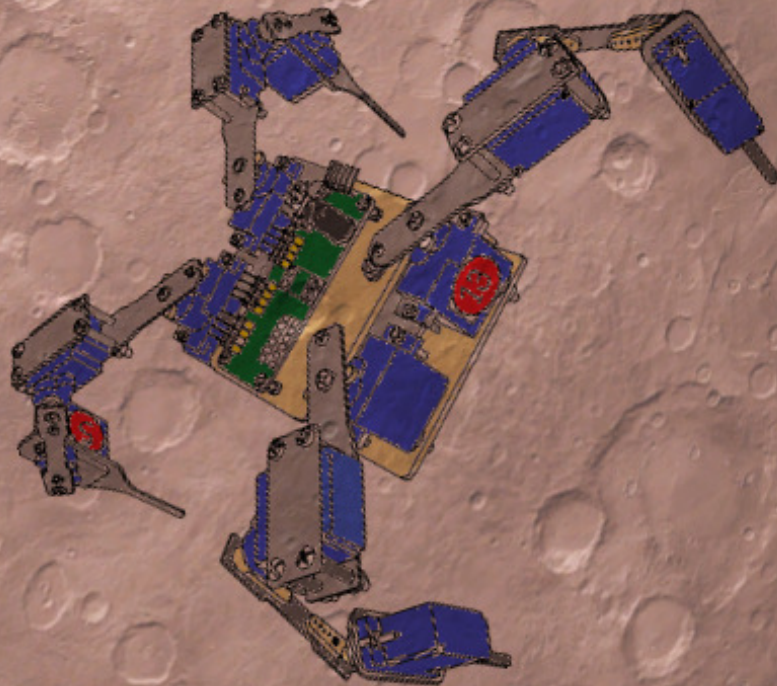


# Sonde martienne JEKERT La génèse Électronique et Mécanique

## TOME 1



Landing Site



Par Nuléntout : Samedi 29 Juillet 2017.

# Développement du projet Sonde martienne JEKERT

**E**mbauché comme ingénieur tous systèmes à la NDRMSE, (*National Développement Robot Maker Spatial Enterprise*) c'est avec une certaine appréhension que vous présentez votre badge rouge au lecteur optique. Rouge car il vous donne plein accès à l'intégralité des services de l'entreprise et aux dossiers les plus secrets. Sur vos épaules reposent la responsabilité du projet JEKERT, une sonde martienne qui sera envoyée par un lanceur Ariane fin décembre 2019. Vous ne disposez que de deux ans pour finaliser les études, l'assemblage et les vérifications de la sonde scientifique car la fenêtre de tir n'est que de dix jours. Ensuite, il faudra attendre pratiquement une année avant d'avoir une nouvelle opportunité de lancement. Autant dire que l'échec n'est pas une option. (*Deux ans, c'est pour le fun, pour créer l'ambiance, car franchement si on en met le double ou le triple, on s'en tamponne le coquillard avec un marteau à bomber les vitres !*)

Bon, il faut y aller, le planning est pour le moins chargé, il n'y a pas de temps à perdre. Vous approchez vos yeux du scanner rétinien qui d'une voix métallique approuve votre habilitation de niveau cinq. La grosse lampe verte s'allume alors que la lourde porte métallique s'ébranle. Les battements de votre cœur battent un record. Admirant le panorama technique fantastique qui se découvre progressivement, vous avancez d'un pas presque hésitant. C'est à partir de cet instant que vous devrez utiliser la formation solide acquise à la RMSI, (*Robot Maker School Institution*) elle sera votre meilleure alliée, car les problèmes vont être nombreux, les pièges innombrables.

## 01) Optique avec laquelle on abordera ce tutoriel :

**N'**oublions pas que nous sommes dans un contexte de loisir. La priorité "rouge", c'est de se faire plaisir sans se prendre la tête. La logique impose alors une approche la plus simple possible, sans se prendre la tête. On va sur <http://www.robot-maker.com/forum/topic/10544-kit-robot-quadrupede-teste-par-jekert/http://www.robot-maker.com/forum/topic/10544-kit-robot-quadrupede-teste-par-jekert/> on bave d'envie, on approvisionne les composants, on assemble en tenant compte des conseils et de l'expérience de notre Ami **Jekert**, on téléporte un programme disponible en ligne et ... c'est l'extase à voir se trémousser avec hésitations notre gros insecte. C'est à mon sens la façon presque la plus raisonnable de s'y prendre, car on est ici pour se détendre et s'amuser. Au passage, je tiens à signaler que *c'est le sujet de Jekert* dont le lien est donné ci-dessus *qui m'a donné envie de réaliser un tel robot. Je tiens vivement à le remercier au nom de vous tous, car c'est à lui que revient la paternité de ce tutoriel et le mérite de l'avoir initié.*

**A**yant assouvi la boulimie robotique initiale, il est possible que certains d'entre vous désirent maintenant en faire un champ d'investigations plus large. Tout reprendre à zéro pas à pas, avec rigueur, et mener une étude la plus exhaustive possible. Explorer scientifiquement et techniquement l'éventail le plus large envisageable. Naturellement, restons modestes. Cette approche sera obligatoirement limitée par nos compétences d'amateurs. C'est la philosophie qui ici présente de l'intérêt, pour le reste nous ferons pour le mieux. Pour faire court, dans cette "étude" nous abordons le complément strictement inverse de l'approche ludique. Nous tenterons d'analyser le plus d'éléments possibles, pour avoir la sensation **totalelement illusoire** de dominer notre sujet. Bref, c'est la prise de tête assurée, les migraines probables, les insomnies fidèles. (*Mais non, pas de panique, c'est pour le fun. Je tenterai de vous faciliter totalement les manipulations et fournirai tous les programmes qui auront participé à ce petit projet qui doit rester alléchant. Restons ZEN !*) Grosse différence par rapport à l'approche "dilettante" : **On considèrera que les enjeux économiques de nos erreurs sont considérables**. Un moteur réducteur détruit par accident c'est une petite fortune qui part en fumée. Alors dans ce contexte spatial à "haut risque", la rigueur sera au sommet de la hiérarchie. Plus question d'improviser ...



## 02) 04/09/2017 : Réception, et validation de la motorisation. (MJD 58000)

**I**mpressionné par la haute technologie qui nous environne en salle S3, nous avançons d'un pas ferme pour ne pas que les techniciens qui s'affèrent un peu partout ne s'aperçoivent de notre émois. La grande porte blindée vient de se refermer. Une hôtesse d'accueil vient gentiment nous souhaiter la bienvenue et nous fait visiter tous les locaux. Nos jambes sont un peu Chamalo, car l'environnement en impose quel que soit le service dans lequel on se trouve. Finalement l'impression de lourdeur s'estompe, car si l'intégralité du projet reste sous notre responsabilité, face à toutes ces machineries de rêve, on s'enlise forcément dans l'envie de les mettre à contribution.

Notre bureau est à la taille du projet, les dossiers encombrant toutes les étagères disponibles. Celui qui est ouvert sur le plateau traite des études de faisabilité. Par réflexe on "diagonalise" les premières pages. On note par exemple que la locomotion sur pattes est de loin la plus délicate à mettre au point, et parmi les plus lentes potentiellement. *Si cette solution a été retenue, c'est que le site sur lequel va se poser JEKERT présente une surface en "escaliers" impropre aux locomotions sur roues habituelles.* Il faut faire avec ... Le seul espace encore disponible sur les quatre murs est celui du tableau pour le planning d'avancement des travaux. Il s'arrête à décembre 2019 !

Pour ce jour, nous devons tester intégralement les moteurs du robot martien, en mesurer les caractéristiques, et les valider s'ils respectent le cahier des charges fonctionnel. Avant de pénétrer dans les secrets de l'entreprise, le PDG nous a chaleureusement accueillis, mais il n'a pas oublié de nous rappeler que toute dégradation d'un seul de ces moteur représenterait notre salaire d'ingénieur en chef responsable du projet sur trois ans ... alors prudence.

**R**égulièrement, il me semblera indispensable de justifier certains choix techniques ou de narration. Pour ce faire et ne pas encombrer les divers développements, ces parenthèses seront situées en fin de chapitre et présentées de couleur violette. Par exemple, c'est pour créer l'ambiance qu'une date précède le début de chaque chapitre. Ainsi le propos ressemble au respect d'un planning rigoureux, avec une échéance critique à ne pas dépasser.

**P**ourquoi imaginer qu'il s'agit d'une sonde scientifique et non d'un insecte mécanique ? Bien que légèrement abordé dans ce qui précède, il n'y a pas que la motivation d'approche avec une rigueur maximale qui justifie ce choix. Le spatial fait rêver. Surtout, une sonde d'exploration devra adopter des "postures" qui n'ont rien à voir avec celles d'un insecte. Par exemple rétraction pour tenir le minimum de place dans la coiffe du lanceur etc. Par ailleurs, les modes de déplacement de l'appareil sont morphologiquement spécifiques. Enfin, rien ne prouve que ce sera possible au point de vue matériel, mais à ce stade du "délire", j'envisage de munir JEKERT de deux ou trois pseudo expériences scientifiques embarquées. À ce stade du projet, la faisabilité de ce désir n'a pas été analysée. Ce ne sera peut être pas possible, mais *le plus important quoi qu'on en dise, c'est de rêver.* Vous avez compris qu'une soi-disant sonde d'exploration pour Mars ouvre un éventail de pistes de recherche absolument fabuleux ...

### ➤ La traçabilité, l'individualisation.

**C**ompte tenu des coûts faramineux de tout ce qui touche au spatial, il a été décidé d'utiliser l'ordinateur de bord de la sonde pour conduire l'intégralité des essais qui vont jalonner le développement. Outre le gain économique, on bénéficiera ainsi d'une expérience salubre au moment d'agencer le programme qui sera retenu pour le cerveau de JEKERT. Par ailleurs, ces nombreuses sollicitations du calculateur permettront d'en valider sa fiabilité. Quand on pénètre dans la salle 23, les deux techniciens présents ont déjà intégralement déballé les moteurs. Dans ce type d'activités, la **traçabilité** revêt une importance capitale. Aussi, comme je peux le constater sur la Fig.1 en **X** chaque moteur est muni d'un repérage individuel

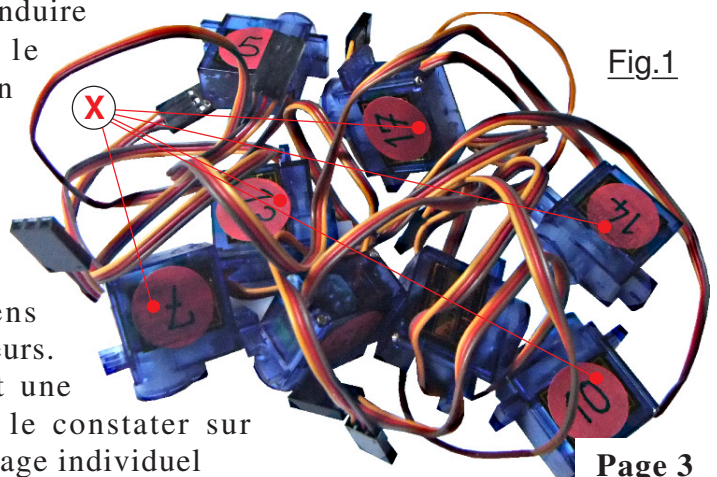


Fig.1

qui l'identifiera sur sa fiche personnelle. Chaque échantillon étant repéré avec précision et de façon unique, il devient possible d'en caractériser finement les performances.

### ► Le banc d'essai de la motorisation.

Conformément au schéma assez élémentaire de la Fig.2 ils ont effectué les branchements du banc d'essai et logé dans le ordinateur le programme **P01\_Commande\_Servo\_par\_Angles.ino** prévu pour cette phase d'études. Ce montage très simple appelle toutefois quelques commentaires. La minuscule carte Arduino Uno est alimentée par la ligne USB du P.C. sur lequel on a invoqué l'**IDE** et surtout son **Moniteur série** disponible dans l'onglet **Outils**. Le dialogue s'établit par la **ligne série colorée en vert**. C'est cette ligne USB qui alimente en **+5Vcc** la carte électronique. Disponible sur les picots de NANO Arduino on récupère **GND** et **+5Vcc** pour brancher le potentiomètre **P** qui permet d'appliquer sur l'entrée analogique **A5** une tension variable. Le petit programme d'évaluation envoie sur **D10** utilisée en PWM les consignes au servomoteur SG90. (Ce petit programme est abondamment commenté pour que vous puissiez en comprendre l'agencement.) Simultanément, il transmet sur la ligne série **3** la valeur de la consigne angulaire envoyée au moteur et exprimée en degrés. Notez que l'alimentation en 5Vcc des moteurs est réalisée à partir d'un petit bloc secteur.

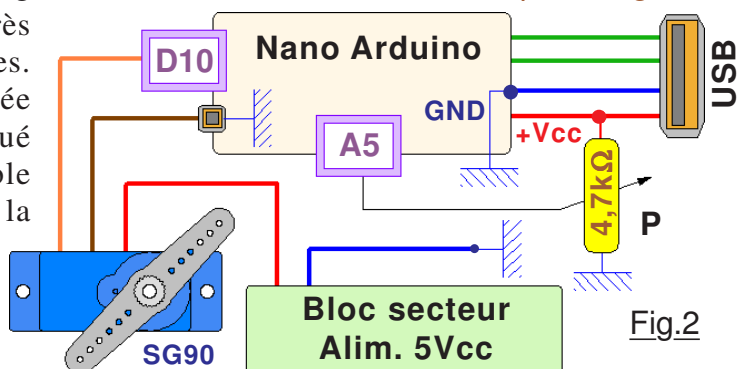


Fig.2

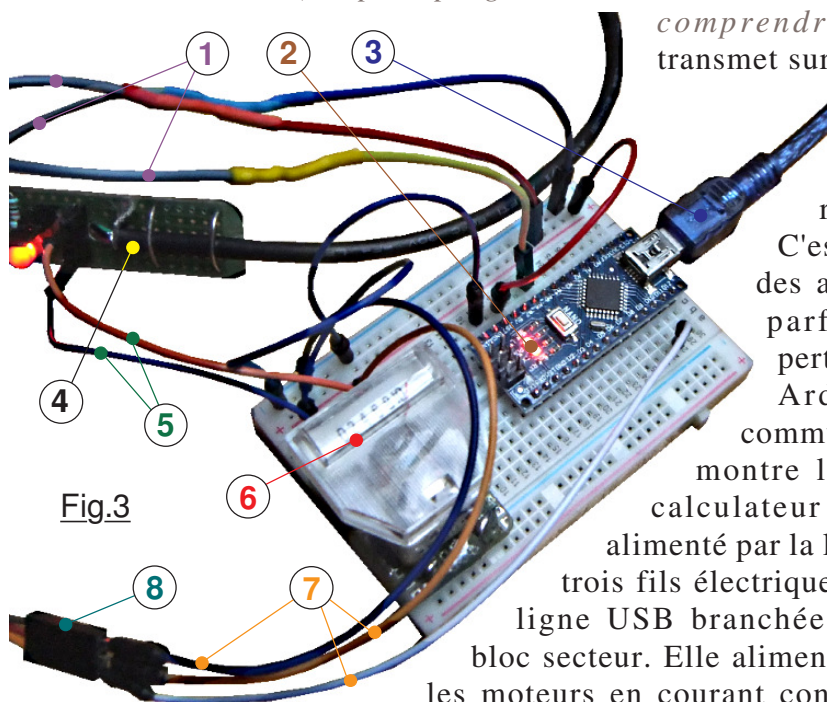


Fig.3

La Fig.3 montre le banc d'essai avec en **2** le puissant ordinateur qui sera embarqué dans JEKERT et alimenté par la ligne série USB en **3**. En **1** se trouvent les trois fils électriques qui vont vers **P**. En **4** on observe une ligne USB branchée sur le bloc secteur. Elle alimente en **5** les moteurs en courant continu, la tension étant contrôlée en **6** par un tout petit voltmètre. En **7** les liaisons vers les trois fils **8** de pilotage des moteurs SG90. Pour **P** vous pouvez utiliser n'importe quelle valeur entre 1kΩ et 47kΩ. Sur la Fig.4 qui réutilise certains repères de la précédente, on voit en **12** le potentiomètre qui se

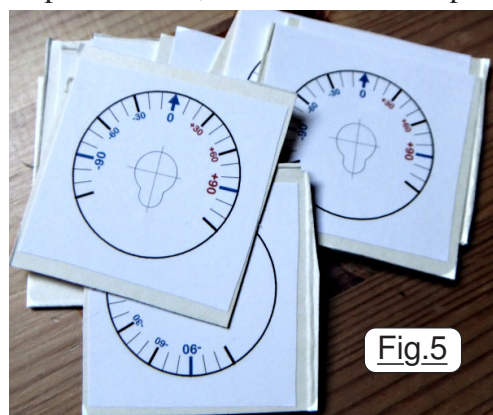


Fig.5

trouve sur une plaque d'essais qui en compte quatre. Pas très visible se trouve en **9** le moteur muni d'un palonnier **10** sur lequel on a tracé un trait de repérage en rouge. Enfin en **11** est engagé sur le corps du moteur un disque de carton qui permet de repérer les rotations entre  $\pm 120^\circ$ . Pour la circonstance, une "tripotée" de petits cartons

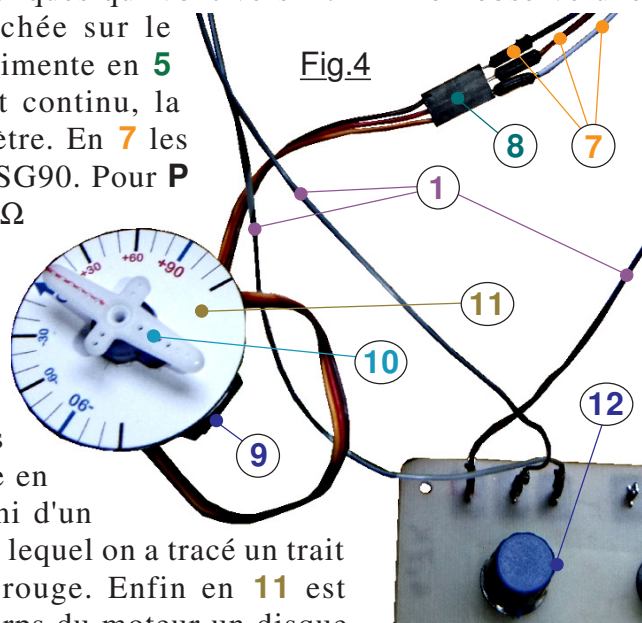


Fig.4

tels que ceux de la Fig.5 ont été réalisés pour pouvoir "calibrer" les moteurs. Pour conduire l'expérience actuelle un seul est nécessaire. Avant d'aller plus avant dans nos manipulations, il faut ouvrir un chapitre relatif à la visionneuse qui vous permettra d'imprimer à votre guise les divers dessins dont vous pouvez avoir besoin, et en particulier les disques gradués de la Fig.5 que vous collerez sur du carton pas trop épais mais de type rigide.

### ➤ La visionneuse pour imprimer des documents.

**P**ratiquement l'intégralité des dessins comme les schémas du type de ceux de la Fig.2 ou le "détourage" des photographies, sont réalisés avec un petit programme nommé **SPLAN60.EXE**. Petit par son prix d'achat, c'est un progiciel absolument fabuleux. *Vous fournir tous les dessins tracés à l'échelle*, ainsi que les divers éléments à imprimer tels que les disques gradués *est indispensable*. Il se trouve que le programme pour dessiner est livré avec une *visionneuse* logicielle **SPLAN-VIEWER.EXE** que l'on peut diffuser librement. Elle ne permet pas de modifier les documents, mais vous pouvez les consulter en libre service et les imprimer. Je vous livre donc ce petit programme et le problème est résolu. Il vous sera ainsi facile d'imprimer les dessins exécutés à l'échelle, de découper les pièces et ainsi de pouvoir conduire à votre guise les études morphologiques dont il sera question plus loin. Dans le répertoire du tutoriel vous trouverez un dossier nommé **<LES PLANS>** dans lequel sont préservés les divers dessins générés par **SPLAN60.EXE** ainsi que la *visionneuse*. Le fichier des dessins est nommé **Sonde Jekert.spl**.

### ➤ Caractéristiques individuelles des moteurs de Jekert.

**I**l n'est pas inutile de se perdre dans un long discours pour faire la différence entre théorie et réalité. Une production matérielle n'a pas pour ADN des mathématiques pour lesquelles on manipule des valeurs absolues. Toute création humaine sera entachée de dispersions de caractéristiques, et ce d'autant plus que le processus n'est qu'approximativement dominé. Avec les motorisations SG90 nous mettons le pied dans de la production en grande série de type "grand public". Compte tenu des

Fig.6 Moteur	Angles réels							Inst.
	-90	-60	-30	0	+30	+60	+90	
n°1	-86	-59	-28	3 ou 4	+31	+59	+77 84°	78
n°2	-89	-61	-33	0	+27	+56	+79 87°	79
n°3	-89 -86°	-65	-34	-3	+25	+52	+74	76
n°4	-89	-60	-32	0	+27	+55	+77	78
n°5	-89 -83°	-68	-37	-4	+23	+50	+72	74
n°6	-89	-65	-37	-3	+21	+48	+67 85°	68
n°7	-89	-62	-32	0	+28	+55	+77	81
n°8	-84	-57	-29	6	+34	+60	+81 ou +82	84
n°9	-89 -85°	-67	-37	-5	+24	+51	+74	80
n°10	-78	-52	-25	3	+32	+56	+78	81
n°11	-89	-62	-30	0	+28	+56	+74	75
n°12	-89	-61	-30	0	+27	+53	+74	76
n°13	-80	-56	-28	-1	+28	+52	+73	78
n°14	-80	-52	-23	8	+34	+60	+79 85°	80
n°15	-82	-54	-26	4	+33	+58	+77 86°	79
n°16	-89 -88°	-65	-35	-5	+22	+47	+70	72
n°17	-77	-54	-27	2	+30	+54	+76	81
n°18	-86	-62	-34	-3	+25	+50	+72	80

prix d'achat auxquels on peut se les procurer par paquets de dix, on se doute que leur réalisation n'est pas d'une précision phénoménale. Il ne s'agit pas ici de critiquer, mais uniquement d'aborder objectivement ce contexte pour en tirer le meilleur parti. Le tableau de la Fig.6 résume



les valeurs obtenues sur le banc d'essai. Dans l'encadré vert sont portées les valeurs correspondant aux angles de rotation effectifs. Dans le corps du tableau, en bleu, en noir et en rouge les valeurs de consigne envoyées aux servomoteurs pour obtenir les déviations caractéristiques. Si une donnée est doublée avec l'une des valeurs en gris, la couleur bleue ou rouge correspond à la consigne, alors que l'entité en gris représente l'angle de rotation réel correspondant. (*Différente de celle du cadre vert.*)

**P**articulièrement importante est la colonne colorée en orange qui correspond à une **Instabilité**. À partir de cette valeur de consigne angulaire, le moteur se met à tourner sans fin en continu. Cet aléas ne devra jamais se produire, car soit la mécanique ira en butée et les moteurs seront forcés hors de leurs charge autorisée, soit les fils électriques de liaison des organes de la partie mobile s'enrouleront avec toutes les conséquences que l'on peut imaginer. **Il importera de traiter par programme la gestion des consignes pour ne jamais risquer d'aboutir à ces valeurs critiques.** Le tableau de la Fig.6 nous permettra également d'apparier les moteurs en fonction des articulations. (*Apparier vient de "mettre à part", c'est à dire regrouper par catégories semblables.*) Nous disposons ainsi de valeurs pertinentes qui seront bien utiles en cours de développement du projet.

### ➤ Le respect du cahier des charges.

**G**lobalement, les valeurs obtenues lors des essais classent les moteurs dans la catégorie "acceptables". Tout au plus nous sélectionnerons les douze qui seront les plus aisés à mettre en œuvre. Toutefois, avant de valider la conformité des spécimens reçus, il faut encore en vérifier le respect du couple fourni. La plaque signalétique visible en Fig.7 précise que le couple nominal est de **1,2Kg cm**. Nous allons vérifier cette caractéristique importante puisqu'il s'agit des efforts que devront être capable de développer les SG90.

Un couple, (*Les physiciens parlent de moment de force.*) résulte du produit d'une force, (*Les physiciens parlent d'action mécanique.*) par la distance qui la sépare de l'axe de rotation. Bien que normalement cette entité (*Qui traduit la "force en tournant".*) devrait être exprimée en Mètres Newton. Ceci étant précisé, nous accepterons les **Kg Cm** utilisés à tort dans le monde des petits servomoteurs. Si l'on s'en tient à ce qu'annonce la plaque signalétique, à **1cm** de distance de l'axe de rotation, ce que l'on nomme parfois

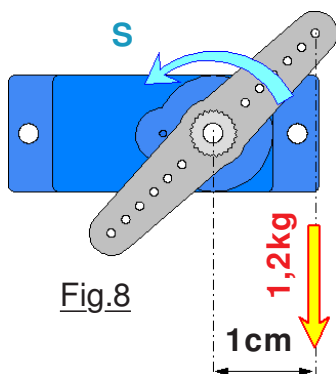


Fig.8

"le bras de levier", le SG90 doit pouvoir soulever et faire tourner dans le sens **S** une masse de **1,2kg** soumise au champs de la pesanteur.

**P**our ne pas soumettre le palier **A** de sortie du moteur à une telle charge, on peut à l'image de la Fig.9 lui faire bouger une masse de 0,2kg qui sera placée à 6cm ce qui revient au même en terme de moment de force. ( $6 \times 0,2 = 1,2\text{Kg cm}$ ) Pour effectuer cette manipulation, la petite poutre orange de la Fig.9 a été réalisée, avec toutefois des orifices à 5cm et 4cm pour pouvoir s'il le faut diminuer le bras de levier.

Machine alimentée sous

5Vcc les essais sont conduit sur le dispositif montré sur la Fig.10 le moteur étant bridé par le **serre-joint** en porte à faux sur une **planche** horizontale. Le poids de balance de **200g** est suspendu par le petit fil électrique de cuivre **F**. On constate durant ces mesures que le moteur est loin de présenter les caractéristiques annoncées. Pour arriver à soulever la charge dans le sens **S**, il ne faut pas dépasser comme bras de levier 26mm soit **2,6cm**. Donc, sous 5V alimentation le couple maximal possible sera de :

$$C_{\text{MAX}} = 2,6 \times 0,2 = 0,52 \text{ Km cm.}$$

Nous sommes à peine à 44% de la performance supposée. Vu le prix de vente des moteurs, nous n'allons pas en faire un scandale. **En revanche, lors des études morphologiques il faudra impérativement en tenir compte.**

#### Servomoteur SG90.

- Tension d'alimentation : 4.8v à 6v.
- Vitesse : 0.12 s / 60° sous 4.8v.
- Couple : 1.2 Kg cm sous 4.8v.
- Amplitude : de 0 à 180°. Fig.7



Fig.9

### ➤ Notion de martyr dans les projets industriels.

Il n'évitablement, certains essais vont soumettre les échantillons en essai à des tortures électroniques, mécaniques chimiques etc. Les manipulations parfois un peu agressives ou potentiellement polluantes peuvent dégrader insidieusement les systèmes expérimentés. Par exemple, le petit moteur de la Fig.10 a été soumis à des couples dépassant largement ses possibilités. Par ailleurs, son palier **A** est durant ces essais "virils" soumis à la charge radiale de 0,2kg qui dépasse probablement ce que subiront les moteurs en situation normale.

Un individu technique soumis à des essais "critiques" est nommé dans le jargon industriel "**un martyr**". Comme potentiellement on doit raisonnablement supposer que sa fiabilité a été diminuée, il n'est pas question de l'intégrer dans le projet définitif. Dans notre cas, c'est le moteur référencé n°18 qui subira les pires outrages.

**Conclusion : Un martyr ne doit pas être inclus dans un projet, et surtout c'est lui qui sera sélectionné pour toutes les expériences potentiellement dégradantes.**

Par exemple, nous verrons plus loin que les pièces mécaniques du châssis ont été modifiées. Pour vérifier le travail effectué à l'atelier, un moteur était indispensable. Comme tous les éléments en aluminium ont été ponçés avec du papier abrasif très fin, l'atmosphère était forcément polluée. Chaque pièce, ainsi que les doigts de l'opérateur étaient lavées à l'alcool ménager avant de manipuler le moteur. Il n'en reste pas moins vrai que dans ce contexte de limaille métallique très fine, le moteur a forcément été souillé par les poussières de l'atmosphère locale. C'est invisible, mais "la scientifique policière" retrouverait sur notre n°18 tous les éléments qui ont participé à la retouche des pièces de la structure mobile.

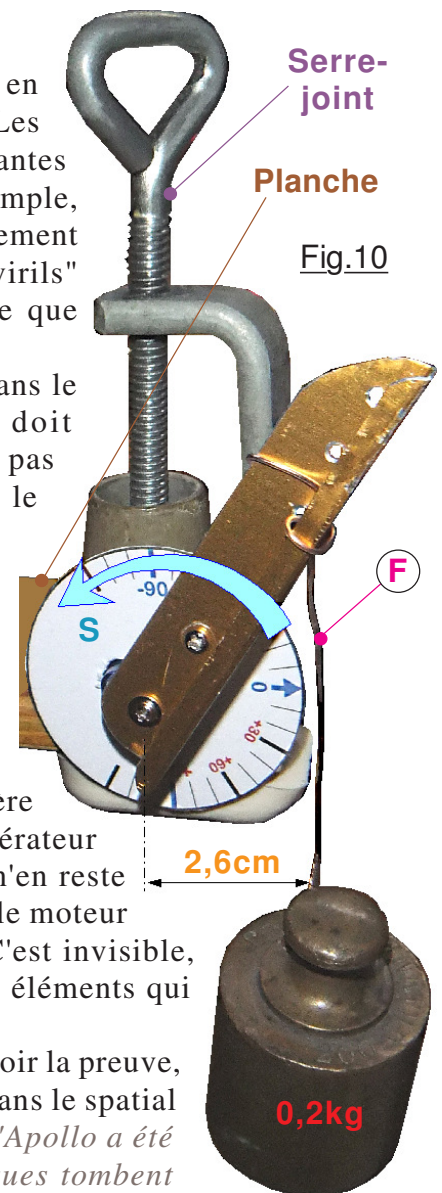
N'oubliez jamais cette notion de martyr, car sans que l'on puisse en avoir la preuve, elle peut nous éviter bien des embarras, et je peux vous assurer que dans le spatial elle est INCONTOURNABLE. (*Savez-vous que le module lunaire d'Apollo a été assemblé tête en bas pour que les souillures, les copeaux métalliques tombent vers le sol et ne restent pas discrètement cachées à bord ?*)

### 03) 11/09/2017 : Conception et assemblage de la centrale électrique. (MJD 58007)

Maillon principal d'une chaîne robotique, l'alimentation en énergie électrique ne peut souffrir de faiblesse. Si la tension s'effondre quand plusieurs moteurs s'animent simultanément, il deviendra impossible de faire la différence entre un problème logiciel et une insuffisance matérielle. Tester énergiquement et impitoyablement la centrale électrique constitue un préalable au développement informatique du projet et doit anticiper toutes les autres manipulations.

### ➤ La génération électrique sur les sondes spatiales.

Deux solutions sont généralement utilisées sur les machines scientifiques envoyées pour l'exploration du système solaire. Soit on place sur le robot des panneaux solaires qui rechargent des batteries logées dans la sonde. Cette solution ne convient que si l'ensoleillement est suffisant. Trop éloigné de notre étoile, la surface des panneaux solaires deviennent trop grande. L'autre technique consiste à agencer une petite centrale nucléaire. Technique rudimentaire et particulièrement fiable, elle peut alimenter sans faille une sonde durant plusieurs décennies. Il suffit d'enfermer de l'uranium dans un petit "bidon" très résistant. La chaleur dégagée chauffe des cellules à effet Peltier. En fait, on utilise l'effet Seebeck qui est l'inverse. En chauffant un couple de matériaux conducteurs, on génère une différence de potentiel qui alimente des régulateurs de tension et des onduleurs à la demande. Inconvénient majeur de cette technique : L'uranium propre à cette application ne se trouve qu'en Russie. C'est du reste la raison pour laquelle des sondes comme Curiosity embarquent toujours une ou deux expériences soviétiques à leur bord. Pour JEKERT cette technique a été privilégiée car elle permet de s'affranchir des inconvénients issus de grandes cellules photovoltaïques



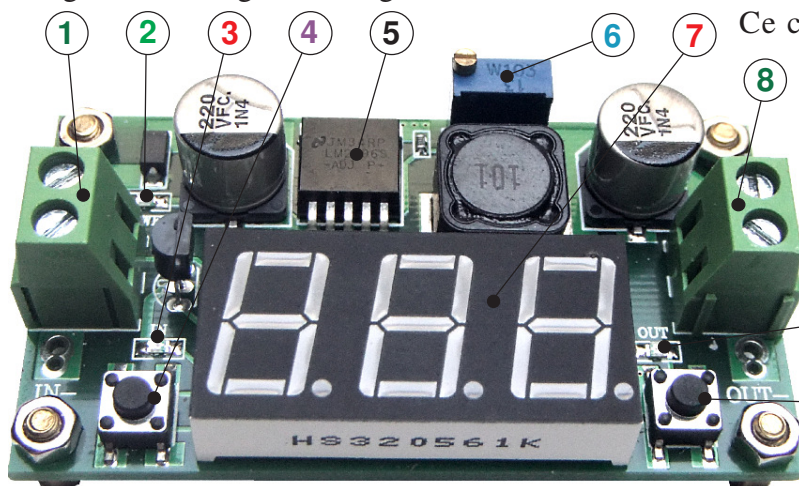
nuisant à la mobilité et de ne pas subir les tempêtes de sable fréquentes qui assombrissent considérablement le ciel de la planète rouge. Une telle centrale est relativement peu volumineuse, d'une fiabilité totale car entièrement statique, sans avoir en outre un mécanisme délicat de rétraction et de déploiement de panneaux solaires sources fréquentes de problèmes mécaniques.

### ➤ La génération électrique pour notre sonde martienne.

Pénétrant avec curiosité dans la "salle énergie" S8 on ne peut résister à l'envie d'aller jeter un petit regard par la lucarne Fig.11 au verre épais qui nous sépare de S9 la salle blindée dans laquelle est entreposé sur un support spécial le cylindre métallique (1) qui emprisonne la matière fissile. Tout autour sur la surface latérale des cellules Peltier sont plaquées et reliées électriquement entre elles. On distingue nettement le câble électrique qui en sort et rejoint à travers un passe-mur étanche le module de régulation (2) en Fig.12 qui va être secoué dans ses derniers retranchements. Notre mission pour ce lundi consiste à valider ses caractéristiques et sa fiabilité. Saisissant sur l'établi le cahier des charges fonctionnel, on note que le minuscule potentiomètre multi-tours 6 sert à ajuster finement la tension de sortie. En 1 sera branchée la ligne qui arrive du bloc nucléaire. C'est sur le bornier 8 que l'on dispose de la tension continue ajustée à exactement 5Vcc qui alimentera les servomoteurs. Notons que la masse **IN-** et **OUT-** est commune et sera reliée à **GND**. En 2 la présence de la tension d'entrée est visualisée sur une LED verte. L'afficheur sept segments 7 permet d'afficher la tension d'entrée **IN** ou celle en sortie **OUT**. La sélection se fait avec le bouton 10 qui alterne entre les deux options. La LED 3 ou la LED 9 indique quel est le coté sélectionné par 10. Le bouton poussoir 4 peut éteindre l'afficheur 7 si on le désire. Enfin le circuit intégré 5 se charge de la régulation aval de la tension. Il se comporte comme une résistance variable.



Fig.11



Ce circuit n'est pas un onduleur, il ne peut que raboter une tension qui dépasse la valeur consignée avec l'ajustable 6. Il faut donc impérativement que la tension en 1 soit supérieure d'au moins 2V à celle désirée en sortie. Ne pas oublier non plus que ce circuit fonctionne en découpage à une fréquence élevée. Les transitoires vont le faire chauffer de façon notable. Il n'est pas équipé d'un dissipateur. Il est donc recommandé de ne pas le soumettre à une tension d'entrée exagérée. Sans radiateur, avec le

Fig.12

**V**ous avez certainement remarqué une information étrange de type (MJD 58007) qui termine en gris le nom des chapitres. Elle fait référence à la datation dans le calendrier Julien. Cette façon d'utiliser le **Modified Julian Date** fait partie de l'astronomie et de l'astronautique. La **datation en jours julien** est l'analogue de l'heure T.U. pour exprimer les dates de façon universelle. Dans ce didacticiel c'est surtout pour maintenir l'ambiance ...

(1) : Petit bloc d'alimentation secteur de récupération annoncé pouvoir délivrer 7,5Vcc sous 1,5A. Une alimentation actuelle à découpage serait certainement plus avantageuse en termes d'encombrement ... mais il est disponible et sera largement assez dimensionné.

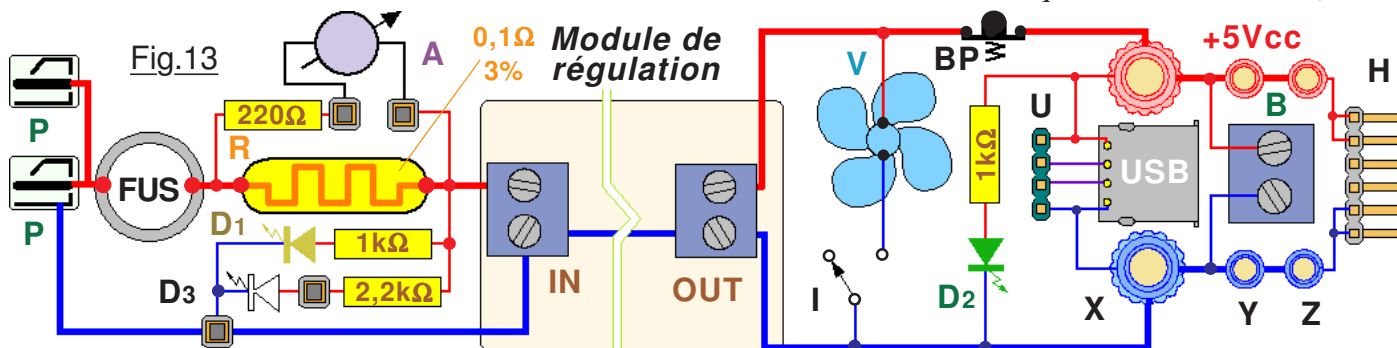
(2) : Petit module de régulation disponible sur internet pour moins de trois Euros, entretoises de fixation et port compris. Il est réputé pouvoir réguler 2A, les essais en condition réelles vont préciser sa performance réelle. Vu son prix de vente, inutile de se compliquer la vie ...



bloc secteur de la Fig.11 et un débit de 1,5A on atteint rapidement la limite thermique. La protection interne se déclenche et il passe en fonctionnement temporaire cyclique : Trois secondes avec présence en sortie des 5Vcc, puis deux à trois secondes en coupure. **Conclusion : Si l'on désire pouvoir utiliser ce module alimentation à un débit permanent de 1,2A à 1,4A il faut impérativement le ventiler.** Dirigeons nous vers l'établi d'assemblage ou des spécialistes énergies s'affairent.

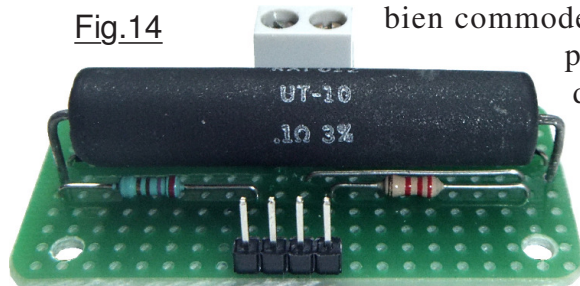
### ➤ Schéma complet du système de génération électrique.

**M**onopoliser une alimentation destinée à de la petite robotique pilotée par une carte Arduino pouvant débiter en permanence plus d'un ampère **uniquement pour la sonde martienne** n'est pas une approche très pragmatique. Autant concevoir un petit bloc électronique le plus convivial possible qui fera partie intégrante des dispositifs dédiés à notre micro-pico-informatique. Par convivial, comprendre "toutes les facilités possibles" pour se brancher, pour surveiller les paramètres pertinents. Nous allons donc ajouter quelques bricoles au bloc radioactif de la Fig.11 et au module de régulation de la Fig.12 sur deux petits circuits imprimés spécifiques. Le schéma complet de cette petite alimentation est donné en Fig.13 avec en **P** les deux prises pouvant recevoir la fiche du bloc secteur. Elles sont distribuées de chaque coté du boîtier, car l'expérience montre que parfois on préférera "avoir le fil de l'autre coté". Immédiatement un **Fusible** de 3,15A protège le transformateur basse tension de tout incident durant l'utilisation de cette source électrique de laboratoire. (Donc



souvent manipulée avec des risques potentiels de courts circuits.) Puis la tension continue issue du secteur va dans l'entrée **IN** du module de régulation en traversant la résistance **R** de 0,1Ω. À 1,2A de débit la tension aux bornes sera de 0,12V largement suffisant pour faire aller en butée le petit galvanomètre **A** chargé d'indiquer l'intensité consommée en sortie. Gradué jusqu'à 6 la déviation est affinée par la résistance de 270Ω pour correspondre à 1,2A à pleine déviation. La LED jaune **D1** témoigne de l'arrivée de la tension continue issue du bloc secteur. **D3** pour son compte est une LED blanche qui rétro-éclaire le galvanomètre utilisable ainsi même dans le noir. La sortie **OUT** du bloc de régulation est ajustée à exactement +5Vcc et peut alimenter le ventilateur **V**. Bien que relativement discret, il s'avère inutile en dessous de 500mA de consommation. On peut alors le couper avec l'inverseur **I**. Puis, les 5Vcc sont distribués à toute une kyrielle de prises, couvrant ainsi tous les besoins habituels. En **H** on trouve le classique connecteur mâle HE14. En **B** nous avons un bornier

Fig.14

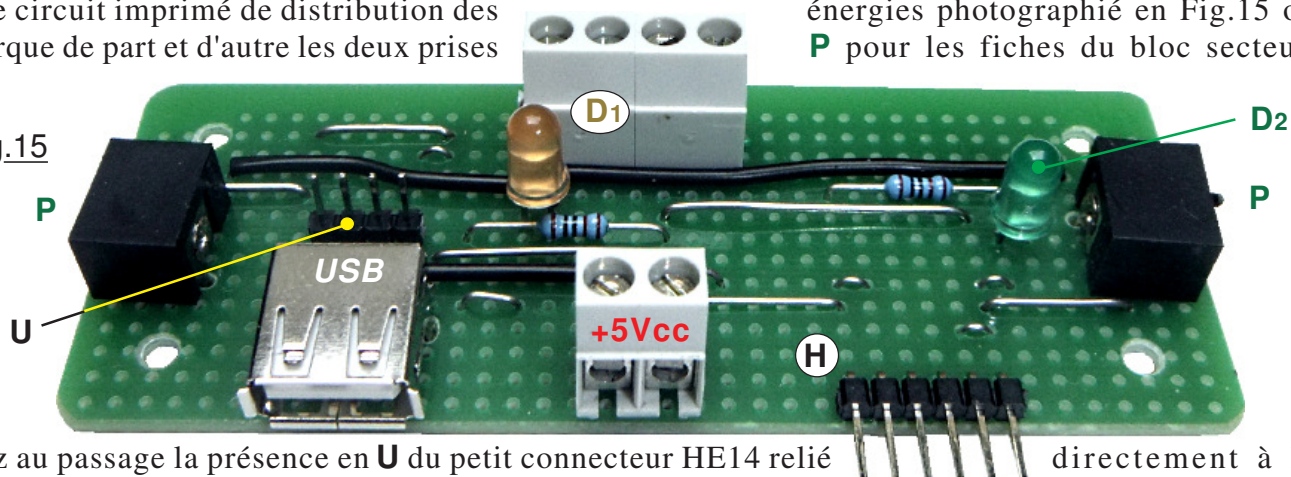


bien commode si l'on désire brancher un fil électrique quelconque. Une prise USB est également alimentée en 5Vcc avec possibilité d'intercepter si on le désire ses signaux sur le petit connecteur **U** de type HE14. Enfin en **X**, **Y** et **Z** on trouve des prises pour fiches bananes de diamètre 4mm ou 2mm. Pour des raisons d'accessibilité, les prises **Y** et **Z** sont sur des faces différentes du boîtier. La LED verte **D2** témoigne de la présence du 5Vcc sur les diverses prises d'utilisation. Enfin, en **BP** se trouve le **Bouton** poussoir de **Panique** qui permet en urgence de couper immédiatement le courant sur les prises utilisateur. Ce sera bien commode lorsque le logiciel ne sera pas au point et que les servomoteurs ne s'arrêteront pas à l'orientation prévue. **BP** est un petit SWICHT qui revient au travail quand on le relâche. Sur incident il faut commencer par débrancher les fils d'alimentation vers l'utilisation avant de le libérer. (Ou débrancher le bloc secteur de la prise 220V~.) Le dessin des circuits imprimés est disponible dans le fichier **Sonde Jekert.spl** que l'on imprime avec la **visionneuse**. Il aurait été certainement plus judicieux de ne faire qu'un seul circuit imprimé, mais sachez que l'étude initiale ne prévoyait par la présence d'un

galvanomètre pour indiquer l'intensité. Comme ce dernier était disponible, le bloc énergétique a bénéficié par la suite de sa présence, lorsque le module de régulation de la Fig.12 a passé les tests et été estimé **"bon pour le service"**. La résistance **R** visible sur la Fig.14 est de forte puissance. Elle ne dissipe que 0,15W au maximum. C'est encore une raison de disponibilité qui a imposé ce choix. Sur le circuit imprimé de distribution des énergies photographié en Fig.15 on remarque de part et d'autre les deux prises

**P** pour les fiches du bloc secteur.

Fig.15



Notez au passage la présence en **U** du petit connecteur HE14 relié prise USB femelle pour pouvoir examiner ses signaux binaires. Directes vers nous se trouvent les diverses connections possibles, avec sur la même face du boîtier deux douilles pour fiches bananes de diamètre 4mm, une pour le moins, et une pour le **+5Vcc**. (Voir la Fig.16.)

### ➤ Réalisation pratique du bloc alimentation.

Largement documentées dans mes ouvrages disponibles sur ROBOT MAKER, pas question d'alourdir ce tutoriel avec la description détaillée de mes techniques pour concrétiser un boîtier personnalisé. Par exemple allez consulter :

<http://www.robot-maker.com/ouvrages/interface-puissance-arduino/mettre-oeuvre-polystyrene-choc/>

Nous allons nous limiter dans ces lignes à quelques points particuliers pouvant éventuellement vous aider si vous réalisez une alimentation analogue. Sur la photographie de la Fig.16 le module de régulation n'est pas encore intégré pour laisser bien visible le câblage. Le coffret étant assez compact, il faut travailler avec méthode. En **1** se trouve l'orifice de passage du tournevis qui en usage normal, couvre les vis du bornier

refermé, pour venir serrer ou desserrer accessible en **10**. L'orifice **2** sur la face arrière permet d'insérer la fiche du bloc secteur sur la

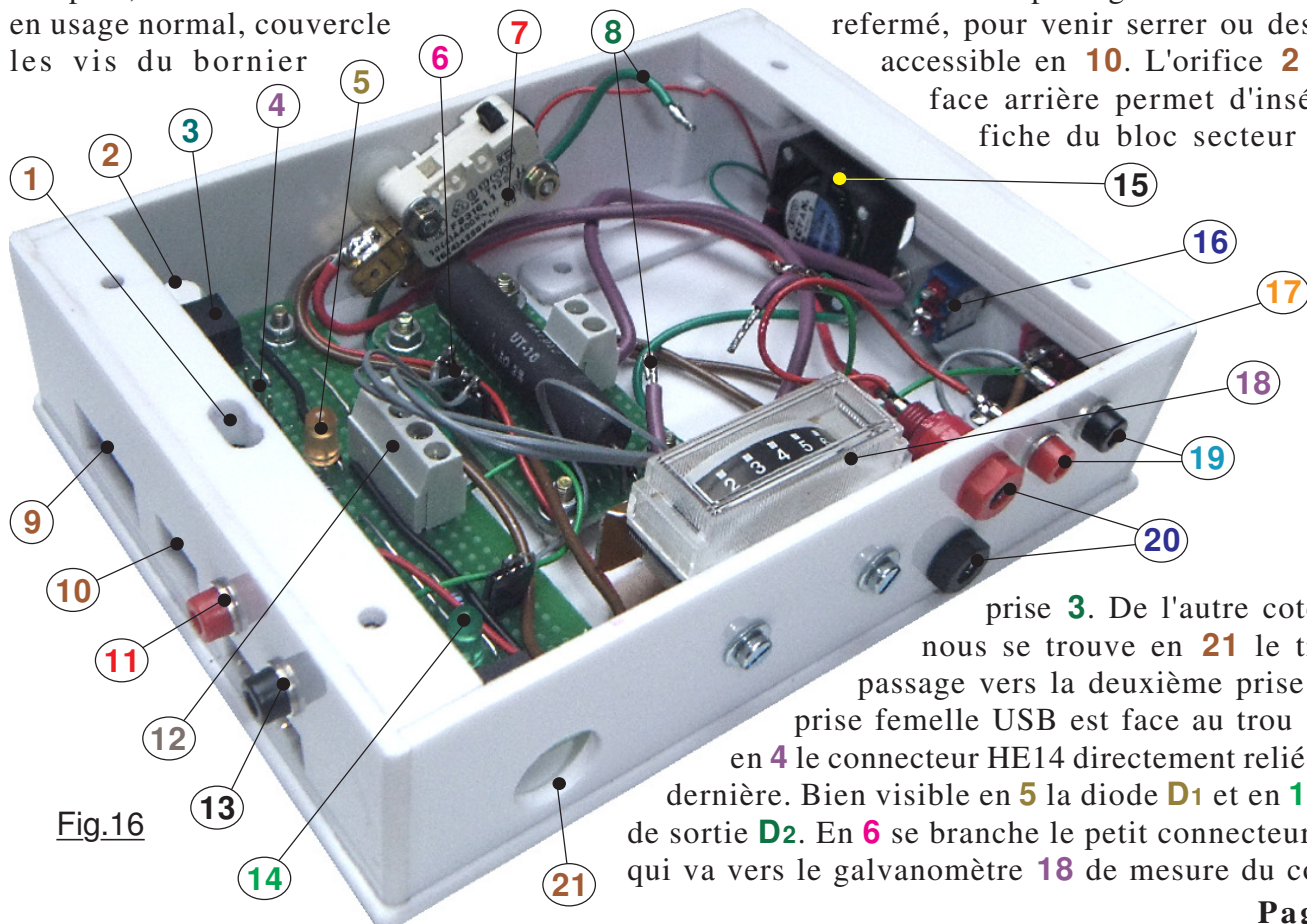


Fig.16

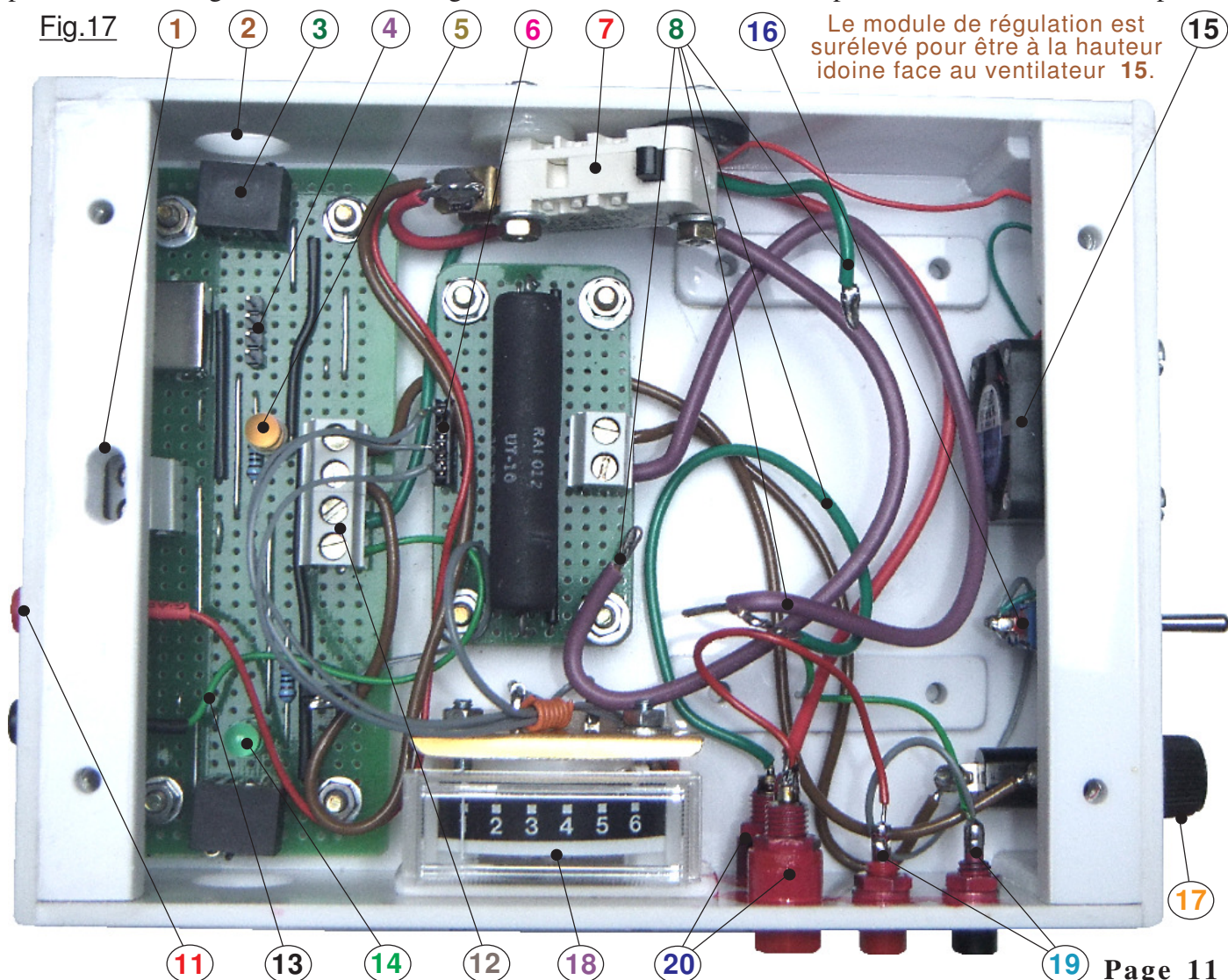
prise **3**. De l'autre côté, vers nous se trouve en **21** le trou de passage vers la deuxième prise **P**. La prise femelle USB est face au trou **9** avec en **4** le connecteur HE14 directement relié à cette dernière. Bien visible en **5** la diode **D1** et en **14** celle de sortie **D2**. En **6** se branche le petit connecteur HE14 qui va vers le galvanomètre **18** de mesure du courant.



En **7** le SWICHT du bouton de panique qui dépasse du couvercle quand le coffret est refermé. Les gros fils **8** véhiculent le courant vers le module de régulation. Vous pouvez remarquer qu'ils sont de section un peu exagérée. Suite à une très longue expérience pour la réalisation de multiples alimentations, je suis arrivé à la conclusion qu'il vaut mieux une liaison trop musclée que l'inverse. La dynamique sur les transitoires est meilleure. Ceci étant précisé, j'ai une tendance fâcheuse dans ce domaine à abuser un peu des grosses sections. **11** et **13** sont les deux douilles pour fiches bananes de diamètre 2mm, avec leurs copines en **19** sur la face dirigée vers nous. Elles sont complétées en **20** par les douilles pour fiches de  $\Phi$  4mm. En **15** le petit ventilateur peut être coupé par l'inverseur **16**. Peu visible en **17** se trouve le support du Fusible. Enfin en **12** on remarque le bornier du circuit de distribution électrique relié au module de régulation de tension.

**C**onsacrer six pages à la réalisation du bloc alimentation peut sembler exagéré dans un tutoriel dédié principalement à la conception d'un petit robot. Le penser est une erreur, car on néglige trop souvent ce maillon de la chaîne pourtant essentiel. Alors soigner cette fonction est primordial et évitera bien des tâtonnements dans les futurs projets qui la mettront à contribution.

La Fig.17 qui présente l'ensemble vu de dessus utilise des repères identiques à ceux de la Fig.16 pour faciliter les observations entre les deux photographies. On distingue nettement la petite bride orange fabriquée à la demande pour immobiliser le petit galvanomètre à cadre mobile **18** sur la face avant. Bien que ce ne soit pas particulièrement évident, toutes les douilles pour fiches bananes ainsi que le support de fusible sont copieusement barbouillé de vernis à ongles (*Rose sur la photographie.*) pour les coller "définitivement" quand leurs écrous de fixation ont été serrés. Rien n'est plus agaçant quand on est en train de procéder à des essais et qu'une douille se met à gigoter car son écrou de liaison s'est légèrement desserré à l'usage. Enfin, les divers gros fils de liaison avec le bloc de régulation passent sous ce dernier. Tout entre dans le coffret, sans "mascagner", il faut toutefois procéder à l'intégration avec du doigté car l'ensemble est bien rempli, et le volume très occupé.





#### 04) 12/09/2017 : Réception et validation de la centrale électrique. (MJD 58008)

**A**vant de pouvoir faire confiance à la centrale d'alimentation en énergie électrique, il faut la soumettre à des essais sévères la plaçant dans des conditions bien plus difficiles que celles auxquelles elle sera confrontée en utilisation standard. Alimenter des petits moteurs électriques à courant continu constitue l'une des applications les plus délicates que rencontre une source de courant continu. Qu'ils soient pas à pas ou servomoteurs, ces motorisations engendrent toutes des **appels de courant** lors de leurs sollicitations. Une étude préalable de la mobilité de notre insecte quadrupède semble aboutir à la conclusion qu'au maximum quatre moteurs seront pilotés simultanément. Pour soumettre la centrale électrique à des conditions plus que critiques, nous allons réutiliser le programme **P01\_Commande\_Servo\_par\_Angles.ino** sauf qu'ici on va placer un nombre croissant d'SG90 en parallèles. La sortie **D10** peut facilement commander autant de moteurs qu'on le désire. Puis par manipulation du potentiomètre branché sur **A5** on leur envoie une consigne simultanée. Tous s'activent en même temps. Plus on en place en parallèle sur l'alimentation, plus important devient l'appel de courant. Le banc d'essai de la Fig.3 n'est pas du tout adapté pour brancher tous ces moteurs, trop de liaisons élémentaires sont à effectuer. Aussi, les "ingénieurs motorisation" ont mis en service le dispositif de la Fig.18 constitué de deux connecteurs HE14 doubles surélevés qui restaient inutilisés dans les tiroirs. Soudés sur un circuit imprimé prépercé à bandes de cuivre, on dispose ainsi de quatre lignes de vingt postes. Il devient facile de brancher tous ces moteurs en mode parallèle, aussi bien pour la commande que pour leur alimentation en énergie de puissance. Sur la Fig.19 on voit aisément que la rangée du dessus sur le bloc de connections n'est pas utilisée. C'est normal puisque les fiches des moteurs n'ont que trois fils. Les fils d'alimentation ne sont pas de grosse section ce qui ne peut que nuire au bon fonctionnement. Si dans ces conditions l'ensemble se comporte bien, il en sera forcément pareil si une ligne plus "musclée" est mise dans le circuit de liaison effectif vers la sonde.

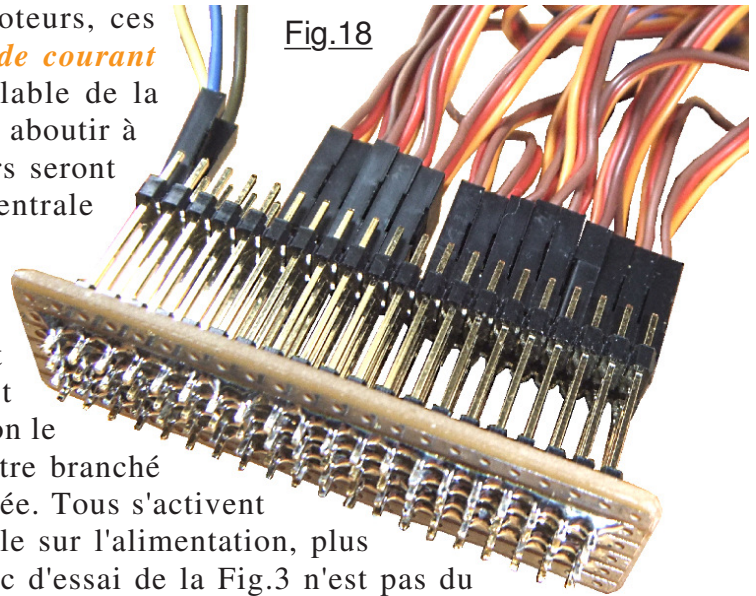


Fig.18

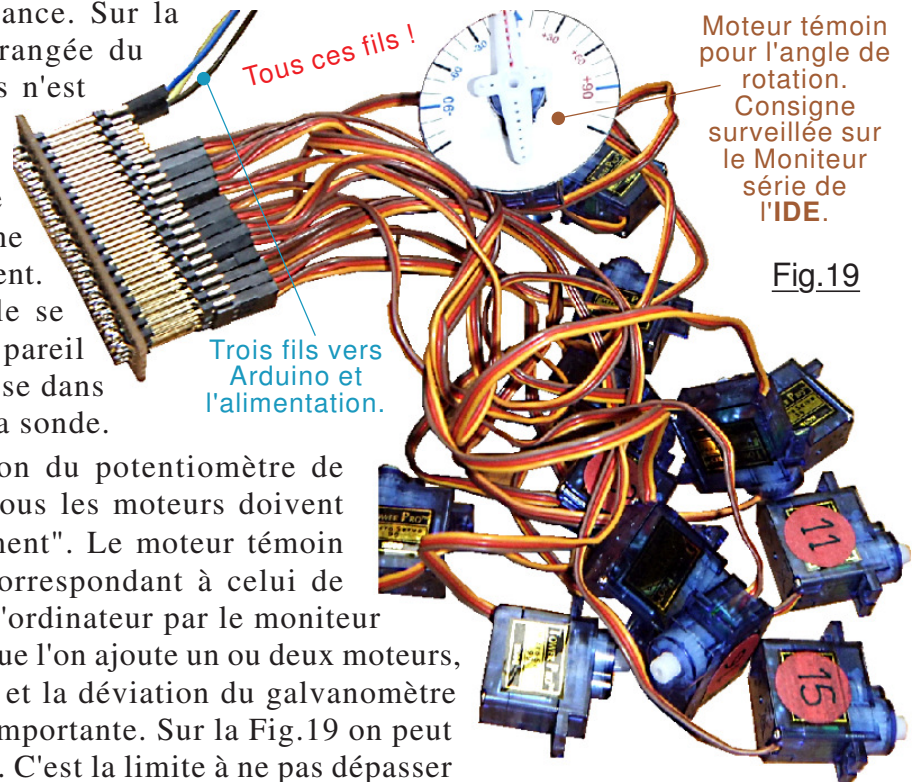


Fig.19

**L**orsque l'on tourne le bouton du potentiomètre de consigne branché sur **A5**, tous les moteurs doivent réagir simultanément et "proprement". Le moteur témoin doit se positionner à un angle correspondant à celui de consigne visualisé sur l'écran de l'ordinateur par le moniteur série de l'**IDE**. Au fur et à mesure que l'on ajoute un ou deux moteurs, les appels de courant augmentent et la déviation du galvanomètre affichant l'intensité devient plus importante. Sur la Fig.19 on peut dénombrer quatorze servomoteurs. C'est la limite à ne pas dépasser pour conserver un comportement net. À partir de quinze éléments, les rotations deviennent erratiques, et certains individus partent en rotation continue. En résumé, jusqu'à 14 on peut considérer que la simultanéité est possible, ensuite le fonctionnement diverge. Vu que dans la réalité il est probable que l'on ne dépassera jamais six mouvements simultanés, l'alimentation est donc largement validée. Bien que réputée pouvoir débiter 2A, l'expérience montre qu'il ne faut pas dépasser 1,5A. Vu que le galvanomètre est gradué jusqu'à six, pour faciliter la lecture de l'intensité on ne



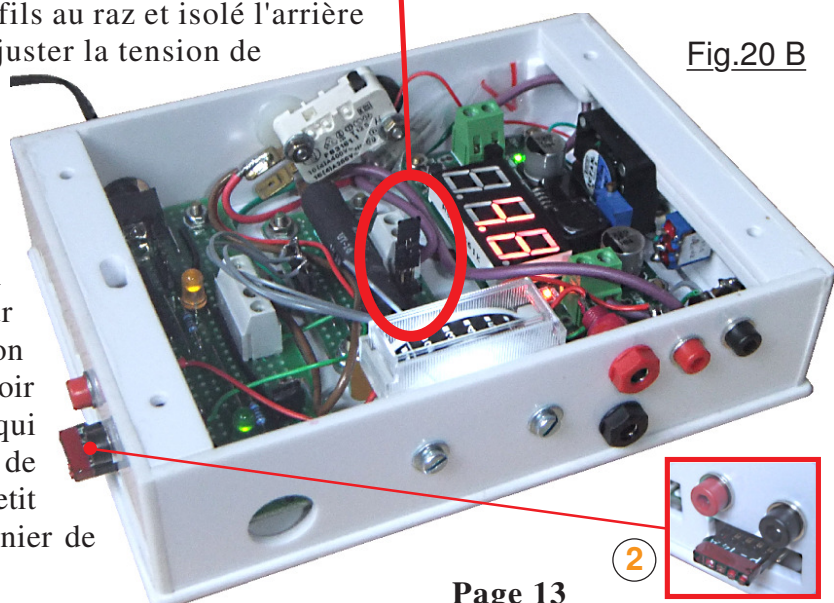
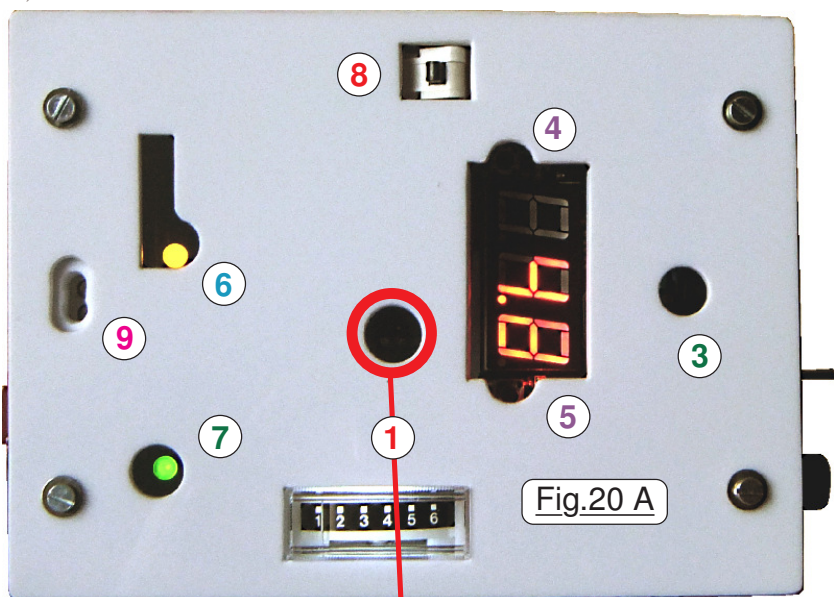
dépassera pas 1,2A permanent. Ce débit couvre largement les besoins habituels.

À cette intensité permanente, il faut absolument ventiler le circuit intégré du module de régulation. Ceci dit, pour notre sonde martienne, ce ne sera pas utile sauf cas particulier. En effet, d'une part peu de moteurs seront sollicités en même temps. Par ailleurs, dès qu'un servomoteur est en position de consigne, son moteur est mis en veille et ne consomme plus rien. Quand les quatorze éléments du banc de test sont en position de consigne, l'intensité retombe presque à zéro, il n'y a plus que la consommation du ventilateur et celle des diverses LED. Aussi, la majorité du temps durant les périodes de programmation il ne sera pas indispensable de ventiler. (Consulter les [Fiches n°1 à n°3](#)) La motorisation est validée, la centrale électrique aussi, l'avancement du projet est conforme aux indications du planning. Pour le moment tout va pour le mieux dans le meilleur des mondes ...

### ➤ Dernière minute.

**A**panage du développement et de la mise au point, une solution matérielle évolue régulièrement. Comme ce didacticiel est rédigé au fur et à mesure de l'avancement du projet, certains chapitres sont à reconsidérer. C'est le cas pour notre centrale énergétique. En effet, il est possible de faire débiter cette dernière à 1,7A le galvanomètre étant alors en surcharge en permanence. Cette déviation exagérée sur le long terme pourrait en diminuer la fiabilité. Par ailleurs, certains moteurs peuvent engendrer des pics d'intensité à leur démarrage qui souquent énergiquement la cadre mobile, brutalité qui ne va pas dans le sens de la longévité. Pour parer ces deux cas de figure relativement peu fréquents, la possibilité de le placer en court-circuit pour le protéger a été ajoutée sur le circuit imprimé sous la forme d'un connecteur HE14 double et de grande hauteur. Ainsi, par le truchement d'une petite languette (En **1** sur la Fig.20) il devient facile d'établir le contact ou au contraire de le supprimer. Le connecteur HE14 est utilisé pour avoir les broches proches du couvercle et ainsi insérer facilement la languette coffret fermé. Comme cet ajout a été réalisé après la rédaction des chapitres précédents, ce connecteur n'est pas visible sur les photographies des Fig.14, Fig.16 et Fig.17 du didacticiel.

Autre risque potentiel : Les broches du petit connecteur HE14 de sortie sur le coté droit dépassent légèrement du coffret. C'est royal pour provoquer malencontreusement un court-circuit si elles ne sont pas utilisées. En **2** un bouchon isolant pare ce risque. Simple connecteur femelle dont on a coupé les fils au raz et isolé l'arrière avec du vernis à ongles. En **3** on peut ajuster la tension de sortie avec un petit tournevis idoine. Un quelconque stylet permet d'allumer ou d'éteindre l'afficheur en **4** et de choisir la valeur de la tension d'entrée ou de sortie en **5**. En **6** la lumière est assez grande pour permettre la sortie des fils qui seraient reliés au connecteur USB et pour voir la LED témoin de la présence de tension en entrée du régulateur. L'orifice **7** laisse voir la LED témoin de la tension en sortie qui s'éteint quand on active en **8** le bouton de panique. Enfin en **9** il sera facile avec un petit tournevis de brancher des fils sur le bornier de sortie disponible sur le coté gauche.



### ➤ Les petites fiches pour le matériel.

Complétant les informations données dans le didacticiel, le fichier **FICHES.pdf** contient des pages que vous pouvez imprimer si vous le désirez. Rien ne vous y oblige, elles ne sont que des résumés qui durant le développement du projet synthétisent certaines informations dont on a souvent besoin. Destinées à palier un manque de mémoire patent chez votre narrateur, si vous possédez une mémoire à retenir par cœur le bottin de téléphone, vous pouvez vous en passer royalement. Pour des raisons pratiques, **chaque page au format A4 contient le RECTO et le VERSO d'une même fiche**. Vous coupez la feuille en deux bien sur le trait central. Vous collez les deux morceaux en les alignant sur le coté de la séparation. (*Sans inverser le haut et le bas !*) Quand la colle est sèche, vous réduisez un peu les dimensions de la fiche en découpant tout le tour à environ 2mm à 3mm du cadre gris. Les trois premières fiches sont relatives à la petite alimentation. Elles résument les schémas, les dessins des circuits imprimés et surtout les performances précises de cette électronique de laboratoire. Par ailleurs, nous aurons souvent besoin de documentations propres aux matériels tels que les servomoteurs ou le multiplexeur PWM par exemple. Pour ne pas encombrer la narration, ces informations sont résumées sur des fiches dédiées. On se contentera d'y faire référence dans le tutoriel.

#### 05) 14/09/2017 : Réception du multiplexeur de pilotage des moteurs (MJD 58010)

Troisième maillon dans la chaîne matérielle qui animera JEKERT, le module de multiplexage intervient dans l'interface entre l'ordinateur de bord NANO Arduino et les entrées de pilotage des moteurs. Cette platine électronique est fondamentale. Elle autorise l'envoi de consignes jusqu'à seize moteurs indépendants en ne monopolisant que deux broches analogiques par émulation d'une ligne série au standard I2C. Par ailleurs, ce module électronique nous affranchit d'avoir à générer les seize signaux à 50Hz, avec des rapports cycliques correspondant à la position désirée pour chaque moteur. Le comportement parfait de cette électronique est vital, sans compter le fait que pour la programmation nous devons nous montrer capables de le maîtriser pour développer le logiciel. Particulièrement compact, ce module présenté sur la Fig.21 peut être chaîné avec d'autres compères si l'on désire plus de moteurs sur la machine envisagée. Avec seulement douze degrés de mobilité sur JEKERT ce ne sera pas nécessaire.

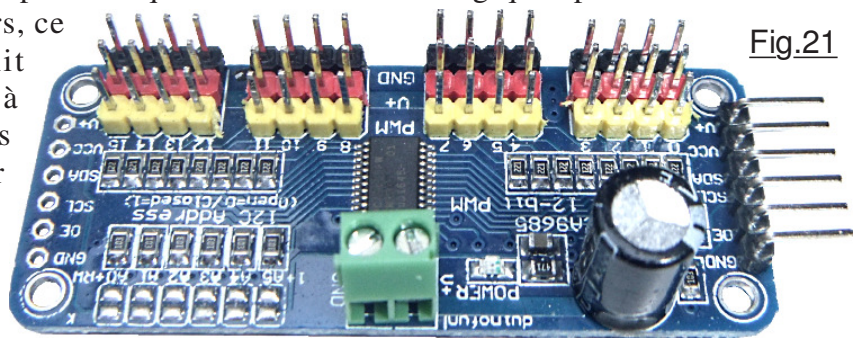


Fig.21

### ➤ Les signaux à fournir à la motorisation.

Pour déterminer les caractéristiques des moteurs qui sont à notre disposition, nous nous sommes contentés de faire confiance au programme **P01\_Commande\_Servo\_par\_Angles.ino** et de tourner le bouton d'un potentiomètre. Peu importe le signal de commande qui était envoyé sur la ligne orange des asservissements. Nous ne sommes pas très à l'aise, car le technicien qui a déballé le multiplexeur PCA9685 nous a tout de suite informé que la documentation qui l'accompagne n'est pas claire et nous a souhaité bon courage. On va faire avec ...

Ce jour, en revanche, on n'y coupe pas d'appréhender la façon de faire fonctionner les moteurs, car pour programmer le multiplexeur il nous sera indispensable de savoir ce que doivent générer les sorties **0** à **15** de ce dernier.

Donc, sur le bureau, on farfouille pour trouver la fiche nommée **Pilotage des servomoteurs**.

Outre la fonction de chacun des trois fils, on comprend finalement qu'il suffit pour chaque individu de lui envoyer en permanence en consigne un "signal binaire carré" à 50Hz dont on modulera la durée à l'état logique "1" entre environ 1000µs et 2000µs. C'est exactement ce que devra faire le module de pilotage à seize canaux PCA9685 développé par l'entreprise ADAFRUIT.

Ayant compris ce que devra générer ce circuit électronique, il nous reste à voir comment lui délivrer par logiciel les consignes. Dans ce but, on ne montre pas notre malaise au technicien qui nous observe, et avec autorité et assurance on saisit à son tour la **Fiche n°4** nommée :

**Méthodes de la bibliothèque **Adafruit\_PWMServoDriver.h**.**

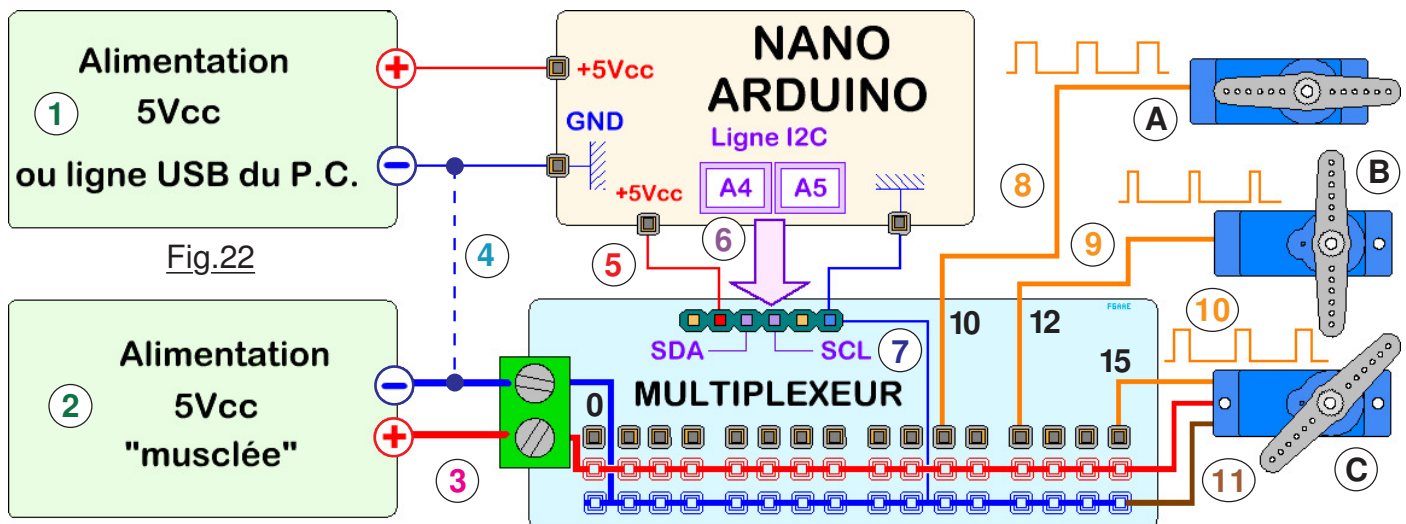
L'entreprise ADAFRUIT commercialise toute une variété de petits modules



électroniques dédiés pour la famille Arduino. Pour inciter les clients potentiels à acheter ces produits, ils accompagnent leurs références par des bibliothèques bien pensées qui facilitent considérablement la programmation. Vous avez déduit que la fiche mentionnée ci-avant constitue un résumé des fonctions fournies par la bibliothèque associée directement au circuit PCA9685. Avant de détailler le processus de pilotage, examinons l'architecture électronique de la carte PCA9685 :

### ➤ Structure électronique du multiplexeur et ses branchements.

La Fig.22 résume assez bien les branchements à effectuer et surtout la mission dont s'acquitte le module d'interfaçage. Ce dessin fait apparaître les liaisons filaires électriques à établir. En **1** une petite alimentation alimente la carte Arduino NANO qui ne consomme qu'une énergie dérisoire. (Ce peut être la ligne série USB qui va au P.C. durant la programmation.) On utilise des fils de faible section. En **2** l'alimentation musclée en "gros fils" **3** va directement au bornier. Logiquement



en **4** il faudrait établir un lien entre les deux masses de référence. Ce n'est pas indispensable, car en **7** la liaison est établie en interne sur la carte électronique. Notez au passage que les deux lignes de picots du bas pour la masse et pour le +5V de puissance sont réunies, comme sur le petit connecteur de la Fig.18 qui servait aux tests. Ainsi tous les moteurs branchés seront en parallèle comme en **11** sur ces deux lignes d'alimentation. Enfin, chaque ligne orange d'un moteur va sur la sortie **0** à **15** de pilotage qui lui est réservée. L'électronique locale est alimentée par une ligne **5** à part qui logiquement sera reliée à celle de la carte Arduino. Passons à l'étude des signaux électriques qui animent le total :

### ➤ Fonctionnement de la carte électronique PCA9685.

Lorsque le circuit n'a jamais reçu de consigne pour une ligne de sortie, cette dernière reste au repos à l'état logique "0". Avant de chercher à générer de la PWM sur les diverses sorties du module, on doit préciser la fréquence de répétition désirée avec `pwm.setPWMPFreq(Fréquence)`; Comme on veut commander des servomoteurs l'instruction devient `pwm.setPWMPFreq(50)`; car la période **T** souhaitée est de 20mS. Cette consigne est envoyée sur la ligne I2C en **6** et respecte les protocoles du circuit intégré soudé sur le circuit imprimé. Pour l'instant les seize sorties sont au repos. Pour commander un servomoteur, (Ou tout dispositif branché sur le module.) on désigne la sortie concernée et la durée de l'impulsion à l'état "1". C'est l'instruction de la bibliothèque : `pwm.setPWM(Num_sortie, Ton, Toff)`; qui se charge de cette mission.

Par exemple `pwm.setPWM(12, 0, 465)`; va immédiatement engendrer sur la sortie **12** le signal qui va par la ligne **9** au servomoteur **B**. La durée de l'impulsion à l'état "1" sera de 2272µS et la fréquence du signal de 50Hz. ( $2271\mu S = 465 \times 4,884$ ) Le moteur **B** adopte la position qui en découle. Il la conserve, car, bien que le signal de consigne en **6** ne dure qu'une fraction de seconde, à partir d'une commande de génération PWM la sortie générera le signal découpé jusqu'à ce qu'une nouvelle consigne désignant cette sortie soit envoyée. Si maintenant on active l'instruction suivante : `pwm.setPWM(15, 0, 137)`; c'est le moteur **C** qui sur la ligne **10** sera piloté par un signal de fréquence identique 50Hz la durée à l'état logique "1" faisant cette fois 669µS. ( $669\mu S = 137 \times 4,884$ ) Le moteur **C** tourne rapidement et se positionne à son tour à l'angle de déviation correspondant à ce rapport cyclique. Enfin, pour ne pas que le troisième moteur ne reste dans une attitude

quelconque, le programme rencontre `pwm.setPWM(10, 0, 291)`; qui imposera un signal à 50Hz d'impulsion positive de 1421µS sur la ligne 8. ( $1421\mu S = 291 \times 4,884$ )

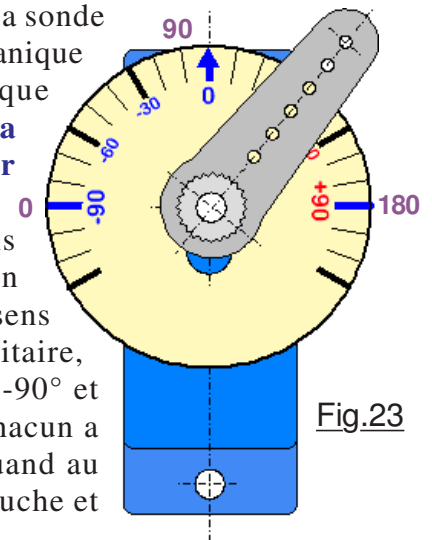
Coupons toutes les alimentations. Débranchons les liaisons entre Arduino NANO et le multiplexeur. Puis réalimentons la carte électronique sans rebrancher les deux lignes de la liaison I2C. L'ensemble de la configuration est rétablie sur *le multiplexeur qui conserve dans une mémoire non volatile le contexte qui est mémorisé. Ainsi les moteurs reprennent la même position que celles qu'ils avaient avant la mise hors tension de l'ensemble.*

➤ **Première mise en œuvre de l'interface de motorisation.**

**B**ien qu'initialement les informations fournies avec la bibliothèque étaient trop sommaires, divers essais sur le réel ont permis de dégager les grandes lignes qui sont consignées sur la fiche dédiée. Finalement la mise en service de cette petite merveille d'électronique ne sera pas bien compliquée. Elle va nous permettre de piloter chaque moteur indépendamment des autres. C'est un incontournable pour prétendre programmer à notre désir la mobilité de JEKERT.

La réception des moteurs dans le chapitre n°2 a clairement fait apparaître une dispersion de caractéristique entre les divers individus. Hors, pas question lorsque la sonde sera posée sur Mars, de "voir" un moteur passer en divergence. La mécanique ira en butée ce qui est formellement interdit, la ligne électrique tortillerait des nœuds avant que tout ne se bloque. **Aussi, il nous faudra programmer une subroutine de servitude qui pour chaque moteur cantonnera sa plage de rotation dans la fourchette 0° à 180°.**

Généralement, comme indiqué en violet sur la Fig.23 les positions angulaires sont repérées entre 0 et 180° avec 90° pour la position centrale. C'est un arbitraire, du reste certains techniciens utilisent le sens inverse. Personnellement, la notion de "neutre opérationnel" est prioritaire, raison pour laquelle je préfère adopter des positions repérées entre -90° et +90°, le neutre valant alors zéro pour satisfaire "mon arbitraire". Chacun a sa logique propre, j'espère que la mienne ne vous choquera pas. Quand au signe, n'ayant à ce stade aucun critère spécial, j'adopte le moins à gauche et le plus à droite, comme pour des axes trirectangles cartésiens.



Ayant cerné le principe de fonctionnement du circuit PCA9685, c'est avec fierté qu'en présence des techniciens nous téléchargeons `P02_Test_de_base_du_Multiplexeur.ino` dans le cerveau du petit ordinateur. Son comportement est rudimentaire et ressemble à celui de l'expérience décrite sur la Fig.19 sauf que cette fois les commandes des moteurs ne sont plus branchées sur une sortie d'Arduino unique, mais pilotées séparément par les sorties individuelles du multiplexeur. Dans un premier temps on ne branchera qu'un seul moteur à la fois pour en déterminer les caractéristiques pertinentes.

- *Ben Totoche, tu perds ton temps, c'est déjà fait dans le chapitre 02, on a tout noté dans le beau tableau plein plein plein de nombres en couleurs !*
- *Et oui Dudule, c'est la vie du développeur. Quand on a passé tout ce temps à rédiger ce tableau, nous ne savions pas encore quels seraient les paramètres pertinents ... et ce ne sont pas les bons.*
- *Mince alors, quels sont les bons ? Faut tout recommencer ?*
- *Voui, tout à refaire, il nous faut connaître les durées d'impulsions à fournir pour chaque moteur quand il se trouve exactement à -90° et +90°.*

**C**hère lectrice, cher lecteur, comme vous savez que la mise en ligne de ce didacticiel se fait au fur et à mesure du développement du projet, vous avez compris que de temps en temps il y aura forcément des remises en cause. C'est toute la différence par rapport à mes autres tutoriels bien léchés qui ne sont rédigés que lorsque le projet est entièrement achevé et déterminé. Le didacticiel est alors linéaire, un long fleuve tranquille. Tout se passe comme prévu, mais sans que vous ne le sachiez, la gestation a forcément été hésitante avec bien des écueils. Le but de ce didacticiel est précisément contenu dans cette démarche progressive qui fait avancer pas à pas, avec parfois des difficultés inattendues. *Quand on expérimente, c'est le chemin suivi qui compte, pas le résultat final.* Et si parfois on se fourvoie ... et bien il faut faire demi-tour et recommencer tout en conservant le moral. On va y arriver nom d'une sonde martienne !



## 06) 15/09/2017 : Validation du multiplexeur de pilotage des moteurs (MJD 58011)

Programmation globalement comprise, avec **P02\_Test\_de\_base\_du\_Multiplexeur.ino** nous allons faire d'une pierre trois ricochets. Le premier bénéfice va consister à vérifier que chaque sortie du multiplexeur est opérationnelle. On va ensuite construire un tableau de caractéristiques pertinentes des moteurs qui sera directement impliqué dans le développement logiciel. Enfin, en plaçant un moteur sur chaque sortie, tous pilotés simultanément, on va confirmer l'aptitude de l'alimentation de puissance à assurer sa mission avec fiabilité.

### ➤ Caractéristiques pertinentes de chaque moteur.

Contrairement à ce que présente le banc de test de la Fig.24 tout le monde ne dispose pas d'un impulsimètre précis à la  $\mu\text{S}$ . Aussi le petit calculateur de la sonde va dialoguer sur le Moniteur de l'**IDE** pour vous indiquer sur l'écran du P.C. les valeurs relatives à vos moteurs. Vous serez ainsi parfaitement aptes à obtenir les paramètres nécessaires à la programmation. La manipulation est élémentaire. Elle consiste à **effectuer dans l'ordre** :

- Tourner le bouton du potentiomètre dont la tension variable est branchée sur l'entrée **A1** pour que l'Angle de position de consigne  $0.00^\circ$  soit affiché sur le P.C.
- Brancher un moteur à tester sur lequel on a placé le petit cadran gradué entre  $-120^\circ$  et  $+120^\circ$ .
- Positionner un palonnier en l'insérant sur les dents de l'arbre de sortie pour que sa direction soit la plus proche possible du zéro théorique. (*Un petit écart jusqu'à  $10^\circ$  peut être inévitable.*)
- Tourner le potentiomètre pour positionner le palonnier aux deux limites  $-90^\circ$  et  $+90^\circ$  et noter les différentes valeurs pertinentes qui en découlent.



Fig.24

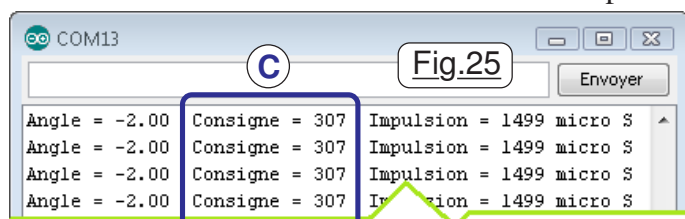


Fig.25

"élargie" les angles indiqués vers les déviations extrêmes sont faux. Ce qu'il faut noter, ce sont les valeurs de consignes **C** encadrées dans la Fig.25 en bleu, et ce pour les trois positions caractéristiques, c'est à dire le neutre opérationnel central et les deux extrêmes à  $\pm 90^\circ$ . Quand toutes ces valeurs sont réunies, on les résume dans un tableau tel que celui de la Fig.26 en vue de définir la procédure qui sera chargée d'animer les muscles mécaniques du gros insecte. Les symboles (\*) sont ajoutés pour le cas particuliers de moteurs qui n'acceptent pas tout à fait d'aller en toute sécurité à la position angulaire de  $+90^\circ$ . Le n°6 par exemple arrive à environ  $80^\circ$  avec la valeur de 152 à la limite du seuil de divergence pour lequel le moteur part en rotation continue. Pour le n°11 la limite se produit pour  $+85^\circ$  avec une valeur critique juste avant divergence. Pour le n°12 l'angle de la valeur critique est d'environ  $+85^\circ$ . Pour ces trois moteurs la plage de rotation est inférieure à la pleine déviation théorique de  $\pm 90^\circ$ .

Fig.26

Recommencer cette procédure pour chaque moteur en changeant de sortie sur le multiplexeur. Pour les deux valeurs de  $\pm 90^\circ$  ne pas tenir compte de l'Angle affiché qui n'est significatif que pour positionner le palonnier au neutre. La plage étant

Moteur	$-90^\circ$ réel	Zéro réel	$+90^\circ$ réel
n°1	500	320	150
n°2	480	300	134
n°3	483	303	143
n°4	478	292	136
n°5	494	307	145
n°6	481	296	152 (*)
n°7	483	301	136
n°8	490	305	134
n°9	492	303	141
n°10	481	314	154
n°11	485	301	139 (*)
n°12	472	290	139 (*)
n°13	460	289	137
n°14	503	316	154
n°15	487	310	145
n°16	470	285	132
n°17	487	316	159
n°18	474	300	143

### ► Confirmation de la validation de la centrale électrique.

Manipulation particulièrement aisée à mettre en œuvre, on demande aux techniciens de brancher seize moteurs sur l'interface pour en utiliser toutes les sorties. En un rien de temps l'établi ressemble à celui de la Fig.27 le fatras de fils étant assez impressionnant. En fait les SG90 sont entassés les uns sur les autres pour bien faire voir la configuration expérimentale. Lorsque l'on

tourne le bouton du potentiomètre, mis à part le ralentissement de la boucle de base pour afficher sur l'écran vidéo de l'ordinateur, les consignes sont modifiées très rapidement. La boucle de programme qui envoie la consigne sur la ligne I2C est pratiquement instantanée. Tous les moteurs reçoivent alors simultanément une consigne identique et démarrent collectivement. Sur le galvanomètre la pointe de courant arrive en butée vers 1,5A.

Cette intensité est consommée pendant toute la rotation, facilement observable quand la consigne angulaire passe rapidement entre les deux valeurs limites. L'appareil de mesure de la Fig.24 étant configuré en

voltmètre analogique, entièrement électronique, ne montre que durant ces surintensités exagérées la tension en sortie de la source d'énergie s'effondre aux environs de 4,5V.

**NOTE :** Cette expérience a montré qu'il faut commencer par placer le moteur au neutre opérationnel avant de pouvoir caler le palonnier sur l'arbre. Il en sera probablement ainsi pour d'autres manipulations, et en particulier pour l'assemblage de la structure mécanique de la sonde. Donc, par discipline et anticipation, *toutes les expériences de ce type se termineront par un positionnement au zéro des moteurs*, c'est à dire en leur envoyant la consigne de **0.00°** angulaire.

**CONCLUSION :** Une étude préliminaire semble limiter à quatre ou six le nombre de moteurs qui seront simultanément sollicités. Par ailleurs, seize sont contrôlés alors que pour l'heure JEKERT n'en comportera que douze pour se déplacer. Les conditions imposées à la centrale électrique sont donc particulièrement agressives et très éloignées du fonctionnement nominal. *Cette fonction matérielle essentielle passe donc avec une très large marge de fiabilité les tests de validation.*

**07) 16/09/2017 : Les protocoles de dialogue Homme / machine** (MJD 58012)

Mauvaise journée en perspective car les dialogues entre un humain et un ordinateur ne sont jamais très faciles à établir. Aussi, quand sur le planning de la journée nous constatons qu'il va falloir établir des communications entre la sonde et le pupitre de maîtrise local, nous ne nous sentons pas très à l'aise. Le pire, c'est que pour des raisons budgétaires le Terminal de dialogue sera le Moniteur de l'IDE. Aucune dépense particulière pour piloter à distance JEKERT, en contrepartie il va falloir gérer la ligne série, avec toutes ces complications de conversions de chaînes de caractères en nombre. Heureusement qu'à la RMSI nous avons été sérieusement formés à la programmation des puissants petits ordinateurs Arduino. Sans plus tarder on pénètre dans la salle informatique S4. Gentiment, un technicien nous désigne un grand bureau libre sur lequel nous allons établir les protocoles d'échanges entre la machine électronique embarquée et le Terminal de dialogue.

### ► Notions rudimentaires de dialogue Homme / Machine.

Prétendre en un chapitre couvrir intégralement le sujet relève d'une utopie totale, car un livre gros comme une bible n'y suffirait pas. Dans ces lignes, nous allons ne faire qu'effleurer le sujet. Le juste ce qu'il faut pour comprendre comment vont se dérouler les bavardages entre le bel insecte et la console de maîtrise. Pour commencer, on va considérer que la sonde est notre esclave, et nous les maîtres. Dans un tel cas de figure, l'esclave se place à l'écoute et attend une consigne. Dès qu'un message arrive par l'entremise d'un canal filaire ou hertzien, l'esclave l'enregistre. Puis, il en analyse le contenu. Soit il comprend tout, soit dans le texte reçu, un petit chmolductruc n'est pas prévu dans le langage qu'il connaît. Dans les deux cas il **accuse réception** en parlant à son tour. Généralement si l'ordre reçu n'est pas cohérent, l'esclave se remet à l'écoute après



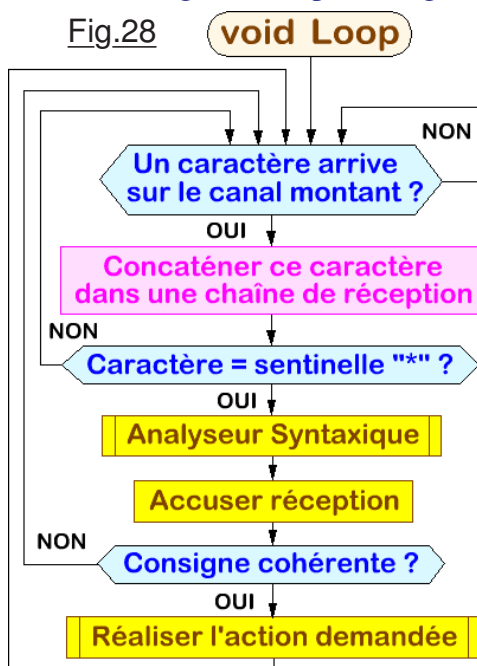
avoir prévenu le maître. Si la consigne est conforme au langage convenu, l'esclave va alors exécuter les actions qui découlent de la tâche imposée.

*Notez au passage que ce type d'échanges est dit en "Mode Alternat" par opposition au "Duplex" pour lequel les deux entités peuvent parler et écouter simultanément. En Alternat un seul canal suffit, alors qu'en Duplex il en faut deux.*

## RESUMÉ d'un dialogue Homme/Machine de type Maître/Esclave :

Comme pour tout échange d'informations entre deux entités, un langage précis a été développé. Ce langage inclus des mots, de la syntaxe, de la ponctuation etc. Généralement élémentaire dans le monde de la technique, il porte souvent le nom de "Protocole conversationnel".

- L'esclave est à l'écoute permanente sur le canal de dialogue.
- Le maître parle et transmet une consigne puis repasse immédiatement à l'écoute.
- L'esclave réceptionne l'ordre et en analyse la syntaxe.
- Syntaxe correcte ou polluée, l'esclave **Accuse Réception**.
- Si la consigne est cohérente, l'esclave réalise les actions associées et repasse à l'écoute. **(1)**
- Si la consigne n'est pas intégralement correcte, l'esclave ne fait rien et repasse à l'écoute.



**(1) :** Éventuellement un deuxième accusé de réception peut être envisagé, message dans lequel l'esclave précise s'il a été en mesure de s'acquitter de la tâche ou si un aléa a empêché son déroulement. C'est le protocole envisagé qui peut imposer cette deuxième transmission.

La Fig.28 résume ce que sera la boucle de base qui animera le gros insecte artificiel. On constate qu'elle ne contient que peu de chose, et codé en C++ ne consommera que quelques lignes de programme. Tout le travail sera effectué dans des sous-routines diverses se chargeant des traitements particuliers dont l'Analyseur Syntaxique entre autres. Les actions effectuées dans les deux premiers tests en bleu et le travail du pavé rose sont incluses dans la procédure `Attendre_une_chaine()`. Cette dernière utilise les routines du langage C++ d'Arduino qui imposent pour stocker le texte reçu dans une `String` de définir une sentinelle qui indique au processus que le message textuel est complet.

### ➤ Les protocoles de dialogue avec la sonde JEKERT.

Établir un protocole de dialogue entre l'humain et une quelconque machine informatique consiste à construire une grammaire stricte aussi simple que possible. Ce que nous devons frapper au clavier ne devra pas nous imposer de constants appels au manuel. Il importe donc de définir des messages aussi "naturels" que possible. Par ailleurs plus ces textes seront courts, moins l'encombrement logiciel sera important. Enfin, les textes choisis pour donner des consignes à la machine devront éliminer toute ambiguïté à l'**Analyseur Syntaxique**, c'est à dire la séquence de programme qui sur la machine qui "écoute" balayera intégralement les informations reçues pour vérifier qu'elles respectent aveuglément et totalement les conventions retenues.

Preliminaires à ce projet, des études initiales semblent démontrer que nous aurons besoin d'envoyer deux types de consignes à notre lointaine voyageuse. En exploitation sur site, globalement on lui demandera d'exécuter l'un des programmes préenregistrés. Toutefois, pour des applications particulières il sera commode de pouvoir imposer une orientation spécifique à un moteur individuel. Bien que sur Mars piloter un seul moteur manuellement sera relativement peu fréquent, pour le développement du logiciel il sera indispensable de pouvoir faire bouger chaque élément individuellement, et tout particulièrement pour les études morphologiques ou des configurations spécifiques. Par ailleurs, pour simplifier le matériel on va instaurer un dialogue de type Alternat.

**Voie montante, voie descendante :** Avant de poursuivre cette étude, vous trouverez un résumé du Protocole Conversationnel retenu dans la [Fiche n°5 Protocoles de dialogues avec la sonde](#).

Il y est fait mention de "voie montante". De quoi s'agit-il ?

Considérons la Fig.29 sur laquelle **S** représente un satellite de télécommunication en orbite terrestre, ou une sonde posée sur Mars par exemple. Au sol une station radio de poursuite peut envoyer des signaux ou en recevoir par son antenne **A**. Par définition les ondes qui partent du sol vers **S** constituent la voie montante **M** quel que soit le nombre de canaux de communication ou leur bande passante. Les ondes qui partent de **S** et qui reviennent vers le sol constituent par définition la voie descendante.

Dans notre cas, les signaux de contrôle sont issus du P.C. Quand la ligne USB transmet vers Arduino, c'est donc la voie montante, alors que les Accusés de réception représentent la voie descendante.

### ➤ La voie montante.

**P**répondérante en termes de convivialité il faut penser "SIMPLE" car c'est elle qui conditionne les ordres envoyés par le terminal informatique. Les messages doivent être les plus élémentaires possibles et immédiats à coder. Aussi, ils commenceront par "**m**" pour une consigne moteur, et par "**p**" pour invoquer un programme. On se cantonne volontairement sur des caractères minuscules évitant ainsi d'avoir à mobiliser la main gauche pour appuyer sur SHIFT. Elle peut alors servir à tenir un moteur dans la main etc. Incontournable pour pouvoir exploiter les chaînes de caractères de type **String** arrivant sur la ligne USB, tous nos ordres devront s'achever par une "sentinelle". C'est un caractère que l'on peut choisir librement et qui indique la fin d'un "bloc" de caractères à réceptionner par le programme. Ce caractère étant arbitraire, j'ai choisi "\*" qui sera facile à vérifier sur les ACR et se trouve sur le pavé numérique. (*ACR : ACcusés de Réception.*) Pour invoquer un programme il suffira d'indiquer son numéro obligatoirement sur deux chiffres. Exemple : **p08\*** ou encore **p12\*** etc. Imposer un caractère "0" pas vraiment utile en tête peut sembler un arbitraire pas très dégourdi. Ce choix s'impose toutefois car le développement du logiciel a montré qu'il permet de simplifier grandement le codage de l'analyseur syntaxique.

**P**iloter manuellement un moteur exige d'indiquer lequel et la position qu'il doit adopter. La consigne sera de la forme : "**mN±PP\***". Le caractère "**m**" précise qu'il s'agit d'une consigne de motorisation. Le paramètre **N** désigne le numéro du moteur et sera compris entre [1 et 12]. **Attention, ne pas mettre un zéro en tête.** Le numéro de moteur sera obligatoirement suivi du signe "-" ou "+" pour la position, y compris pour le neutre opérationnel zéro. Enfin **PP** précise la position angulaire à atteindre codé sur un ou deux chiffres la valeur étant comprise entre [0 et 90].

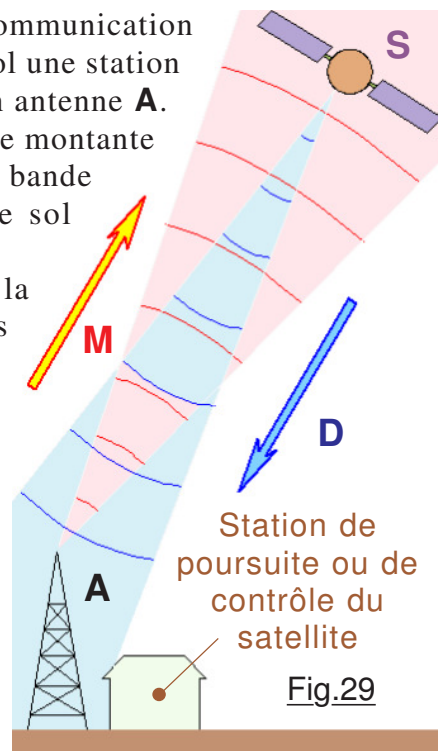
Exemple : "**m2+45\***" placera le moteur n°2 à la position +45°.

"**m11-23\***" orientera le moteur n°11 à la position +23°.

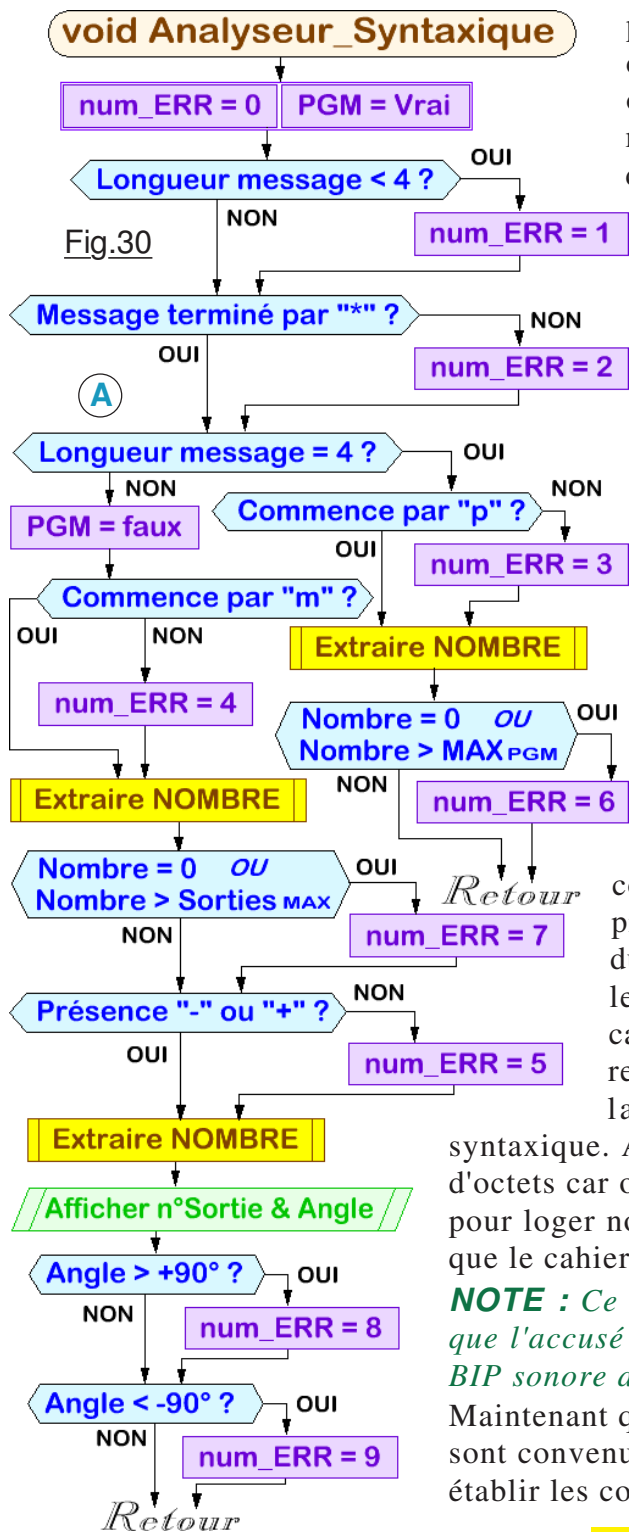
### ➤ L'analyseur syntaxique.

**P**rimordial si l'on désire éviter que la motorisation ne se comporte de façon complètement inattendue, l'esclave qui réceptionne un ordre doit le comprendre intégralement. Si une seule "virgule" n'est pas prévue dans les Protocoles Conversationnels, il ne doit surtout pas "prendre des initiatives". Aussi, si l'humain qui a envoyé un ordre par le clavier s'est trompé, la sonde ne doit strictement rien faire, et se contenter d'accuser réception en précisant qu'elle ne comprend pas ce qu'on lui demande. Pour rendre compte de sa perplexité, JEKERT se contentera de signaler une erreur suivie de sa classification. La [Fiche n°5 Protocoles de dialogues avec la sonde](#) donne la liste des erreurs qui seront détectées par l'analyseur syntaxique. Concrètement, c'est une procédure qui balaye caractère par caractère l'ordre réceptionné et en décortique le contenu. Si ce dernier est conforme au langage défini pour le protocole, elle en extrait les divers éléments pertinents. (*N° de programme à invoquer, n° de moteur concerné, l'angle à balayer et le sens de rotation.*) Dès qu'une incohérence est rencontrée, l'analyse classifie l'erreur détectée, le processus s'arrête et la sonde accuse alors réception en indiquant ce qui ne va pas.

C'est le programme **P03\_Envoyer\_des\_consignes.ino** qui a été utilisé pour développer le dialogue Homme/Machine et nous octroie la facilité de bavarder avec JEKERT. Fiche de







protocole en main, on peut envoyer des messages corrects, des consignes volontairement erronées et observer ce que répond la sonde. Par exemple testez des messages trop longs qui dépassent 15 caractères, des n° de moteur anormaux, oubliez le "m" ou le "p" etc. Tentez d'expérimenter toutes les erreurs répertoriées par l'analyseur syntaxique. Le petit programme démonstrateur fonctionne intégralement sur la ligne USB et avec le Moniteur de l'IDE. Rien n'est obligatoire sur Arduino, mais vous pouvez laisser branchée l'interface et la motorisation. Un petit bruiteur est ajouté et piloté par la sortie binaire D2. Il est clair que sur Mars il n'y aura pas grand monde pour l'écouter. Par contre, quand on développe les programmes, chaque erreur s'accompagne d'un petit BIP d'alerte qui attire l'attention du programmeur. Nous savons alors que l'ordre envoyé n'est pas correct, ce qui incite à regarder l'écran. Vous allez vous rendre compte que focalisant sur le fatras mécanique et électrique, on finit par oublier l'écran de l'ordinateur. Aussi, si un moteur ne fait pas ce qui est attendu, le BIP nous évite de rester dubitatifs en supposant que le programme testé n'est pas correct. On regarde alors l'écran et l'erreur de frappe étant prise en compte on peut réitérer la consigne prévue lors du test actuellement en cours. Notons au passage que c'est le test A qui sur une longueur d'exactly quatre caractères en déduit qu'en principe il s'agit d'une consigne relative à l'appel d'un programme. Enfin, on observe que la détection d'une erreur n'écourte pas l'analyse syntaxique. Ainsi la procédure est plus simple et consomme moins d'octets car on va constater assez rapidement que l'espace mémoire pour loger notre programme risque d'être un peu léger, il se trouve que le cahier des charges est assez ambitieux !

**NOTE :** Ce que ne montre pas l'organigramme de la Fig.28 c'est que l'accusé de réception de type ERREUR engendre également le BIP sonore d'avertissement pour l'opérateur.

Maintenant que les protocoles de dialogue du Maître vers l'Esclave sont convenus des deux cotés de la ligne de transmission, il reste à établir les conventions pour la réponse. (C'est à dire l'ACR)

### ➤ La voie descendante.

Quand c'est au tour de la sonde à bavarder pour rendre compte par un accusé de réception, la ligne USB vers l'ordinateur et l'écran du Moniteur de l'IDE constitue techniquement la voie descendante. Nous sommes en mode alternat. Systématiquement les ACR seront encadrés par un caractère "!" pour en délimiter le début et la fin. Dans le cas d'une consigne "polluée" le programme se contente de retourner un compte rendu de la forme :

**m25+45\* > Sortie 24 Angle 45 !ERR 7!**

Dans tous les cas il y a **recopie du message mémorisé** dont la longueur sera tronquée à sept caractères si on en a frappé plus au clavier avant de valider. (Sept étant l'espace réservé pour la chaîne de réception.) Puis, suivi de ">" la **consigne interprétée**. Enfin **!OK!** si l'ordre est cohérent, soit le texte laconique **!ERR 7!** qui précise la classification de l'erreur. Le message d'alerte s'accompagne comme déjà précisé d'un BIP sonore. Notez que le n° d'erreur correspondra au dernier problème rencontré puisque l'analyse s'effectue intégralement quoi qu'il arrive.

Première brique de l'édifice logiciel : Rédiger une procédure qui pilote en toute sécurité un moteur avec des paramètres "naturels" constitue la fondation sur laquelle sera architecturée l'ensemble du programme. Tout mouvement de la sonde ne sera par la suite qu'une cascade de rotations élémentaires plus ou moins combinées. Écrire une sous-routine évidente à utiliser qui se charge de gérer les butées logicielle est donc fondamental. Le démonstrateur **P04\_Piloter\_un\_moteur.ino** s'avère incontournable, car non seulement il intègre la procédure de base **Traite\_moteur()** mais il se charge également de l'aiguillage logiciel en fonction du fait que la consigne est de type "m" ou de nature "p". Enfin, pour vérifier le bienfondé des choix effectués à ce stade du développement logiciel, le programme **P01** est émulé. Cette fonction ramène les douze moteurs à leurs neutres opérationnels en tenant compte des paramètres du tableau de la Fig.26 qui précise les dispersions de caractéristiques de chaque individu.

**ATTENTION :** Pour pouvoir tirer le meilleur parti de ce démonstrateur, les moteurs sont branchés par ordre croissant de leur ordre de **traçabilité**, c'est à dire le n°1 sur la sortie S0, le n°2 sur la sortie S1 ... le n°12 sur la sortie S11. Si vous possédez plus de douze moteurs, vous pouvez en brancher seize, le programme tolère ce nombre. *(En réalité la limite va jusqu'à 18 car c'est le nombre d'individus disponibles ici et tous ont été passés au crible pour valider la table des valeurs.)*

Comme vous le constaterez en observant le listage de ce petit programme, les butées "électroniques" sont consignées dans un tableau[]. À partir du tableau Fig.26 il est assez indigeste de copier toutes ces valeurs, les risques d'erreurs sont importants. Dans le but de pouvoir vérifier intégralement les données relatives aux butées logicielles, chaque consigne de mouvement s'accompagne d'un compte-rendu à l'écran. Vérifier toutes les valeurs devient alors tout à fait convivial. Par exemple sur la Fig.31 le programme en 1 nous fait un petit rappel du genre :

- **N'oubliez pas de terminer avec "\*" avant de valider votre consigne.**

Puis en 2 et 3 on a positionné deux moteurs. Observez au passage que le programme fait la distinction entre la référence d'un est branché. Enfin en 4 manipulations par avions mentionné

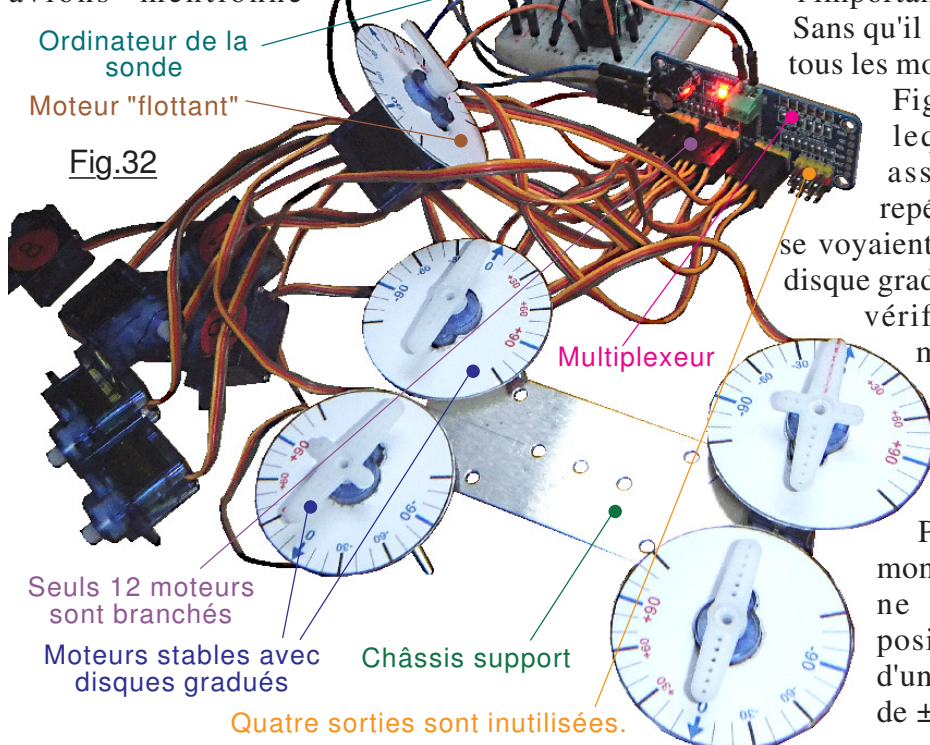


Fig.32

moteur et l'ordre de la sortie sur laquelle il n'oubliez pas de terminer vos l'appel du programme **P01** comme nous en l'importance dans les chapitres précédents. Sans qu'il ne soit indispensable d'immobiliser tous les moteurs sur un quelconque support, la

Fig.32 présente le banc de test sur lequel quatre individus étaient assemblés avec des cadrans de repérage. Les autres dispersés en vrac se voyaient complétés chacun à son tour d'un disque gradué dans l'ordre où les butées étaient vérifiées. Toutefois, avoir plusieurs moteurs bien stables avec leurs disques de repérage s'avère très utile pour vraiment tester **P04\_Piloter\_un\_moteur.ino** et en valider la procédure de base.

Pour finir, nous sommes dans le monde réel, et pas dans de la théorie. Il ne faudra pas s'offusquer si le positionnement consigné est affecté d'une imprécision pouvant aller jusqu'à de  $\pm 5^\circ$  au cours du temps.



## ➤ La crise du logement.

L'avancement du projet est conforme aux prédictions du planning. Tout va pour le mieux, car le dialogue Homme/Machine est en place, la sonde est sous contrôle. L'interface de puissance ainsi que la centrale électrique sont validées. La procédure de gestion des moteurs semble avoir fait ses preuves. Bref la sérénité devrait prendre le devant de la scène ... et pourtant une ombre maléfique plane. En effet, si l'on résume la situation, pour le moment JEKERT n'est pas en mesure de se déplacer. Tout juste si ce petit robot est capable de mouvoir une articulation alors qu'il reste tant à programmer. Quand on consulte le listage de [P04\\_Piloter\\_un\\_moteur.ino](#) on constate que ce trois fois rien opérationnel consomme déjà 10698 octet dans la mémoire de programme soit environ 34% de la place disponible. Quand aux variables dynamiques, avec 595 octets on dilapide déjà 29% de l'espace vital. À ce régime la saturation va se précipiter et l'on ne pourra pas engager notre belle sonde dans les actions qui encombreront notre rêve.

Pondérons ce pessimisme. L'expérience prouve depuis longtemps que dans un programme compilé, ce sont généralement les premières lignes du code source qui amassent beaucoup d'instructions. On ne s'en rend pas compte, car c'est transparent utilisateur. Par exemple :

`void setup()` {} suivi de `void loop()` {} consomment déjà 450 octets soit 1%. Pourtant nous avons là un programme qui ne fait strictement rien ... en apparence. En réalité le compilateur se charge sans nous le dire d'initialiser la PILE, le TAS, les interruptions, les broches d'E/S ...

Ajoutons dans `void setup()` {} les deux lignes :

```
Serial.begin(115200);
```

```
Serial.print("Bonjour");
```

Le programme passe à 1736 octets soit 5% de l'espace disponible et 190 octets en mémoire dynamique. Pourtant ce démonstrateur ne fait qu'afficher "Bonjour" sur la ligne USB. C'est normal, car il faut intégrer toutes les routines qui permettent des échanges sur la ligne série.

On enlève les instructions de la ligne de dialogue USB et l'on ajoute à peine de quoi faire bouger un moteur soit, toujours dans `void setup()` {} on place :

```
pwm.begin(); // Initialise le module multiplexeur
```

```
pwm.setPWMFreq(50);
```

```
pwm.setPWM(2, 0, 1000);
```

précédé des déclarations :

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <Adafruit_PWMServoDriver.h>
```

```
Adafruit_PWMServoDriver pwm = Adafruit_PWMServoDriver();
```

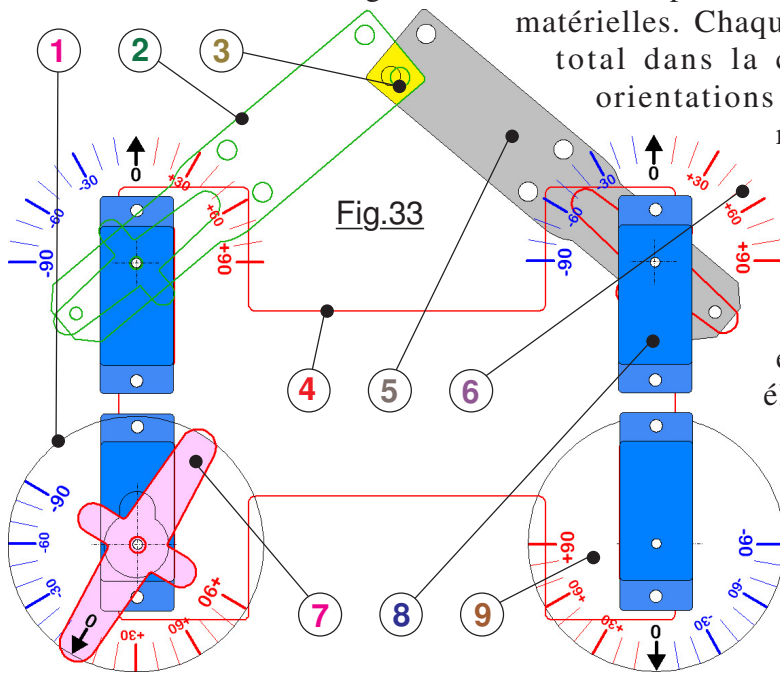
Ces quelques directives et instructions consomment à elles seules 3532 octets de programme et 218 octets de RAM dynamique. On ajoute un petit "Bonjour" et le programme passe à 5214 octets soit 16% de l'espace disponible avec 399 emplacements dans la PILE soit 19%. Autant dire que dans ce contexte "*un trois fois rien c'est déjà quelque chose*" est particulièrement d'actualité.

Restons sereins, car une fois que les procédures et fonctions de services sont compilées, s'en servir ne consomme plus que quelques octets pour y faire appel et quelques emplacements pour les passages de paramètres. C'est généralement dans la mise en place du noyau que l'on doit déclarer les variables qui seront utilisées. Elles se taillent également une bonne partie de l'espace possible. Plus le projet avance, moins on aura besoin de nouvelles variables.

**CONCLUSION :** Statistiquement les premières briques de l'édifice gloutonnent les octets par paquets de cent. L'expérience prouve qu'ensuite la boulimie va en diminuant, alors que le travail effectué par le logiciel semble de plus en plus conséquent. Il n'y a donc pas lieu de s'alarmer pour le moment, les événements devraient logiquement se conformer "aux statistiques".

**Perspectives :** Les précisions qui précèdent, issues d'une expérience personnelle découlent, il faut le préciser, d'une optimisation à outrance de mes programmes. Optimisation pour choisir au mieux le type des variables et des constantes pour minimiser leurs tailles en mémoire. Les procédures et les fonctions sont optimisées également dans ce but. Par exemple vous pouvez observer la présence de `void Espace() {Serial.print(" ");}` dans les démonstrateurs. Une procédure pour afficher un espace ! Et bien oui, car à chaque appel on gagnera quelques octets ...

**B**ien que la structure globale de JEKERT soit globalement plus ou moins déterminée, il reste encore pas mal de pistes à débroussailler. Dans les grandes lignes, le châssis est presque déterminé, les membres des pattes sont plus ou moins définis ainsi que les contours des pièces principales. Aussi, quand nous pénétrons dans la salle S2 où s'affèrent les dessinateurs sur leurs consoles informatiques, nous sommes tout émoustillés à l'idée de pouvoir consulter les premiers plans. Nous allons au terminal référencée **visionneuse SPLAN-VIEWER.EXE**, passons notre doigt sur le capteur d'empreintes digitales et amenons sur l'écran de son ordinateur le fichier nommé **Sonde Jekert.spl** pour consulter l'onglet [Dessins des pièces mécaniques]. Chaque élément important de ce qui va constituer le squelette du petit robot est représenté avec précision en respectant l'échelle des dimensions. Il sera ainsi possible de pouvoir réaliser tous les dessins d'ensemble que l'on veut, vérifier les angles de débattement possibles, les risques de collision et interférences



matérielles. Chaque posture étudiée consiste à représenter le total dans la configuration matérielle respectant les orientations exactes de tous les éléments. Une telle représentation constitue une épure. Plusieurs postures sont envisagées, il reste à les définir avec précision avant de les programmer. Dans ce but il est tout à fait possible d'ajouter les cercles gradués. Pour saisir tout le parti que l'on peut tirer d'une épure et les diverses façon d'y représenter des éléments mécaniques, considérons la Fig.33 sur laquelle la future machine est représentée en vue de dessus. Les éléments peuvent être représentés en "surface" comme en 5 et 8, ou sous forme filaire comme en 2 et en 4 pour le châssis. Les tracés seront généralement épurés en enlevant les axes de symétrie ou en ne représentant que le minimum utile. Par exemple pour 4 les trous centraux ne sont pas représentés. On peut aussi y ajouter des repères géométriques comme par exemple en 9 pour le disque gradué, ou en 6 pour la version la plus simple. Une telle épure est indispensable pour étudier la morphologie à adopter pour la structure définitive. Sur ce dessin on constate que déjà sans les autres membres, les deux jambes interfèrent dans la zone jaune alors que la rotation n'est que de 50° pour les deux pattes. On sera certainement amenés à décaler la position du palonnier par rapport au neutre opérationnel comme montré en 7 avec un disque gradué 1 tourné de l'angle correspondant par rapport à l'axe du moteur. Ainsi il y aura correspondance entre les ordres de rotation et la position effective de la patte concernée. **En résumé : Toute machine mécanique doit bénéficier d'une étude initiale poussée pour en déduire ses caractéristiques**, ses faiblesses, les limites à imposer etc.

**P**our l'étude détaillée de la mécanique de cette sonde, personnellement j'utilise le logiciel de dessin dont les fichiers peuvent se consulter avec la **visionneuse**. Ce petit programme gratuit ne vous permettra pas, à l'instar de la Fig.33, de créer ou modifier des épures. Vous ayant fourni les dessins, vous pourrez à convenance les imprimer, découper les pièces, utiliser des punaises pour simuler les articulations. Ainsi, il vous sera aisé, comme à l'ancienne quand les tables à dessin avec de grands pantographes encombraient les salles de conception, d'étudier à votre guise des maquettes animées et surtout à l'échelle. C'est un impératif pour pouvoir déduire des conclusions fiables d'un découpage. La page contenant la représentation des pièces de JEKERT est complétée naturellement par deux représentations des disques gradués respectant l'échelle commune. Enfin la page des pièces dispersées est complétée par une règle graduée pouvant s'il le faut servir à mesurer des cotes sur l'épure. Que ce soit par la technique "Papier/Ciseaux" ou sur l'ordinateur, nous possédons tous les outils qui vont servir à étudier en détail la morphologie de l'insecte quadrupède. Du reste c'est précisément ce qui semble imposé sur le planning comme occupation de la prochaine journée qui s'annonce particulièrement chargée. Demain est un autre jour ...

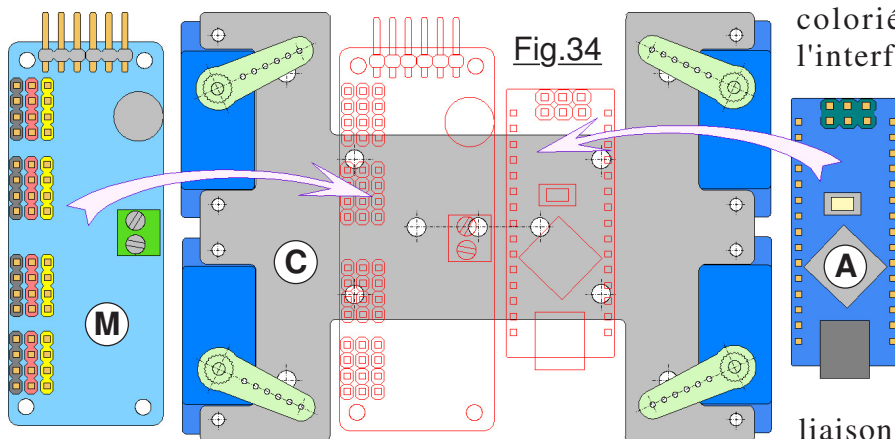


## 10) 19/09/2017 : La structure globale de JEKERT (MJD 58015)

**A** vant de s'engager dans une étude indigeste de l'agencement précis des éléments de la sonde martienne, toujours dans la salle de conception mécanique S2, nous allons sur le grand bureau qui nous est réservé ouvrir le dessin d'ensemble qui traduit les grandes lignes de la machine suite à des études préliminaires. Il est clair qu'à ce stade du projet trop d'inconnues empêchent de définir la structure définitive. Il faut bien partir d'une ébauche qui ensuite sera affinée en fonction de l'évolution du projet. Ce beau dessin, provisoire et probablement obsolète, représente uniquement l'ossature du corps de l'insecte très dépouillée. C'est à nous que revient la mission de l'étoffer.

### ➤ La structure de base pour réunir ordinateur et interface.

**L'** analyse des contours et des trous définies pour le châssis nous convainc immédiatement que l'électronique qui équipera la sonde n'y trouve pas sa place. Aucun des trous disponibles n'ont des entraxes correspondant aux deux modules. Le défi à relever est résumé sur la Fig.34 avec en gris le châssis en **C** sur lequel sont représentés en bleu les moteurs munis des palonniers courts



coloriés en vert clair. En **M** se trouve l'interface multiplexeur et ses nombreux connecteurs. En **A** la petite carte électronique Arduino NANO. Pour le multiplexeur aucun trou sur **C** ne correspond. Quand au petit ordinateur, aucun trou de passage de vis ou de tiges filetées n'est présent pour l'immobiliser. Il nous faut donc ajouter des supports adaptés qui seront en liaison complète avec le châssis.

**P** our pouvoir immobiliser la carte Arduino, on sera impérativement dans l'obligation de concevoir un petit circuit imprimé sur lequel seront soudées deux rangées de connecteurs HE14 séparés de l'écart correspondant aux lignes des broches de **A**. Ce circuit supportera aussi le BUZZER, divers connecteurs de liaison avec le reste de l'environnement, et probablement quelques résistances. L'idée initiale consiste à utiliser les trous disponibles sur la zone centrale de **C** pour y fixer une plaque isolante complémentaire. Ensuite, c'est sur cette dernière que seront à leur tour assemblés par de la visserie idoine les deux modules **M** et circuit imprimé spécifique supportant Arduino.

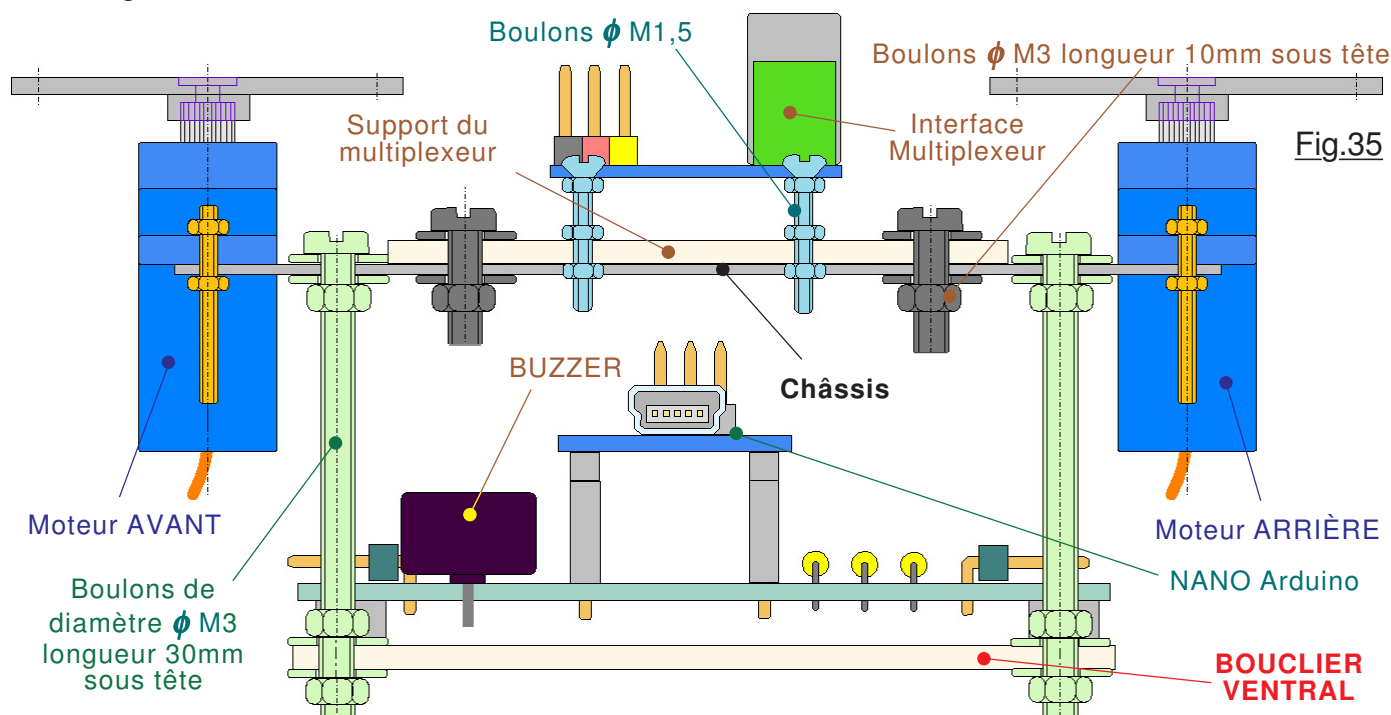
### ➤ La bestiole robotique prend corps.

**C** ette première étude concerne le corps de la sonde, (*D'où ce jeu de mots facile pour le choix du titre !*) sans se préoccuper de la distribution des membres. (\*) Une première estimation laisse à penser que le multiplexeur doit se trouver sur le dessus, ne serait-ce que pour une distribution des liaisons avec les moteurs qui risque moins de "coincer" sur le dessous. Par ailleurs cette configuration place plus bas le châssis, diminuant l'encombrement global et surtout améliore la stabilité de la machine. On se rend rapidement compte qu'il n'est pas possible de placer sur le dessus à la fois Arduino et le multiplexeur. (*Manque de place et limitation de l'amplitude de rotation des fémurs.*) Aussi, le module Arduino et le circuit imprimé qui le supporte seront immobilisés sur le dessous. Trois raisons principales imposent la présence d'un bouclier ventral. Ce dernier offrira une protection thermique (*Frottements cinétiques.*) quand le petit vaisseau effectuera sa plongée vertigineuse vers le sol. Puis, trois parachutes vont s'ouvrir en cascade pour procéder au freinage. Le premier le plus petit sera ouvert à haute altitude, quand la sonde présente une vitesse considérable. Puis, vitesse

(\*) En réalité l'étude se concentre sur le corps de l'appareil, *mais les solutions adoptées tiennent compte d'un nombre considérable d'épures qui ont été réalisées pour aboutir à ces conclusions.* Ces recherches seront abordées dans les chapitres relatifs à l'optimisation morphologique de la structure de notre machine. Par ailleurs, il est impossible de dégager des observations fiables de dessins qui ne seraient pas exécutés avec précision **ET** respectant l'échelle des dimensions. C'est un pléonasme en conception mécanique. Aussi, tous les croquis utilisés et publiés respectent cette rigueur. Pour alléger le propos, ce ne sera plus mentionné dans ce tutoriel.

réduite dans de fortes proportions, un deuxième parachute va continuer le freinage. Enfin, à environ deux kilomètres du sol, une troisième grande corole va se déployer. JEKERT va alors descendre relativement lentement. L'impact avec le sol sera malgré tout "traumatisant", surtout si le poser est en biais ou que la sonde se pose sur un caillou assez proéminent. Il n'est pas question dans ces conditions que l'atterrissage se fasse sur les pieds. Les pattes seront escamotées, et l'animal se posera sur le ventre ... muni dans ce but du bouclier de protection mécanique.

Troisième critère incitant à munir la structure d'une surface de sustentation ventrale : Le mode veille pour lequel les jambes sont relevées et les pieds ne touchent plus le sol. (*Explications plus loin ...*) Enfin, le bouclier mécanique facilitera l'assemblage de la sonde sur son berceau quand elle sera intégrée dans le lanceur Ariane.



Le dessin de la Fig.35 montre la sonde vue de côté. Les palonniers des moteurs sont dans l'orientation longitudinale. La position du bouclier ventral est choisie pour pouvoir utiliser des vis  $\phi M3$  du commerce faciles à trouver, et laisser suffisamment de place sous le châssis pour y loger sans trop de problème la carte Arduino. Ces deux critères doivent de plus éviter un encombrement ventral trop important pour ménager "une garde au sol" suffisante. La solution adoptée constitue un compromis qui semble acceptable. Les deux plaques support en matériau isolant font 2mm d'épaisseur.

**NOTE :** Pour permettre un maximum de souplesse lors des études futures, le circuit imprimé qui supporte Arduino est prévu le plus grand possible compatible avec les contraintes d'encombrement. Il présente pratiquement les dimensions du bouclier ventral. À ce stade des études on estime que la carte Arduino sera centrée latéralement, le reste comme la position du BUZZER n'est que vague conjecture, le circuit imprimé n'étant pas encore étudié finement. Il faut attendre de savoir exactement tout ce qui y sera soudé, quand les études seront suffisamment avancées.

Pour que vous puissiez réaliser des recherches personnelles menées avec des épures fiables, outre les dessins des diverses pièces mécaniques de la sonde, vous disposez avec la **visionneuse** des représentations en trois vues et à la même échelle pour la petite carte Arduino et pour le multiplexeur. Il reste à mon sens une petite pierre d'achoppement : Que ce soit pour assembler les moteurs ou pour immobiliser le multiplexeur, il faut trouver des vis ou de la tige filetée au diamètre assez peu courant  $\phi M1,5$  ainsi que les minuscules écrous associés. Ce type de visserie n'est généralement pas disponible dans la quincaillerie du coin, et pas facile à trouver sur Internet. Pour ma part je disposais d'une quantité suffisante de vie et d'écrous de récupération. Coupées à une longueur de 13mm à 14mm les longues vis m'ont permis de dégager assez de petites tiges filetées pour assembler les moteurs. Aussi, je vous souhaite de résoudre facilement cette difficulté. Ensuite, construire le petit robot imposera du soin et de "la tendresse" mais n'opposera aucune difficulté. On va pouvoir respecter le planning ... tout va bien !



## 11) 20/09/2017 : Réception / validation des éléments mécaniques (MJD 58016)

Belle journée qui s'annonce, car on vient de me prévenir sur mon Bippeur qu'un transporteur a livré les divers éléments mécaniques qui vont matérialiser le squelette de notre petite sonde interplanétaire. Quand j'entre dans la salle d'usinages mécaniques S1 je suis impatient de pouvoir contempler ces belles réalisations. Les techniciens présents ont procédé au déballage et à l'inventaire. Cette première phase est tout à fait satisfaisante. Il nous reste à vérifier la conformité au cahier des charges fonctionnel. Toutes les pièces livrées sont découpées par cisaillement dans de la plaque d'aluminium d'environ 0,8mm d'épaisseur. Ce type de fabrication laisse les "tranche" latérales rugueuses et un peu coupantes. La première amélioration consiste à systématiquement arrondir tous les pourtours et les orifices rectangulaires avec du papier abrasif très fin.

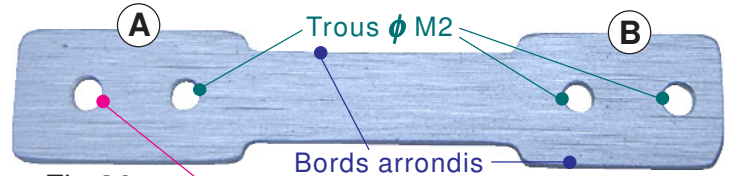
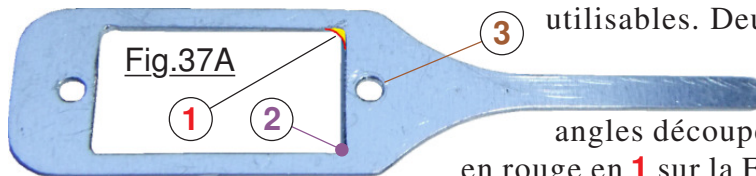


Fig.36 Trous chanfreinés avec un petit foret.

Puis, les trous ronds sont chanfreinés avec un petit foret affûté à 45°. La Fig.36 est trompeuse. Photographiée en "macro" cette pièce ressemble à une grosse poutre de chantier de charpentes métalliques. Elle est minuscule. Observez au passage que le tenon de gauche est légèrement plus long que celui de droite ce qui pour l'application envisagée est du reste sans importance.

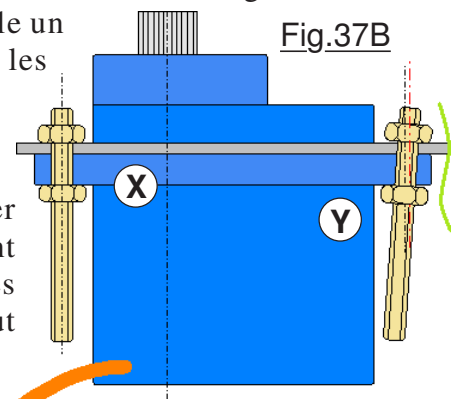
### ➤ Constats mécaniques et rectifications des pièces de l'ossature.

Compte tenu des petites dimensions des pièces fournies, il faut peu de chose pour que "ça coince". Nous sommes dans le domaine de production en série pour des applications "grand public". Autrement dit les coûts de fabrication sont tirés vers le bas au maximum. Ce que nous recevons avec le KIT a le grand mérite de nous épargner la création de petites pièces pas forcément à la portée de tous les bricoleurs. Ceci étant précisé, il nous faut les peaufiner pour les rendre utilisables. Deux types de corrections seront indispensables.



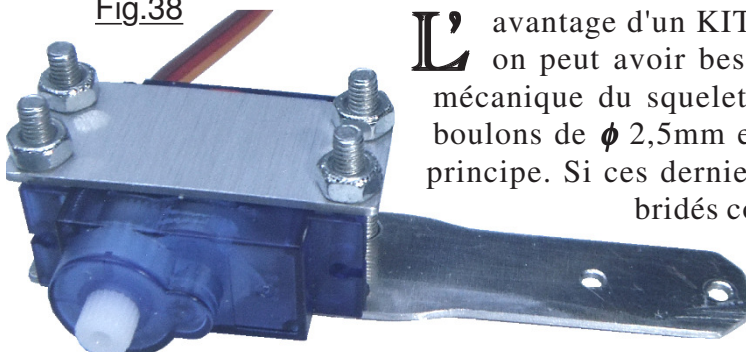
Le premier est relatif aux ouvertures dans lesquels sont logés les servomoteurs. Les angles découpés présentent un petit arrondi comme souligné en rouge en 1 sur la Fig.37A qu'il faut impérativement éliminer. En

effet, les corps des servomoteurs sont parfaitement anguleux et refusent de s'insérer dans les ouvertures ou les encoches. Donc tous les coins tels que 2 doivent être limés à angles droits. Le deuxième type de difficulté est représenté sur la Fig.37B sur laquelle un moteur est immobilisé sur une pièce de la structure. L'entraxe entre les deux trous percés sur la pièce en aluminium n'est pas exactement identique à celui des deux trous de passage des vis sur la semelle du moteur. Le premier boulon en X se place correctement. Le deuxième par contre, comme en Y, soit n'acceptera pas de traverser l'ensemble, soit se positionnera en biais la portée des écrous étant alors incorrecte. Il importe donc de passer en revue l'intégralité des implantations de la motorisation, et d'allonger le juste ce qu'il faut les trous de passage des vis récalcitrantes. C'est le cas en 3 sur la Fig.37 qui montre que très peu d'allongement est suffisant pour nous sortir de ce mauvais pas.



### ➤ Visserie incorrecte.

Fig.38



L'avantage d'un KIT c'est qu'il contient généralement tout ce dont on peut avoir besoin. Dans le coli contenant les petites pièces mécanique du squelette, on trouve également une flopée de petits boulons de  $\phi$  2,5mm en nombre suffisant pour tout assembler ... en principe. Si ces derniers conviennent parfaitement pour les moteurs bridés comme sur la Fig.38, il en va tout autrement pour l'assemblage des moteurs sur les autres pièces. Déjà quand on consulte la Fig 39 on constate visuellement que sur la



Fig.39

semelle des servomoteurs le trou de passage ne fait que 2mm de diamètre. Les vis de  $\phi$  2,5mm refusent obstinément de traverser, sauf si l'on s'aide d'un marteau ! Une solution consisterait à tarauder le trou de passage des vis à  $\phi$  2,5mm cette option a toutefois été écartée pour deux raisons. La première à cause du fait que le trou n'est pas cylindrique, la semelle est fendue. Pour

la résistance du matériau le tenon risquerait de s'écarter. On repercerait évidemment le trou à environ 2,7 mm de diamètre. Mais la tête de vis n'aurait pas assez de place entre le trou et le corps du moteur. Il est manifeste que sur le châssis les trous de liaison pour fixer les moteurs sont bien plus petits que ceux des vis  $\phi$  M2,5. Sur la Fig.40 on voit en **2** le trou de  $\phi$  3mm à travers lequel passera la vis qui solidarise en dessous le bouclier de protection. En **3** un trou également de 3mm de diamètre pour immobiliser la petite plaque qui sur le dessus soutiendra le module multiplexeur. Enfin en **4** il est visuel que le trou prévu pour la liaison des servomoteurs est plus petit que la vis **5** de diamètre  $\phi$  M2,5. Manifestement la partie filetée est plus grande que le trou de passage. **Cette visserie n'est donc pas utilisable.**

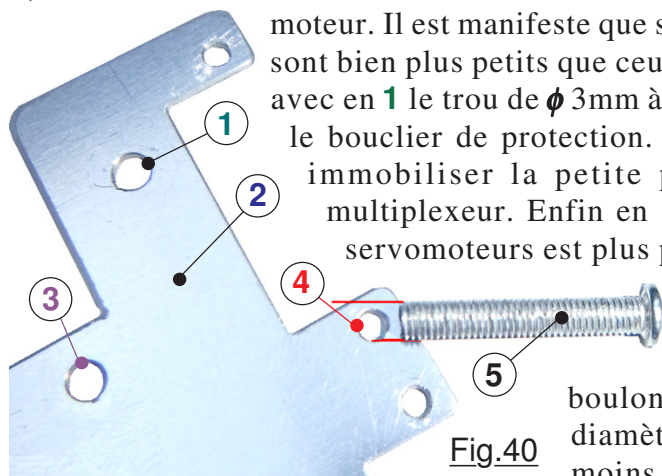


Fig.40

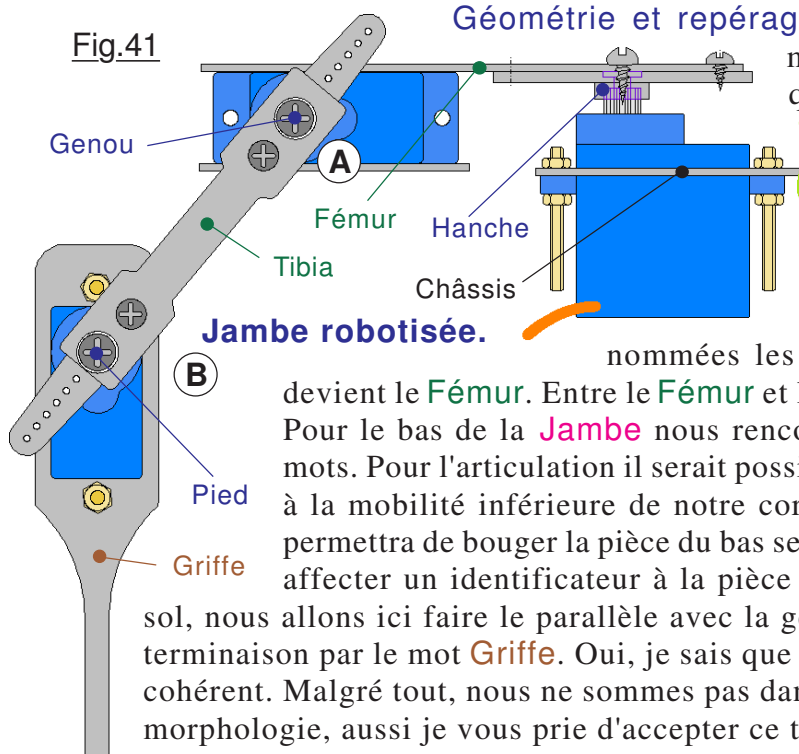
La seule solution "propre" consiste à trouver des boulons, des tiges filetées et les écrous associée pour un diamètre de  $\phi$  M1,5. Et encore, avec de telles vis pour le moins pas très courantes, il faut légèrement agrandir les

trous de passage pour qu'elles puissent traverser librement. Je vous souhaite de trouver facilement une adresse sur Internet pour approvisionner ce type d'accastillage. Pour ma part je n'ai pas trouvé, ceci dit, il y a longtemps que vous savez que dans ce domaine je ne suis pas du tout dégourdi ...

### ➤ L'anatomie de la petite sonde.

P our suivre ce didacticiel va inévitablement nous imposer de détailler les mouvements du petit insecte. Pour décrire les approches de l'animation de cette machine robotisée, il faudra que nous ayons un **langage commun pour en désigner les organes fonctionnels** participant à la motricité. Bien que souvent il sera fait références aux pattes du petit animal, pour la désignation officielle des éléments fondamentaux je vous propose un parallèle osé avec les jambes du genre humain. Nous allons dans ce petit chapitre **définir une terminologie** commune aussi simple et évocatrice que possible, évitant pour la suite du didacticiel d'avoir en permanence à utiliser la fiche nommée

### Géométrie et repérage des articulations



pour savoir de quel membre ou de quelle articulation il est question. Cette fiche en outre précisera aussi

les références des moteurs qui animent les différentes articulations du petit insecte. Comme ce sont les moteurs immobilisés sur le châssis qui globalement assureront les translations longitudinales, comme pour les humains leurs articulations seront

nommées les **Hanches**. Du coup le membre associé

devient le **Fémur**. Entre le **Fémur** et le **Tibia** on trouve "naturellement" le genou. Pour le bas de la **Jambe** nous rencontrons un petit problème pour choisir les mots. Pour l'articulation il serait possible d'employer les vocables savants relatifs à la mobilité inférieure de notre corps ... bien trop compliqué ! Aussi, ce qui permettra de bouger la pièce du bas sera nommé le **Pied**. Comme il faut également affecter un identificateur à la pièce mécanique qui viendra en contact avec le sol, nous allons ici faire le parallèle avec la gente animale. Je propose de désigner cette terminaison par le mot **Griffe**. Oui, je sais que ce mélange des genres n'est pas totalement cohérent. Malgré tout, nous ne sommes pas dans le cadre d'une soutenance de thèse sur la morphologie, aussi je vous prie d'accepter ce triste compromis.



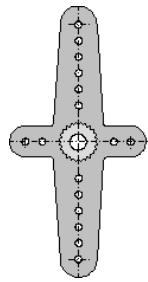
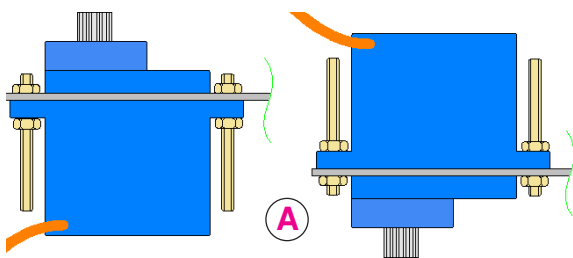
## 12) 21/09/2017 : Une combinatoire explosive (MJD 58017)

Hier toute l'équipe s'est mobilisée. Les différentes pièces livrées ont été reprises à l'atelier d'usinage encombré de machines précises à commandes numériques. Elles sont toutes déclarées bonnes pour le service. Un technicien a également fait le déplacement avec l'un des véhicules de service de la société pour aller chercher dans une entreprise spécialisée à plus de 200km d'ici toute la visserie particulière dont nous aurons besoin. C'est parfait, pour le moment l'avancement des travaux n'est pas interrompu. Pour ce jour, le planning prévoit les études préliminaires visant à conduire l'assemblage réfléchi de tous les éléments principaux de la petite sonde.

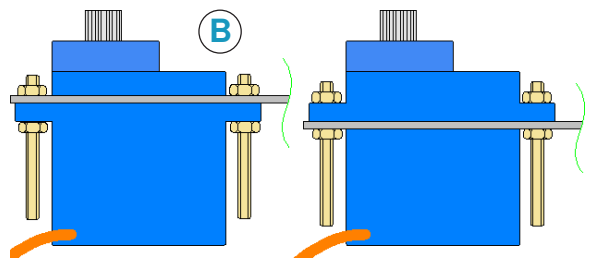
### ➤ Inventaire des arbitraires. (Variables d'agencement de la structure.)

Impossible de trouver le dossier d'assemblage ... et pour cause : Les équipes chargées des études préliminaires n'ont défini que globalement la structure de la sonde martienne, c'est à dire le nombre de pattes, les dimensions des organes animés ainsi que la motorisation. C'est volontairement qu'il n'ont rien avancé sur la façon d'assembler ces divers éléments, pour ne pas scléroser l'imagination de ceux qui seront chargés des optimisations, c'est à dire ... nous ! Donc, avant de se prendre la tête pour déterminer qui va où, faisons l'inventaire des possibles. Ensuite il restera à faire des choix, et de les justifier. Comme chaque fois que des variantes sont potentiellement possibles, nous aurons à agencer une combinaison la plus "intelligente" possible et serons confrontés à de la combinatoire. Ce sera justifié plus avant, cependant le choix des **palonniers** se porte sur les **modèles longs** et **non cruciformes** sauf pour ceux des hanches, car dans ce domaine nous avons encore trois possibilités.

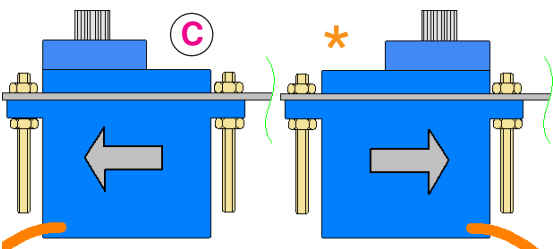
Moteurs du châssis Dessus / Dessous



Semelle moteur Dessus / Dessous



Sortie Moteur Extérieur / Intérieur



Liaison Pièce/Palonnier Extérieur / Intérieur

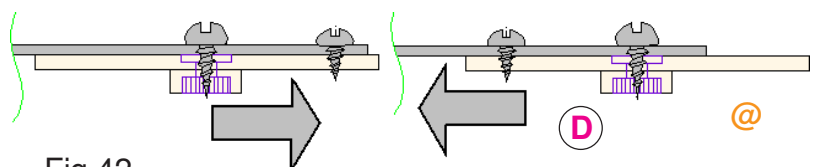


Fig.42

Moteurs Genou Dessus / Dessous : (E)

Tibia coté Genou choix @ : (F)

Moteurs Genou choix \* : (G)

Tibia tenon long Haut / Bas : (J)

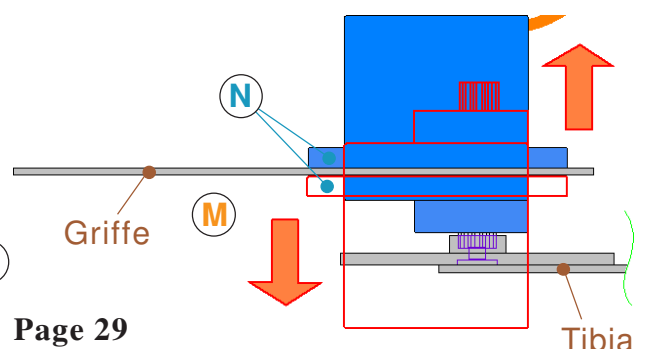
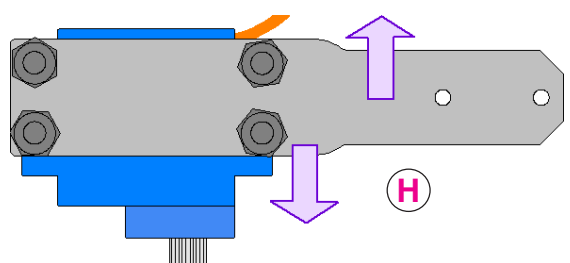
Tibia coté Pied choix @ (K)

Moteurs Pied choix \* : (L)

Moteurs Pied Intérieur / Extérieur : (M)

Moteurs Pied Semelle Intérieur / Extérieur : (N)

Moteur Genou Intérieur / Extérieur



**A** ce stade de l'inventaire, on peut déjà dénombrer 13 variables de type OUI/NON. N'importe quel mathématicien peut en conclure qu'il existe 13 à la "puissance deux" combinaisons possibles soit 8192 variantes potentielles. Et encore, quand on insère le manchon des palonniers sur la sortie moteur qui est dentelée, par rapport au neutre opérationnel nous avons environ 6 orientations libres. C'est donc dans 49152 variantes toutes crédibles que l'on va devoir en choisir une. Et encore, ce nombre suppose qu'un choix arbitraire mentionné sera imposé symétriquement sur la sonde, excluant les "alternes / internes". Ben ... c'est une étude qui s'annonce pour le moins indigeste !

### 13) 22/09/2017 : Optimisation de la morphologie de JEKERT (MJD 58018)

**E**tude dont on ne peut absolument pas faire l'économie, on va devoir examiner chaque possibilité, faire un choix et surtout le justifier, c'est à dire orienter la décision en fonction de critères techniques objectifs. S'il s'agissait de créer un petit robot ludique, uniquement pour se faire plaisir, on assemblerait fébrilement sans se poser de questions. Dans le spatial, l'improvisation est exclue du dictionnaire. Tout doit se voir OPTIMISÉ, c'est d'autant plus justifié que ça ne coutera que le salaire de deux ou trois ingénieurs sur disons trois à quatre jours. Des sommes dérisoires où les budgets habituels sont chiffrés en méga Euros. Aussi, avant d'avoir enfin le plaisir de prendre les clefs et les tournevis, on doit obligatoirement passer par la case CONCEPTION MÉCANIQUE. Retour dans la salle S2, on distribue les études aux trois ingénieurs disponibles ce jour julien 58018. Les consignes sont claires concernant les critères à prendre en compte :

- *Minimiser les efforts qui seront soumis aux paliers des moteurs et à leurs engrenages internes,*
- *Permettre la plus grande amplitude des mouvements élémentaires dans chaque articulation, associées aux nombreuses postures qui seront envisagées en fonction des phases de la mission,*
- *Éliminer autant que possible les risques d'interférences matérielles dans la structure,*

#### ➤ Justification du choix des palonniers.

**P**lusieurs principes généraux en mécanique dominent le monde de la conception. Pour aider à effectuer nos choix nous allons naturellement y faire appel, tout en tenant compte des consignes claires qui nous ont été imposées. Ces préceptes fondamentaux en conception mécanique sont résumés

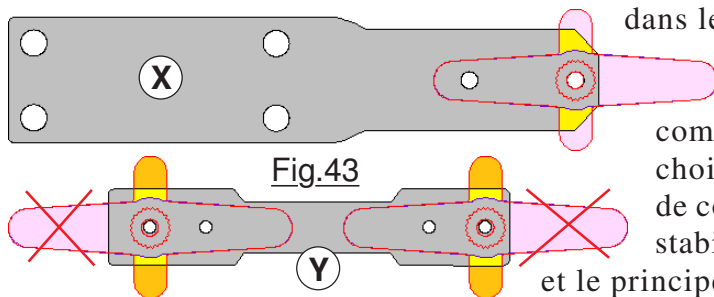


Fig.43

dans le petit encadré figurant à la fin de ce chapitre.

Considérons la Fig.43 en **X** qui représente le **Fémur** vu de dessus dans le cas d'une combinaison **D** extérieure. On constate que le fait de choisir un palonnier cruciforme augmente la surface de contact dans les proportions coloriées en jaune. La stabilité entre les deux éléments n'en sera que meilleur

et le principe n°1 est satisfait. Pour le **Tibia** en **Y** on constate que le gain de surface en jaune est très faible au regard du dépassement des parties colorées en orange. On propose donc de privilégier le principe n°2. Par ailleurs les dépassements roses sont préjudiciables au principe n°2, donc on choisira des **Palonniers Courts sur le Tibia**.

*Certains d'entre vous vont certainement penser que dans ces choix nous sommes en présence de "gagne petit". Soit, mais l'ennemi le plus dangereux d'un concepteur, c'est l'arbitraire. L'expérience séculaire montre que dans le domaine industriel "le hasard ne fait jamais bien les choses". Il s'agit plus d'un mode de pensée d'autant plus justifié dans ces lignes, que l'on s'est proposé de pousser au maximum les analyses. Alors "gagne petit" ou non nous justifierons le maximum de choix envisagés. Par ailleurs, n'oublions pas que dans le monde industriel, ce sont les décisions qui sont prises tout au début d'un projet qui engagent le plus, c'est à dire celles qui auront les conséquences les plus pénalisantes si l'on s'est trompé. Autant dire qu'à ce stade il vaut mieux cogiter au mieux !*

**Principe n°1 :** Quand deux pièces sont assemblées en liaison complète, il faut rechercher la plus grande surface possible pour la zone de contact entre les deux éléments mécaniques.

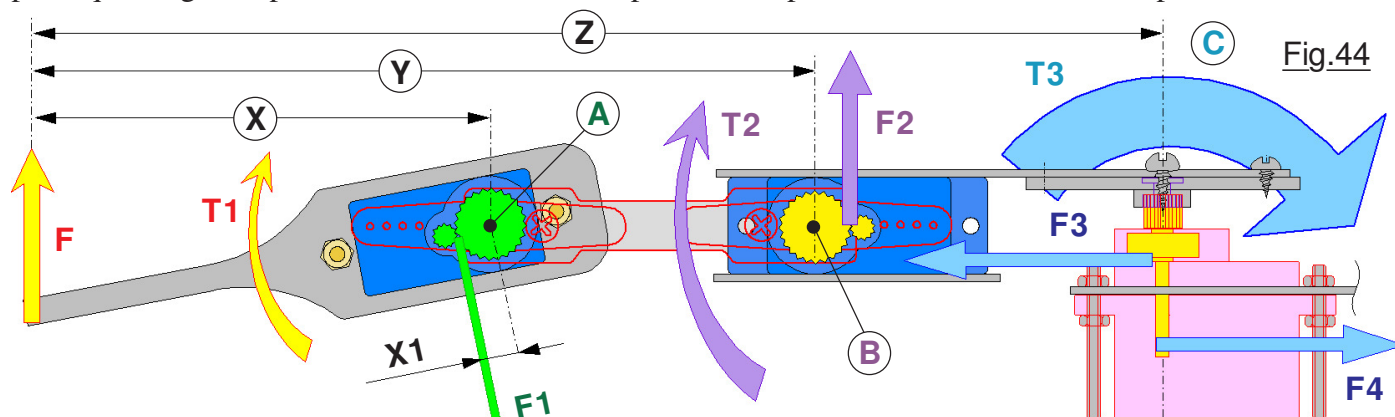
**Principe n°2 :** Compatible avec la résistance des matériaux, minimiser les encombrements du mécanisme ce qui diminuera les risques d'interférence avec son environnement.

**Principe n°3 :** Si plusieurs configurations sont possibles et équivalentes en performance, sélectionner celle qui minimise les efforts sur les éléments mécaniques.



## ➤ Propagation des efforts dans un mécanisme

**A**nalyser la configuration à adopter pour les diverses liaisons mécaniques de notre machine devra forcément tenir compte de l'influence de l'option adoptée sur les efforts qui vont soumettre les éléments à des contraintes qu'il faudra chercher à minimiser. (*Principe n°3.*) Il nous faut impérativement comprendre comment les efforts se transmettent de pièce mécanique en pièce mécanique voisine. Pour cela, analysons la Fig.44 qui présente l'une des **Jambes** dans la pire configuration envisageable, c'est à dire quand elle est déployée "de tout son long". Il s'agit bien évidemment d'un cas extrême qui sera exclus des configurations en exploitation. En effet, dans cette posture la sonde reposera sur le bouclier. Il faudrait un rocher sur le coté particulièrement haut pour que la griffe porte dessus. Néanmoins pour les explications les effets sont "plus visuels" ...



En **F** est représentée la poussée du sol sur la **Griffe**, effort qui correspond à environ la moitié ou le tiers du poids de la sonde. Par rapport à l'articulation **A** la tendance à faire tourner **T1** est proportionnelle à la distance **X**. (*Le "bras de levier".*) C'est l'effort exercé par le tout petit pignon **F1** exercé dans l'engrenage vert qui s'oppose à **T1**. Comme le robot est au repos, on peut affirmer que les deux efforts contraires sont égaux en grandeur donc **T1** = **F** \* **X** = **F1** \* **X1**. On voit que **X** est environ 12 fois plus grand que **X1**. Donc l'effort dans l'engrenage est environ 12 fois plus grand que celui exercé par le sol sur la **Griffe** **F**.

Pour l'articulation **B** le rapport est encore plus critique. La tendance à tourner **T2** contrée par l'engrenage jaune est plus importante puisque le bras de levier **Y** pour le même effort **F** est plus long. Le rapport des bras de levier dans l'engrenage jaune est d'environ 24 à 25. L'effort dans la petite denture en matière plastique **F2** est donc 24 fois plus grand que **F**. Si la configuration impose le tiers du poids en **F**, **F2** devient égal à 8 fois le poids total de la sonde !

Ça se passe dans le petit moteur, et ce dernier souffre en silence. On ne s'en rend absolument pas compte, pourtant le phénomène est bien réel. Pour le moteur de la hanche en **C** le bras de levier **Z** est encore plus grand et la tendance à tourner **T3** augmente dans les mêmes proportions.

Nous ne savons pas exactement comment l'arbre de sortie, enchâssé dans le corps du servomoteur est guidé. On peut affirmer toutefois que les efforts supportés par les deux paliers tels que **F3** et **F4** qui s'opposent à la rotation **T3** seront pour le moins notables.

**CONCLUSION :** Les études de morphologie devront privilégier les configurations qui minimiseront les "bras de levier", c'est à dire des distances telles que **X**, **Y** et **Z**. Les postures relatives à différentes phases de la mission seront également construites en tenant compte de ce critère prioritaire.

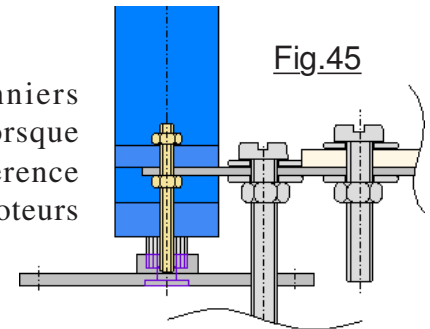
Les déplacements seront étudiés de façon à ce que le poids soit réparti sur trois jambes, en évitant par exemple de lever simultanément deux membres opposés.

## ➤ Justification de l'orientation "verticale" du Tibia. (Choix J.)

**F**ranchement on pourrait laisser le hasard choisir et les orienter n'importe comment. La différence d'effet restera dérisoire et l'argumentation "faible". Seule observation qui puisse conserver une certaine crédibilité : En observant la Fig.41 et compte tenu des explications sur la propagation des efforts, la zone **A** subira des contraintes plus élevées que la région **B**. N'ayant pas d'autres observations pertinentes à proposer, on placera la section la plus "résistante" vers le haut dans la région du **Genou**.

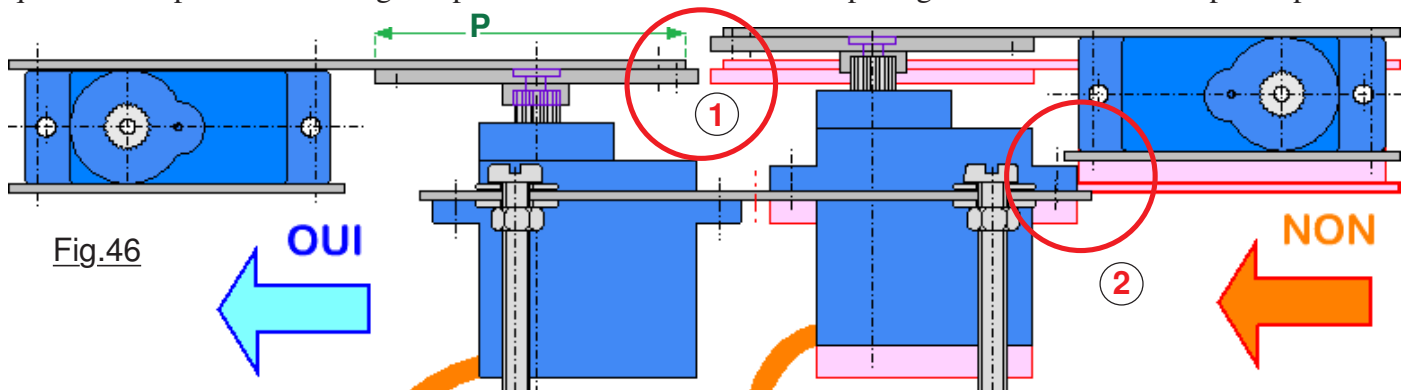
➤ **Sortie moteur châssis sur le Dessus. (Choix A.)**

Sachant que sur ces articulations on a opté pour des palonniers cruciformes, le dessin de la Fig.45 montre immédiatement que lorsque le Fémur sera orienté vers l'avant ou vers l'arrière, il y aura interférence matérielle avec les boulons qui relient le bouclier de protection. Les moteurs seront situés dessous avec leur arbre de sortie orienté vers le haut.



➤ **Sortie moteur châssis Extérieur. (Choix C.)**

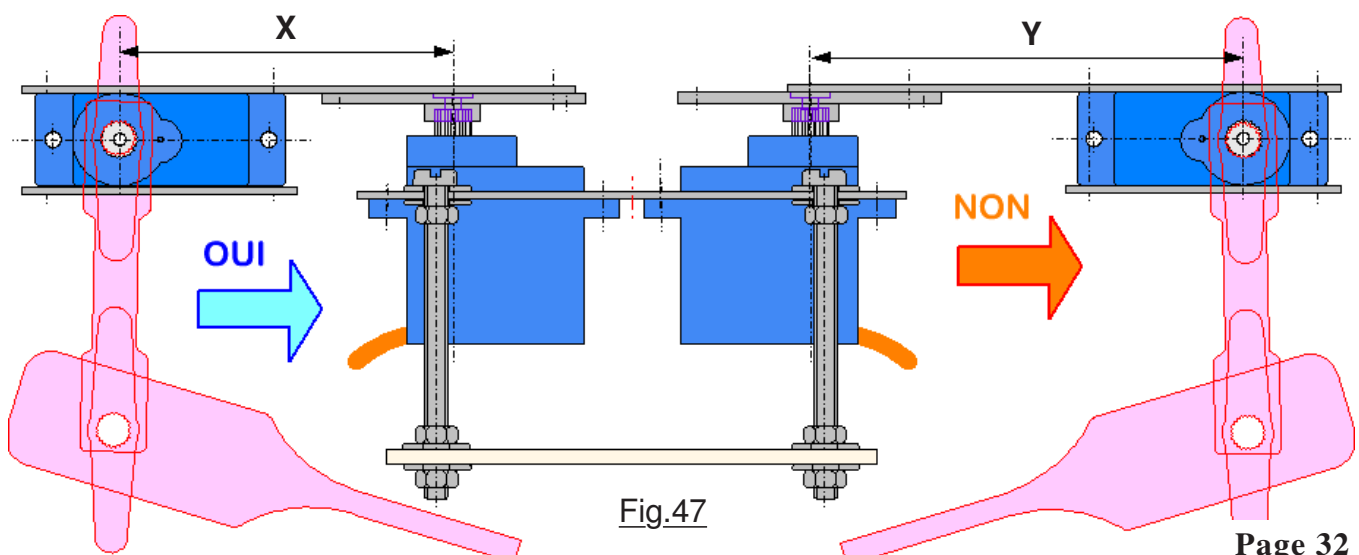
Considérons la Fig.46 sur laquelle les deux options envisageables sont tracées. Sorties moteur situées vers l'intérieur en 1 les palonniers longs se superposeraient, on serait obligé de sélectionner des courts ce qui est contraire au choix effectué. En effet, il est facile de comprendre qu'avec les palonniers longs la portée P dans la liaison est plus grande favorisant le principe N°1.



Par ailleurs, si l'on désirait adopter la semelle dessus comme le montre l'épure coloriée en rose pastel, en 2 la bride du moteur entrerait en interférence avec le châssis. Bien que nous n'ayons pas encore choisi pour la variable B ce serait une possibilité de moins. Deux inconvénients alors qu'il semble ne pas y avoir d'avantage : Les sorties des moteurs seront vers l'extérieur.

➤ **Justifier Moteur châssis Palonnier vers l'Intérieur. (Choix D.)**

L'observation de la Fig.47 démontre à l'évidence que le "bras de levier" en Y est bien plus important que celui en X. Choisir un assemblage déporté vers l'extérieur augmenterait de façon notable les efforts dans les pièces mécaniques, et en particuliers ceux sur les paliers qui guident les arbres de sortie des hanches. Par ailleurs la surface de contact P mentionnée dans l'étude précédente serait réduite, facteur défavorable. C'est surtout  $Y > X$  qui constitue l'argument principal pour guider ce choix. Il ne faut toutefois pas oublier que les efforts subis par les pièces mécaniques ne constituent pas les seuls critères à prendre en compte. Nous devons simultanément étudier les postures particulières, la mobilité etc. Pour le cas en cours d'évaluation D on peut vérifier que dans les deux cas la griffe peut s'escamoter de façon équivalente avec pour avantage à la solution Intérieure un encombrement global très inférieur ce qui sera un avantage pour la posture de décollage.





► Justifier Semelle moteur châssis sur le Dessus. (Choix B.)

Représentée sur la Fig.48 la sonde se trouve dans la posture particulière qui sera nommée "Posture stable raisonnable". En **A** la semelle du moteur est sous le châssis alors qu'en **B** elle se trouve sur le dessus. La structure dans le cas **B** sera légèrement plus basse de la différence de hauteur **H**. La garde au sol dans le cas **B** est donc légèrement plus faible, mais de toute façon lors du

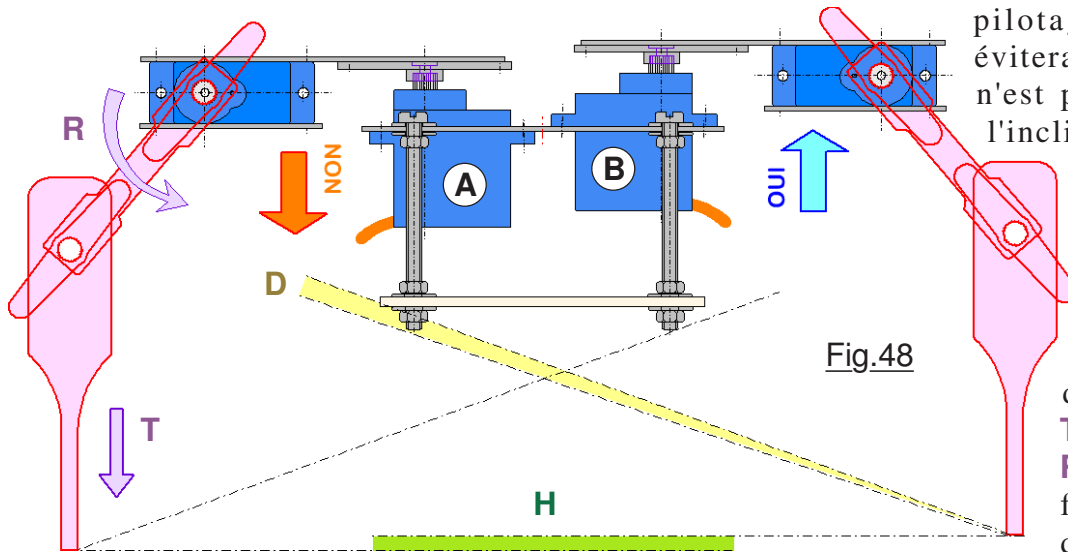


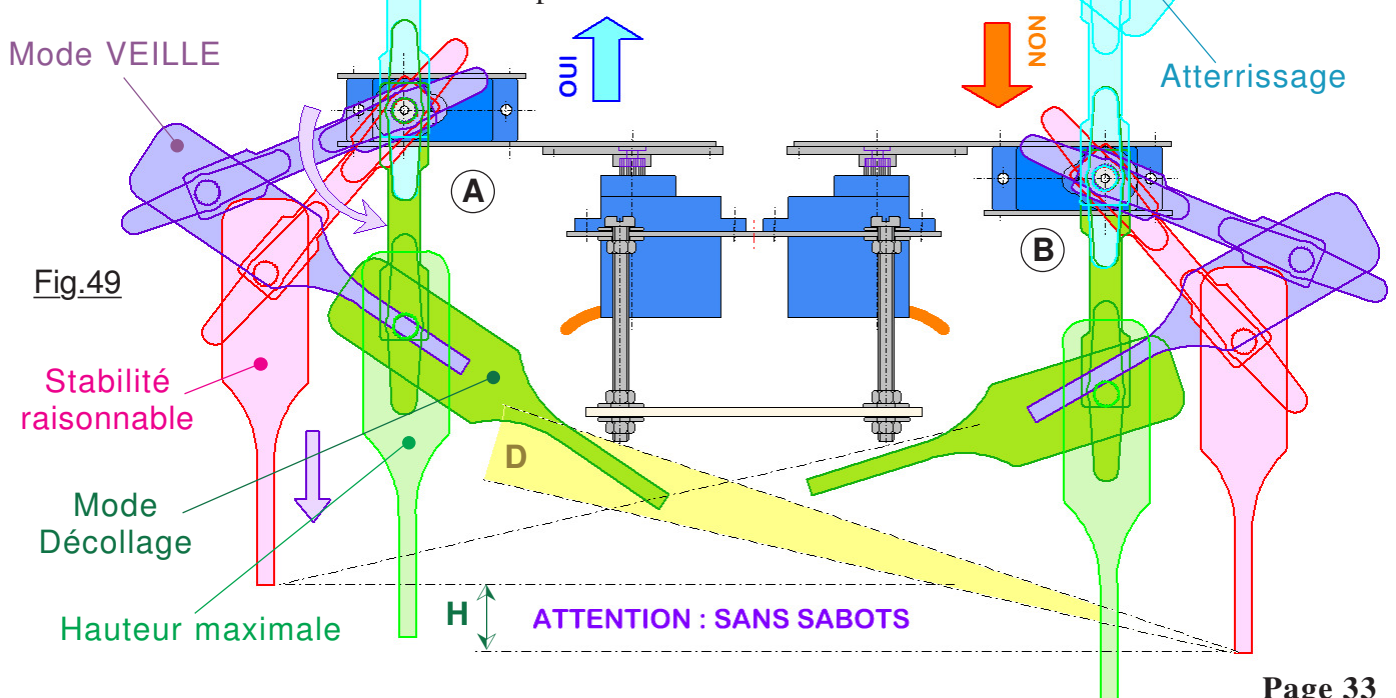
Fig.48

pilotage sur le terrain on évitera les gros rochers. Ce n'est pas très évident, mais l'inclinaison potentielle est légèrement plus grande pour **A** la différence étant toutefois minime et soulignée en **D**.

Quand on cherchera à tester des marches d'escalier, la translation **T** obtenue par la rotation **R** sera légèrement plus faible pour **B** que pour **A** dans la marge **H**. Bien que la solution **A** semble cumuler plusieurs petits bénéfices, c'est la variante **B** qui est sélectionnée car elle confine à une posture légèrement plus stable puisque le centre de gravité est plus bas.

► Justifier Moteur Genou sur le Dessus. (Choix E.)

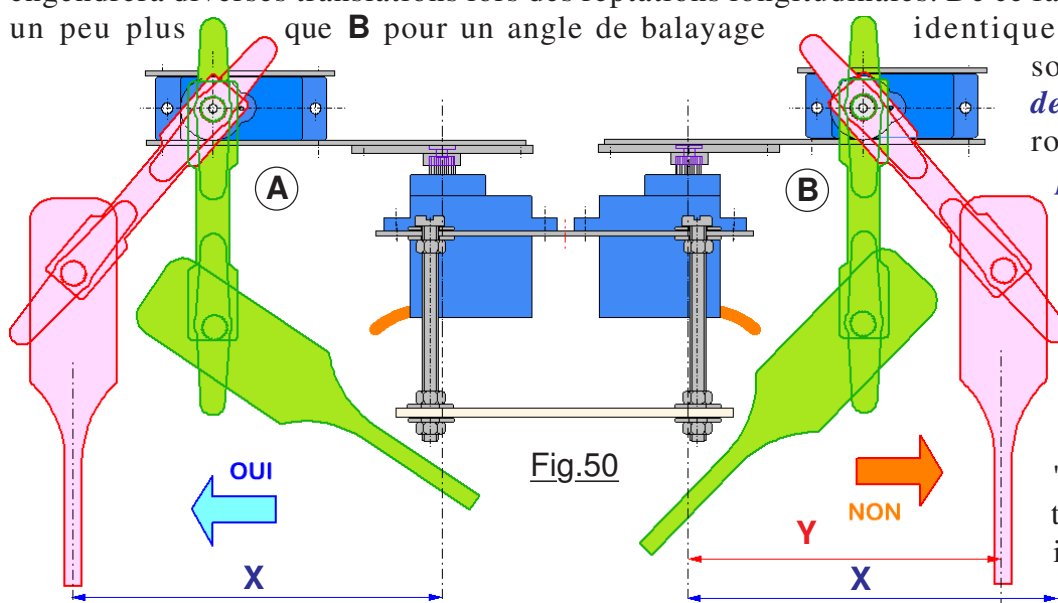
Départager les deux candidats n'a rien d'évident et nous impose d'examiner plusieurs postures qui sont actuellement envisagées en fonction des phases de la mission. Au point de vue des efforts dans les pièces mécaniques, les deux solutions sont strictement équivalentes. Pour les déplacements de translation et de rotation idem. La sélection de la solution devra faire appel à d'autres critères. Pour aider à l'analyse, la Fig.49 représente les deux approches possibles pour cinq postures caractéristiques. Examinons les différents cas de figure. Dans toutes les épures colorées il est manifeste que c'est la solution **A** qui place le centre de gravité le plus proche du sol. Donc elle procurera la meilleure stabilité la "stabilité raisonnable". En violet est représenté le mode VEILLE. En



est visualisée la configuration de lancement. Pour ces trois postures on observe des situations équivalentes. Enfin, que ce soit la configuration "Hauteur maximale" en vert clair, ou celle en bleu pastel qui correspond à la posture d'atterrissage, difficile à dégager des avantages ou des faiblesses. Pour l'inclinaison maximale permise, c'est **A** qui l'emporte, la différence **D** étant soulignée en jaune. La garde au sol est également bien plus grande pour **A** que pour **B**. En fin de compte, en espérant ne pas se fourvoyer, la configuration **A** est privilégiée car elle procure une meilleure stabilité critère estimé prépondérant. De plus, ce n'est pas évident à vue de ces dessins, mais le berceau dont il sera question plus avant sera moins haut. C'est encore du "gagne petit" ... gratuit donc autant en profiter.

➤ **Justifier Moteur Genou arbre de Sortie vers l'extérieur. (Choix G.)**

Contrairement au dessin de la Fig.49, seules deux postures sont significatives. Représentées sur la Fig.50 on observe que pour le décollage en vert les deux approches ne sont pas très différenciées. Des études préliminaires montrent que probablement les mouvements de translations longitudinales seront obtenus à partir de la configuration stable raisonnable. Le dessin montre à l'évidence que les rayons de giration **X** de la griffe par rapport à la **Hanche** sont plus importants pour **A** que pour **B**. Pour mieux le constater la cote **X** a été recopiée sous **Y**. C'est cette rotation qui engendrera diverses translations lors des reptations longitudinales. De ce fait, **A** permettra d'avancer un peu plus que **B** pour un angle de balayage identique. Hors le but de cette

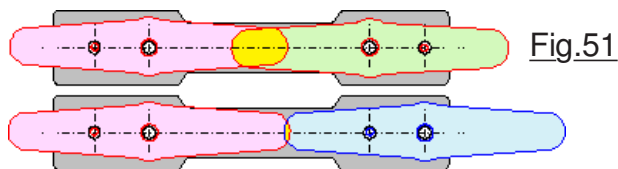


sonde consiste à **déplacer des capteurs** sur la planète rouge. **Fonction** donc **prioritaire**, on décide à ce stade des études de privilégier **A** avec pour inconvénient d'augmenter un peu les efforts dans les pièces mécaniques de la petite machine car le "bras de levier" est très légèrement plus important. (Rapport 1,18 environ.) Ceci dit, le

rapport qualité / prix avec **A** semble meilleur. On se doutait bien que la recherche d'une combinatoire optimisée pour le petit animal mécanique se heurterait forcément à de nombreux compromis.

➤ **Justifier la position des palonniers sur le Tibia. (Choix F et K.)**

Étant donné que nous avons opté pour des palonniers longs, la Fig.51 démontre clairement que placer les deux supports vers l'intérieur ou un seul, dans les deux cas il y a interférence matérielle. Nous sommes alors dans l'obligation d'adopter la version longue qui est représentée sur les épures précédentes. Elle est un peu défavorable pour les efforts, mais plus efficace pour les déplacements. Les palonniers seront à l'extérieur sur le **Tibia**.



➤ **Sortie moteur du genou vers l'Extérieur. (Choix H.)**

Aucune différence en ce qui concerne les efforts dans les mécanismes, le choix sera donc guidé par une étude cinématique. C'est la vue de dessus de la petite machine qui s'avère la plus propice pour examiner les conséquences de l'arbitraire imposé. Des évaluations primaires ont montré qu'il serait particulièrement utile dans certaines circonstances de pouvoir orienter les **Jambes** directement vers l'avant ou vers l'arrière du châssis. La Fig.52 montre clairement que si les sorties des moteurs sont vers l'Intérieur il y aura interférence, alors que sur la Fig.53 on pourra dépasser l'axe si c'est utile. Nous n'avons donc pas le choix, **les sorties des moteurs seront vers l'Extérieur** lorsque les deux **Jambes** avant ou arrières sont en extension longitudinale.

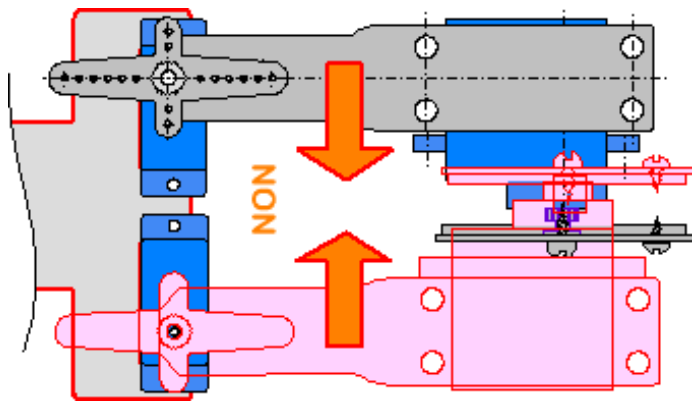


Fig.52

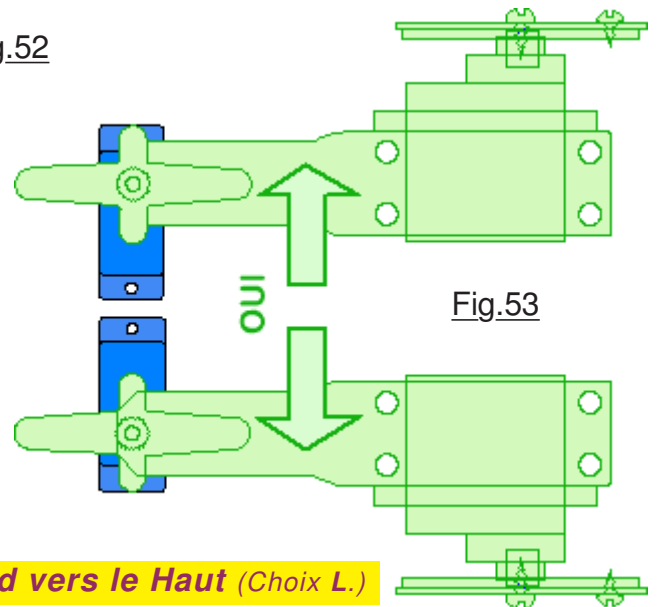


Fig.53

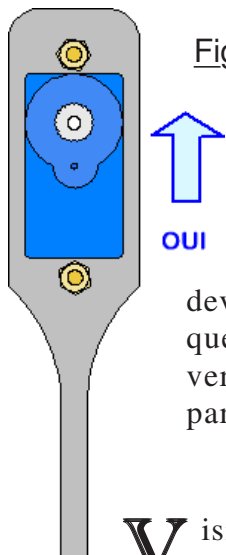


Fig.54

➤ Justifier le moteur du Pied vers le Haut (Choix L.)

L'analyse à conduire ne sera pas bien longue. Il suffit de regarder la Fig.49 pour constater que moteur vers le bas la garde au sol encore diminuée deviendrait inquiétante. Plusieurs choix précédents ont poussé dans ce sens, sans compter que l'angle de pente serait encore plus diminué. Aussi, la sortie du moteur sera placée vers le haut. Si par la suite il s'avérait que c'est une fausse "bonne idée", il serait alors particulièrement aisé d'inverser le sens.

➤ Justifier le moteur du Pied vers l'Intérieur. (Choix M.)

Visiblement sur la Fig.55 en **A** l'encombrement de la **Jambe** dans son ensemble est bien plus important qu'en **B**. Ce sera particulièrement pénalisant quand par une rotation **R** on orientera le membre vers le centre du châssis, augmentant de façon significative la zone d'interférence si la **Jambe** avant s'y trouve également. Par ailleurs, ce n'est certainement pas important, mais l'observation attentive montre que le "bras de levier" en **X** est un peu plus faible qu'en **Y**. Le rapport n'est pas important. (Environ 1,04) Il n'y a pas de petit bénéfice, car à l'arrivée tous ces facteurs s'ajoutent ... La solution **A** ne présentant que des inconvénients par rapport à **B**, dont l'un est particulièrement pénalisant, le moteur du **Pied** sera par voie de conséquences du même côté que celui du **Genou** sur le **Tibia**.

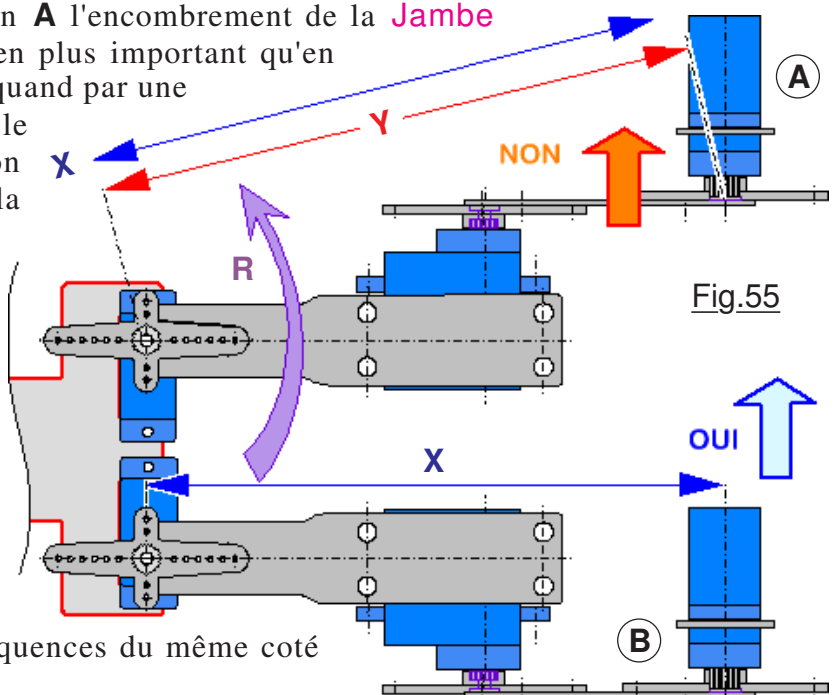


Fig.55

➤ Justifier la semelle du moteur du Pied vers l'Intérieur. (Choix N.)

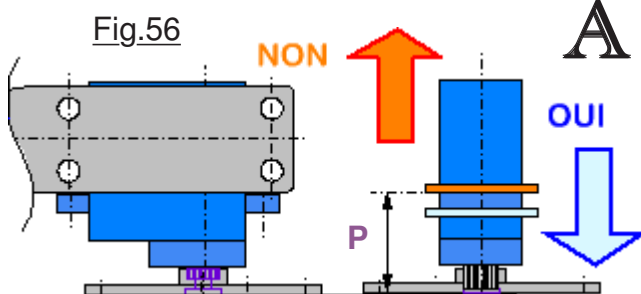


Fig.56

Avec cette option nous aurons passé en revue toutes les variables mis à part l'orientation des moyeux par rapport au neutre opérationnel des moteurs. La différence est subtile sur la Fig.56 avec un petit avantage pour la **Griffe** vers l'Extérieur : Le petit "porte à faux" **P** qui engendre de la torsion sur le **Tibia** est légèrement plus faible. C'est déjà un argument objectif pour l'optimisation.



## 14) 23/09/2017 : Optimisation finale des structures mécaniques (MJD 58019)

Chaque fois qu'un système admet un nombre de variables non dérisoire, l'explosion combinatoire devient impressionnante. Avec seulement trois articulations dans une jambe, on a rapidement constaté que pas moins de 8192 variantes étaient possibles et il n'était pas pensable de toutes les envisager. La solution raisonnable a donc consisté à effectuer des choix articulation par articulation.

Dans le meilleur des cas, l'amplitude de rotation dans une articulation sera de  $180^\circ$ . La possibilité de pouvoir positionner le palonnier dans les dentelures quand le moteur est au neutre opérationnel offre encore une foule considérable de possibilités. Il nous incombe d'exploiter au mieux cette ressource. N'allez surtout pas imaginer que les postures qui vont se voir sélectionnées ont émergé d'un simple claquement de doigt. Affairés à leurs outils de dessins informatiques, les personnels de la salle S2 ont exploré toute une famille de variantes que l'anatomie propre au petit robot autorise. Quand un nombre de configurations significatif a été développé, ces ingénieurs en conception ont effectué l'étude exhaustive de l'optimisation morphologique. Ce que ne révèle pas le chapitre précédent, c'est que les choix ont plus ou moins été influencés par les évaluations cinématiques initiales. Par exemple sur le brouillon de la Fig.57 vous pouvez observer que les configurations VEILLE et ATERRISAGE n'ont rien à voir avec celles qui seront adoptées en version définitive. Du reste, pour bien vous montrer que l'évolution n'a pas été linéaire, dans le chapitre *Justification du choix des palonniers* on décide des **Palonniers Courts sur le Tibia** alors que sur tous les dessins ils sont représentés longs. Comme il n'était plus question de reprendre tous ces dessins dans le didacticiel, on fait avec, ce qui ne rend pas caduque pour autant les conclusions qui en découlent. En résumé, pour aboutir à un ensemble industriel cohérent, souvent de nombreuses recherches "discrètes" ont été investies. La machine qui résulte de ces préambules est forcément plus performante.

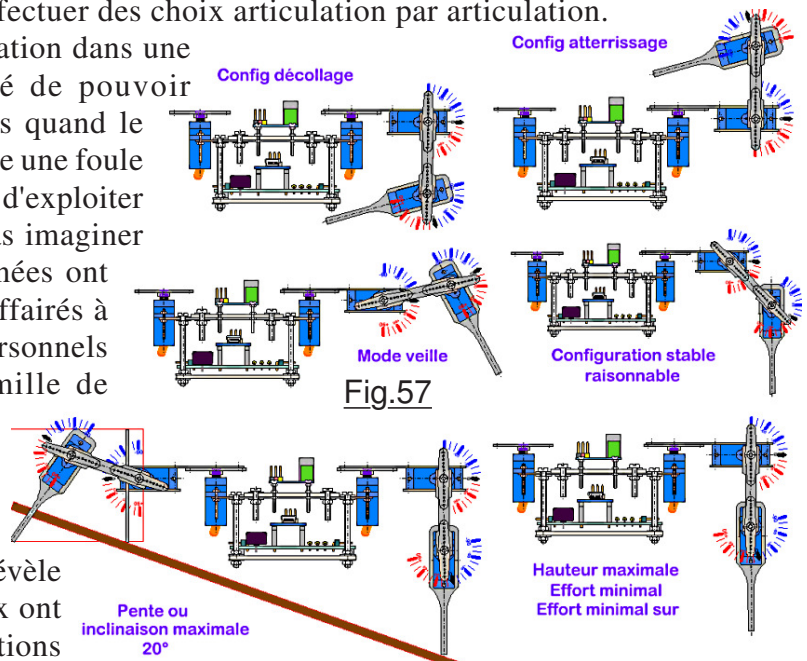


Fig.57

### ➤ Déphasage entre le palonnier et le neutre opérationnel.

Considérons la Fig.58 sur laquelle les trois servomoteurs représentés sont au neutre opérationnel. Dans ce but nous avons envoyé à l'asservissement la consigne pour se positionner à moitié débattement angulaire. Comme nous l'avons fait pour déterminer les caractéristiques des moteurs, sur le dessin **A** est représenté le disque gradué avec le zéro dans l'axe transversal du moteur. On a calé le palonnier sur le moyeu de façon à ce qu'il soit au plus proche de l'axe de symétrie. La sortie de l'arbre moteur est pourvue de 21 dentelures. Il est donc possible de décaler à notre guise de pas angulaires égaux à  $360^\circ / 21 \approx 17^\circ$ . Par exemple sur le croquis **A** au lieu de placer le palonnier dans le plan médian, on l'a introduit avec deux dentelures de décalage à droite. Quand le moteur sera piloté au zéro, le palonnier occupera la position représentée par le contour rouge. Nous disposons de ce fait de la possibilité d'implanter dans 10 orientations différentes le palonnier par rapport au neutre opérationnel. (*Dix =  $21 / 2$  car sur un demi tour on retrouve la symétrie qui est "identique".*)

Par exemple en **B** on a inséré à deux dentelures à gauche soit environ  $-34^\circ$  alors qu'en **C** trois dentelures à droite décalent d'environ  $+51^\circ$ . On dispose ainsi d'une faculté bien utile de caler au

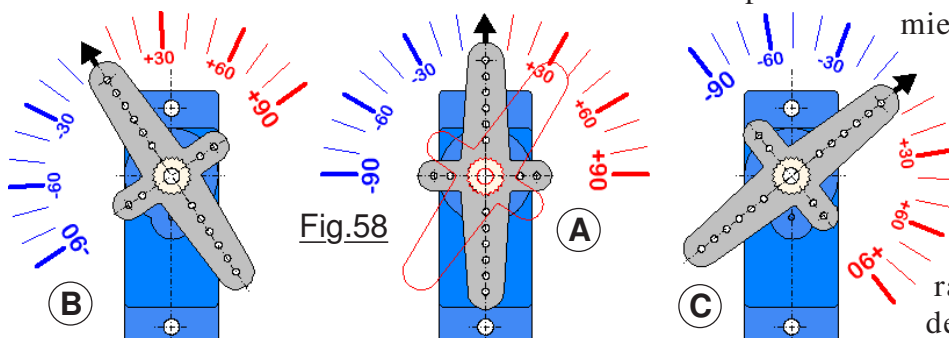
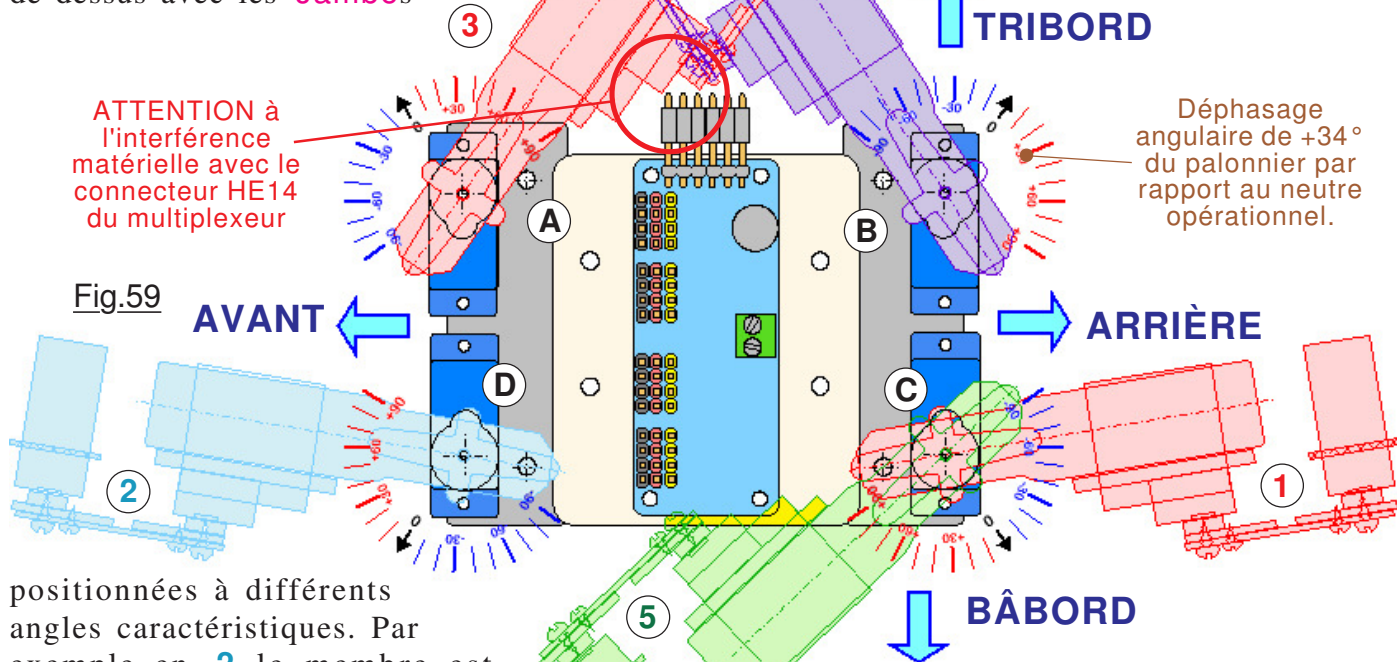


Fig.58

mieux les éléments mécaniques pour optimiser les performances. "Zéro" décalé, il devient alors indispensable d'orienter dans le bon sens les disques gradués pour qu'ils puissent indiquer les angles de rotation par rapport aux consignes et au zéro de l'asservissement. **Page 36**

## ➤ Optimisation des articulations du châssis : Les Hanches.

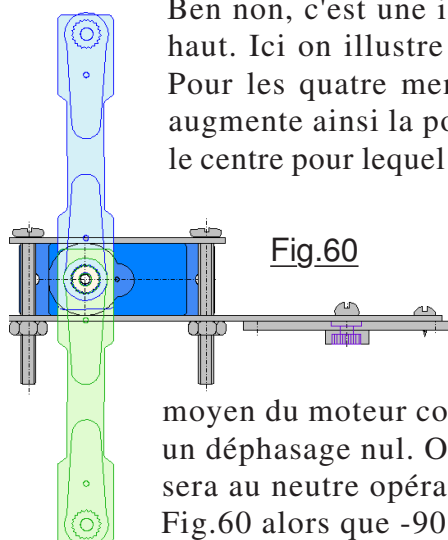
Primordiale, la mobilité des Hanches influencera directement la faculté de JEKERT à se mouvoir, et ce autant sur un sol horizontal qu'en pente. (*Sans compter éventuellement des escaliers, la gestion de position du centre de gravité ...*) Il importe à ce titre de leur octroyer la plus grande amplitude de débattement possible quitte à laisser potentiellement des situations d'interférence qui seront gérées par logiciel. Par exemple en **6** les deux membres rouge et violet se "mélangent". Naturellement cette interférence matérielle ne sera pas réelle. Il y aura collision et forçage des moteurs avant cette posture. Bien que possible mécaniquement et électroniquement, il n'y aura aucune raison de piloter ces deux orientations simultanément. Tout au long de ce didacticiel, il faudra faire références aux diverses **Jambes** de la sonde. Pour identifier les divers membres, l'ensemble étant vu de dessus, les **Jambes** seront nommées dans l'ordre horaire **A, B, C, D** en commençant par celle située à l'avant droite. Sur la Fig.59 de dessus avec les **Jambes**



positionnées à différents angles caractéristiques. Par exemple en **2** le membre est positionné au maximum vers l'avant, loin possible. On retrouve l'orientation rotation potentielle pour les pates arrières

attitude qui permet d'aller tâter le sol le plus symétrique en **1** vers l'arrière. L'amplitude de est d'un angle notable. Elle est visualisée entre la

position **1** et la représentation verte en **5**. La contrainte la plus limitative se trouve en **3** car il y a le connecteur HE14 du multiplexeur qui dépasse sur tribord. L'amplitude potentielle des rotations des **Jambes A** et **D** sera donc plus faible que celle des membres **B** et **C**. Sur l'épure il est manifeste que la zone coloriée en jaune met en évidence une interférence entre **5** et le multiplexeur. Ben non, c'est une illusion d'optique car les pièces mécaniques vertes sont situées plus haut. Ici on illustre la difficulté d'interpréter un dessin 2D qu'il faut visualiser en 3D. Pour les quatre membres on a imposé un déphasage de deux dentelures soit  $34^\circ$ . On augmente ainsi la possibilité d'orienter vers l'avant et vers l'arrière sans restreindre vers le centre pour lequel les volumes balayés rencontrent les risques d'interférences matérielle.



## ➤ Déphasage sur les moteurs du genou.

Consultez la Fig.49 qui préjuge de différentes postures qui sont suffisamment réfléchies pour les considérer comme probables en version définitive. Il est manifeste sur ce dessin que les deux déviations extrêmes sont symétriques par rapport au plan moyen du moteur concerné. Donc pour les articulations des **Genoux** nous opterons pour un déphasage nul. On enchâssera le palonnier pour qu'il soit horizontal quand le moteur sera au neutre opérationnel c'est à dire que  $+90^\circ$  correspondra à la position bleue sur la Fig.60 alors que  $-90^\circ$  sera relative à l'orientation verticale verte.

### ➤ Calage du débattement angulaire des Griffes.

Dernière variable à prendre en compte pour optimiser la mobilité de JEKERT, le **Pied** comme pour le **Genou** balaye l'intégralité des 180° de la plage possible sur les moteurs. Il importe de déterminer le déphasage par rapport au neutre opérationnel pour offrir la plus grande souplesse possible à l'anatomie de cette petite machine. Les deux cas extrêmes sont ceux du mode **VEILLE** et de la configuration **Atterrissage**. C'est la posture adoptée pour rétracter les **Tibias** sous "l'animal robotisé" qui est la plus exigeante. La position tracée en bleu clair sur la Fig.49 correspondant à l'autre limite de la rotation. La Fig.61 reprend l'épure avec uniquement les deux postures dont il est question dans ce chapitre. Deux déphasages de respectivement sept

dentelures ou huit dentelures ont été envisagés. Les épures ont montré que l'on pouvait passer à un décalage de huit positions ce qui conduit aux allures des dessins représentés à l'échelle. Pour huit pas de déphasage par rapport au neutre opérationnel l'angle de déviation avoisine  $\approx 137^\circ$ . Pour

nous aider à établir une relation entre les consignes qui seront envoyées par programme et les positions réellement adoptées, des secteurs gradués adaptés à ce déphasage sont disponibles sur la page à imprimer. La Fig.62 en présente un exemplaire, et il faut, comme pour les moteurs des **Hanches** du reste, des représentations symétriques pour satisfaire tous les besoins.

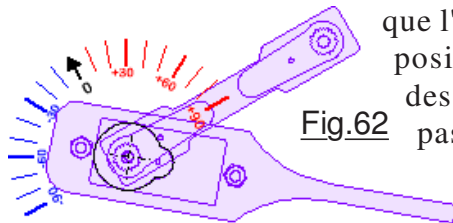


Fig.62

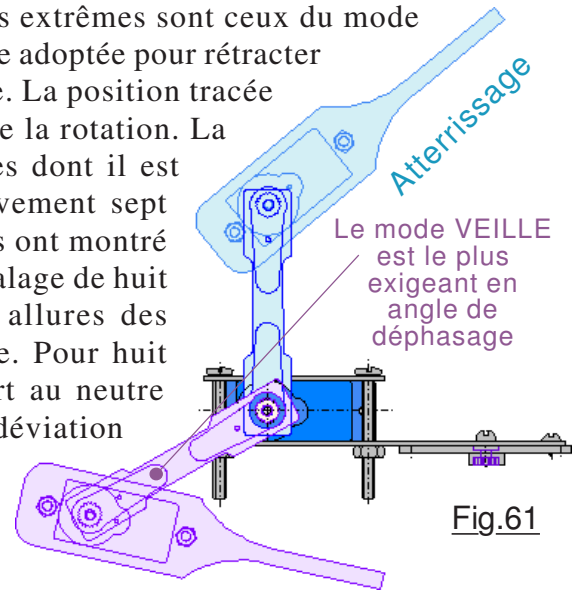


Fig.61

### ➤ Répartition des moteurs sur le multiplexeur.

Assembler entièrement la structure principale de la sonde impose de savoir comment seront répartis les divers moteurs sur le squelette de l'animal artificiel, objet du chapitre suivant. Se posera également le problème des branchements sur le multiplexeur. Il s'agit d'un arbitraire, puisqu'informatiquement il sera aisé d'identifier à notre convenance chaque individu. Autant choisir une répartition qui simplifie à la fois les manipulations ainsi que la mémorisation. Coller en ligne toutes les fiches en partant de la sortie zéro vers la N°11 n'est pas du tout commode pour manipuler les branchements et surtout les séparations. Aussi, on adoptera la distribution montrée sur la Fig.63 qui montre que chaque regroupement de quatre sorties sur les connecteurs HE14 est réservé à une **Jambe** dont la progression respecte l'ordre horaire adopté sur le châssis.

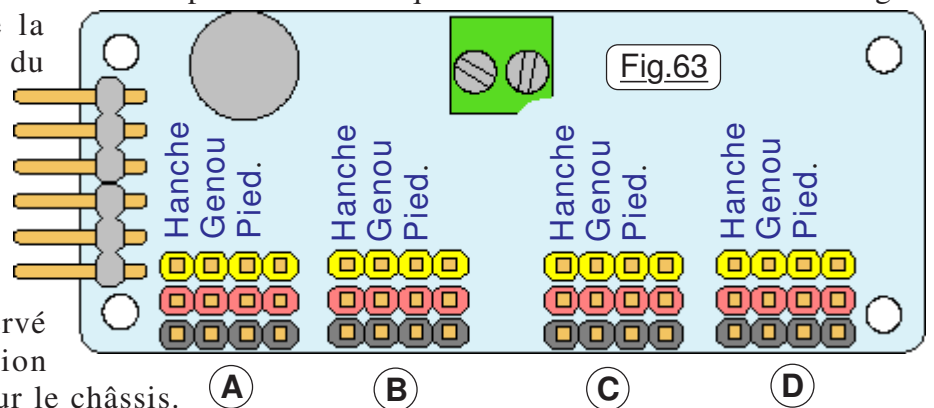


Fig.63

Ensuite, pour chaque patte, on va brancher les moteurs dans l'ordre où on les rencontre en partant du haut vers le bas. Ainsi, il sera très facile d'établir le lien entre une sortie et le moteur qu'elle pilote. Naturellement, les sorties non utilisées restent disponibles si besoin s'en fait sentir.

### ➤ Répartition des moteurs sur les diverses articulations.

Disposer judicieusement les moteurs sur les membres du quadrupède est impératif pour tirer le meilleur parti de l'existant. Cette dernière phase avant de pouvoir assembler la sonde est cruciale, car nous avons vu que les moteurs disponibles dans le lot approvisionné n'ont pas des performances identiques. Pour ma part, disposant d'un échantillonnage plus que nécessaire, il est normal que les plus performants soient intégrés dans la sonde. Si ça se trouve, vous ne disposez que de douze individus, pas un de plus. Si de surcroît deux ou trois ne peuvent pas balayer les 180° comme c'est le cas pour les références n°6, n°11 et n°12 du tableau de la Fig.26, il convient alors de les affecter aux **Hanches** puisque ces articulations balayent un angle très inférieur à 180°. Ainsi JEKERT conservera toute sa mobilité, comme si tous les moteurs étaient "parfaits".



## 15) 24/09/2017 : L'assemblage mécaniques (MJD 58020)

Largement de quoi devenir fébrile et nerveux. En effet, déjà 38 pages de didacticiel et nous n'avons pas encore assemblé la future sonde martienne. Le grand jour est arrivé. Les études d'optimisation sont achevées, les personnels de la salle S2 ont fait du bon travail. Les imprimantes ont craché les dessins et les protocoles de montage à respecter. Liasse de document sous le bras je me rends à la salle d'assemblage S5. Elle jouxte S1 mais l'entrée se fait par un sas "de décontamination". Tout ce qui y pénètre a été au préalable parfaitement nettoyé et décontaminé. On y travaille avec charlotte, gants blancs et surchaussures. Les techniciens ont étalés, bien triés sur les établis, les divers éléments de la structure de la sonde. On va pouvoir commencer. L'ordre des opérations n'est absolument pas quelconque, il est conçu pour minimiser les manipulations et surtout éviter d'excorier le matériel.

### ➤ Réaliser des sous-ensembles.

Techniquement on va commencer par réaliser des petits sous modules, puis le corps principal. Ensuite, on viendra compléter le corps principal par les diverses Jambes.

Par exemple sur la Fig.64 on a préparé les quatre Tibias.

Toutefois, avant de pouvoir les apprêter, il faut modifier légèrement les palonniers. En effet, bien que ce ne soit pas totalement impossible, utiliser ces éléments tels qu'ils sont livrés pour y serrer la petite vis qui supporte les efforts de

torsion confine à une galère sans nom.

Considérons la Fig.65 qui

représente en coupe transversale l'un des éléments cruciforme. En 1 on voit la vis la plus grande (Celle qui présente une petite collerette d'appui.) qui immobilise le total sur le moyeu dentelé de l'arbre moteur. En 2 se trouve la petite vis qui sert à transmettre le couple. Sur la Fig.66 il est manifeste que les petits trous situés en ligne sont plus petits que le noyau de la petite vis A. C'est la raison pour laquelle, comme en B tous les trous qui servent à recevoir la petite vis sur les palonniers ont été légèrement agrandis. Pas grand chose à dire sur la préparation des Griffes. On fixe le moteur d'un coté ou de l'autre, c'est sans importance puisque ces pièces sont symétriques. Pour mémoire la référence de la Jambe à laquelle elle appartient est inscrite sur la Griffe. Au moment d'assembler on n'aura pas besoin de vérifier le numéro du moteur qui lui est affecté.

Facile également d'assembler les moteurs sur les Fémur. On commence par placer la bride et les quatre boulons. Pour des raisons esthétiques les têtes de vis sont sur le dessus. Puis on insère le moteur en prenant soin de placer la sortie du bon côté. Veillez comme sur la Fig.68 à bien repérer sur quel membre va cet élément, car une fois que la bride est serrée on ne voit plus la pastille de traçabilité. Au moment de fusionner le total sur le corps ... il n'y a plus qu'à débrider !

Fig.64

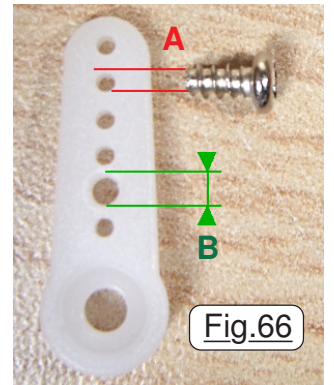
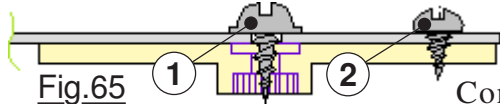
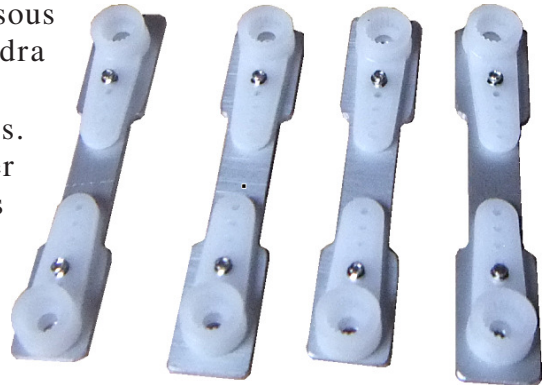


Fig.66

Fig.67

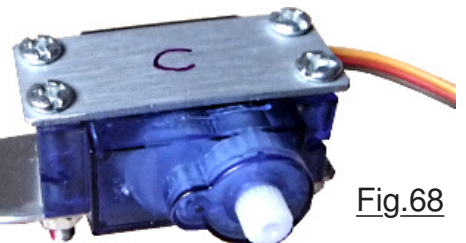
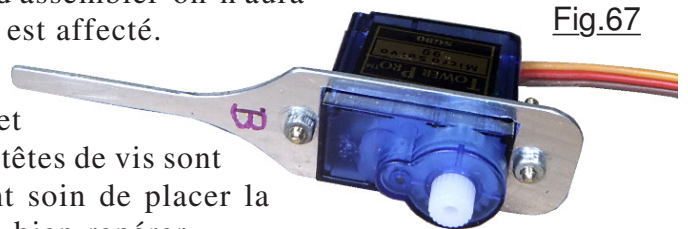
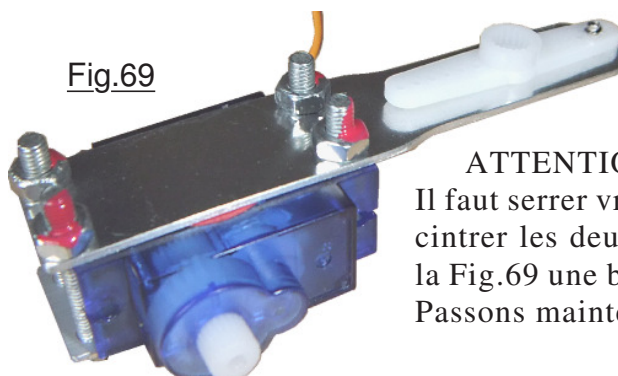


Fig.68

Fig.69



ATTENTION : La bride et la pièce du Fémur sont en porte à faux. Il faut serrer vraiment très modérément les boulons, sous peine de faire cintrer les deux plaques d'aluminium. Donc, comme bien visible sur la Fig.69 une bonne larme de vernis à ongles vient freiner ces liaisons. Passons maintenant au montage du corps de l'insecte voyageur.

### ➤ Assemblage du corps de JEKERT.

Disposer du module principal fait plaisir, car sous peu on y ajoutera les Jambes et la belle sonde présentera un aspect prometteur. Il ne restera plus que l'intégration de l'ordinateur et des expériences embarquées, et elle pourra prendre son envol. Enfin, pas tout à fait car sans les programmes elle ne constitue qu'un gros paquet de haute technologie inerte et stérile.

Quel plaisir intense, que de pouvoir admirer le corps complet de la sonde en Fig.70 autrement que sur des dessins pas toujours faciles à interpréter. Faisons ensemble le tour du propriétaire :

En 3 se cache le châssis sur lequel sont serrés les boulons  $\phi$  M3 en 2 qui assurent la liaison complète et rigide avec le bouclier 10. En 1 on a oublié une vis de liaison avec le Fémur. Les boulons  $\phi$  M3 en 4 assurent la liaison entre la plaque 5 et le châssis 3. On reconnaît en 6 le bornier qui sera réuni à la centrale électrique par des conducteurs de sections suffisantes. Le moteur de Hanche 7 doit

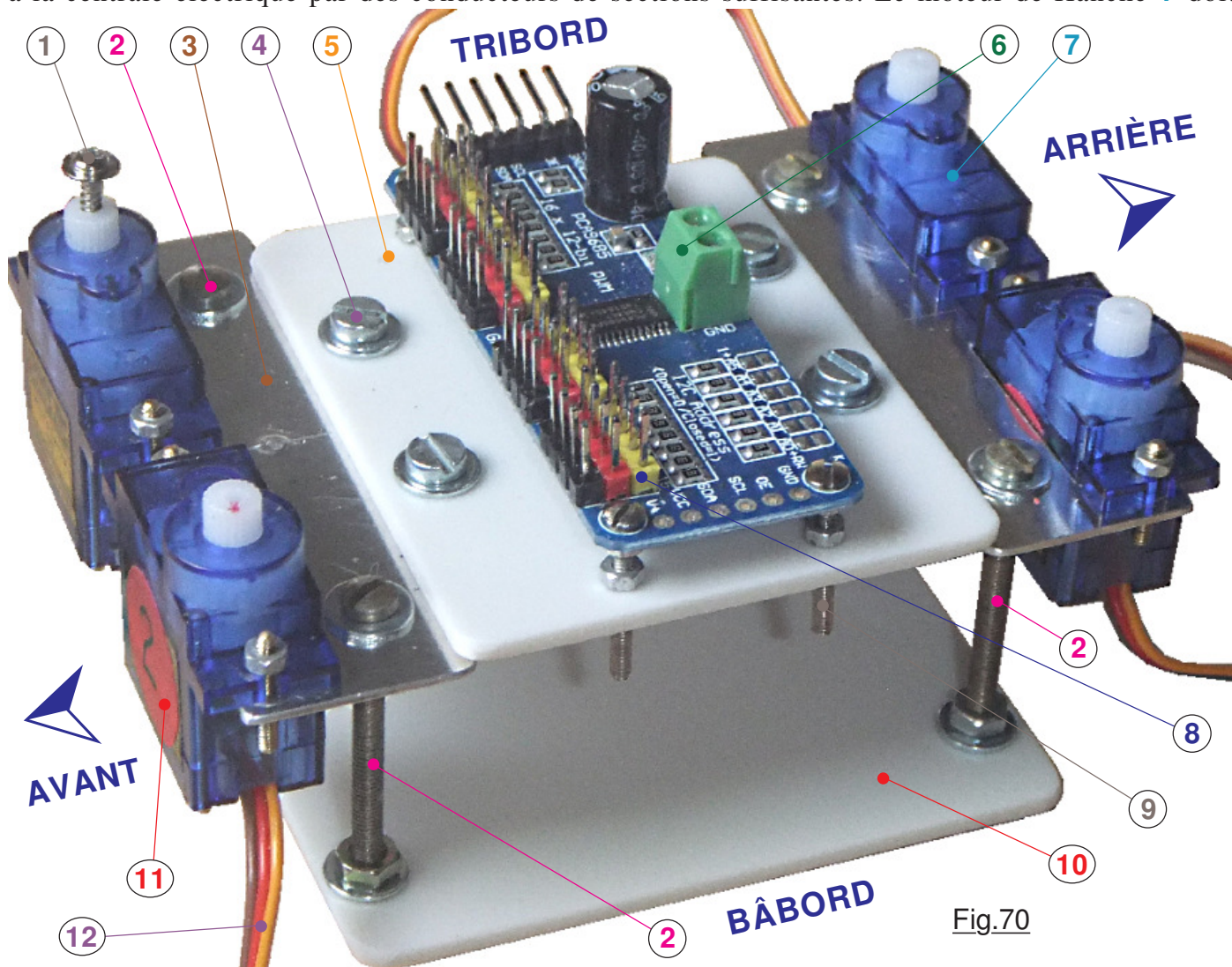


Fig.70

avoir sa semelle sur le dessus et son arbre de sortie vers l'extérieur. En 8 surtout ne pas brancher les liaisons moteur 12 sur le multiplexeur, la mise sous tension pourrait engendrer un joyeux cafouillage avec des collisions. Nous procéderons moteur par moteur avec vérification en temps réel. En 9 les vis  $\phi$  M1,5 n'ont pour le moment pas été raccourcies. Elles ne le seront que vers la fin des intégrations électroniques et uniquement si elles gênent. Notez en 11 la présence de la petite pastille qui identifie le moteur pour sa traçabilité. Pour l'heure le bouclier 10 est "vierge", c'est à dire qu'il n'est pas encore percé pour le passage des vis  $\phi$  M3 qui soutiendront le circuit imprimé du calculateur.

### ➤ Liaison des membres sur le corps de la sonde.

Phase particulièrement émoustillante, car mécaniquement JEKERT sera complète et présentera son apparence définitive. Du reste, quand l'ensemble sera complet, toutes les équipes vont se réunir pour faire les photographies de famille. Ce sera la dernière fois que les personnels n'ayant pas l'habilitation de plus haut niveau pourront la côtoyer. Ensuite, la belle machine sera entièrement dépolluée, asseptisée et mise sous cloche dans la "salle blanche" ...



## PREMIÈRE ÉTAPE : Préparer chaque membre.

@ : Piloter chaque servomoteur pour le placer au neutre opérationnel. Dans ce but on utilisera le programme **P02\_Test de\_base\_du\_Multiplexeur.ino** qui reste parfaitement adapté pour effectuer cette manipulation. Il suffit de brancher le moteur sur l'une quelconque des sorties.

- 1) Par la procédure @ placer au zéro le moteur du **Pied**. Placer le **Tibia** sur la **Griffe** comme le montre la Fig.71 avec présence du disque gradué spécifique aux deux membres **A** et **C**. Remarquez que le disque gradué en carton **3** est fendu à la largeur du bossage situé sur le servomoteur. Il est alors facile de l'insérer ou de le retirer à convenance lors des nombreuses manipulations qui seront conduites sur la sonde. Avant de serrer la vis **2** il faut placer le **Tibia** avec le déphasage correct sur l'arbre dentelé. Moteur au zéro opérationnel il suffit d'orienter l'élément pour que l'axe du **Tibia** soit exactement au dessus de la graduation zéro en **1** du petit disque des repères angulaires. ATTENTION c'est le tenon court qu'il faut assembler si l'on veut respecter les protocoles.

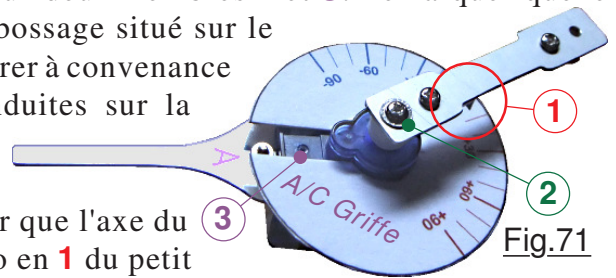


Fig.71

- 2) Par la procédure @ placer au zéro le moteur du **Genou**. Nous avons vu en Fig.60 que le déphasage pour ces articulations est nul. Le positionnement correct du moyeu sur l'arbre dentelé consiste à orienter l'axe longitudinal (*Colorié en jaune sur la Fig.72*) pour qu'il soit dans l'alignement avec l'axe transversal du moteur colorié en rouge. S'il n'y a pas eu d'erreurs lors du montage de la **Griffe** c'est le tenon long du **Tibia** qui se trouve à l'encastrement en cours de solidarisation.

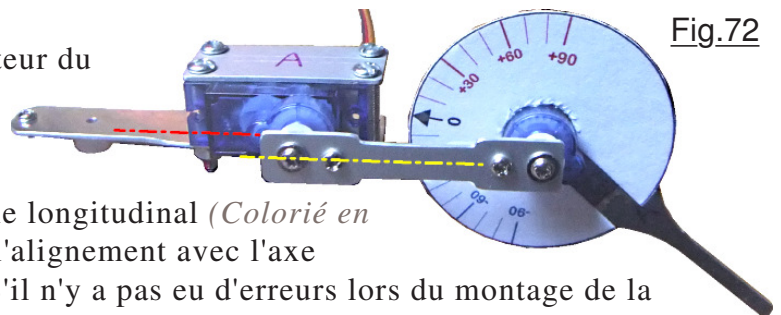


Fig.72

- 3) Réaliser ces deux liaisons sur chaque membre de JEKERT. Lorsque les deux articulations sont achevées, positionner les trois éléments en "Configuration Stable Raisonnée". Montrée sur la Fig.73 c'est une posture pour laquelle le **Tibia** est à 45° du **Fémur** et la **Griffe** à angle droit par rapport au **Fémur**. Cette disposition dégagera suffisamment les membres du dessous et diminuera l'amplitude de la surface couverte par l'ensemble. Durant ces travaux des **Griffes** trop dispersées vers la périphérie seraient en danger potentiel de chocs avec l'environnement, il est préférable de les rétracter. La Fig.73 présente cette posture dont il sera question lors des développements logiciels.

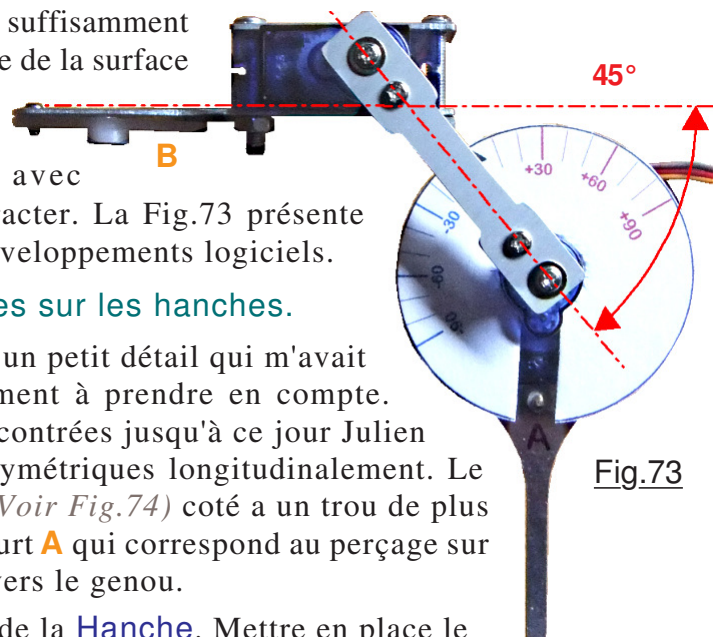


Fig.73

## DEUXIÈME ÉTAPE : Assembler les membres sur les hanches.

**NOTE :** C'est au cours de ces manipulations qu'un petit détail qui m'avait échappé c'est révélé comme étant impérativement à prendre en compte. Contrairement à tous les dessins des épures rencontrées jusqu'à ce jour Julien 58023, les palonniers cruciforme ne sont pas symétriques longitudinalement. Le coté **B** présente un trou de plus que le coté **A**. (*Voir Fig.74*) coté a un trou de plus que l'autre. Prendre pour l'assemblage le coté court **A** qui correspond au perçage sur les fémurs, le coté le plus long **B** étant orienté vers le genou.

- 1) Par la procédure @ placer au zéro le moteur de la **Hanche**. Mettre en place le disque gradué correspondant à la **Jambe** en cours d'assemblage.
- 2) Emboîter le moyeu dentelé sur l'arbre de sortie du moteur en orientant le **Fémur** pour que son axe longitudinal soit bien au dessus du repère zéro du petit disque gradué.

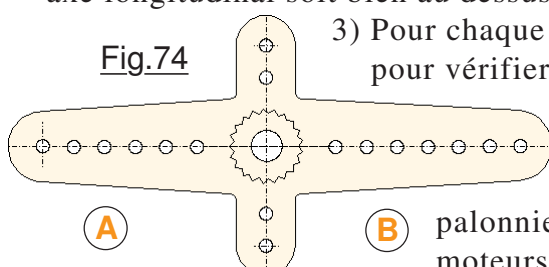


Fig.74

- 3) Pour chaque Jambe tester l'amplitude des débattements et leurs limites pour vérifier la conformité avec les positions limites espérées sur les épures de prédétermination. Durant ces manipulations procédez avec pondération. C'est de la petite mécanique, surtout ne pas serrer exagérément. Bien bloquer le palonnier et l'élément à assembler pour ne pas forcer sur les moteurs.



**DANGER :** Conduisant les essais et les vérifications, on va utiliser le potentiomètre pour animer l'articulation testée. Surtout, faire bien attention quand la position angulaire approche de  $+90^\circ$ . En effet, nous avons constaté lors de la détermination des caractéristiques des moteurs que dépasser un peu trop cette orientation fait diverger l'automatisme. Le moteur part en rotation continue et si l'on ne revient pas rapidement en arrière il ira en butée sur le mécanisme testé. Franchement il peut se coincer avec énergie. Pour le débloquent on devra forcer et il n'aimera pas du tout. Donc titillez le bouton du potentiomètre avec parcimonie, **et soyez prêt pour activer le bouton de panique.**

Nous y sommes enfin. La belle JEKERT trône avec élégance sur son support d'atelier. Les pattes ne touchent pas le sol. Le moment n'est pas encore venu de la poser à terre et de soumettre ses membres aux efforts qu'ils devront supporter par la suite. Toutes les équipes ont été rassemblées dans la salle de réunion. Un buffet bien garni avec ce qu'il faut en fluides pour l'accompagner nous attend, car pour fêter cet évènement la NDRMSE a bien fait les choses ... des petites bulles montent dans les verres sur pieds . Avant de pouvoir donner libre cours à nos conversations, il faut attendre que le Grand patron finisse son discours. Le planning a été respecté sans dépassement de délai. Toutes les difficultés jusqu'à présent ont été surmontées. Nous sommes sereins et demain est un autre jour : Champagne !

**Fig.75**

La belle exploratrice de mondes lointains repose sur un support de haute technologie. Les Griffes ne touchent pas le sol pour libérer les efforts articulaires.

Bouclier posé sur le support provisoire

La belle exploratrice de mondes lointains repose sur un support de haute technologie. Les Griffes ne touchent pas le sol pour libérer les efforts articulaires.

### Bouclier posé sur le support provisoire

Probablement que certaines ou certains d'entre vous vont trouver un peu étrange de scinder le didacticiel en deux tomes. Ça fait un peu écrivain qui cherche à éppater le galerie par le nombre des ouvrages qu'il publie. La réalité est un tantinet moins prosaïque. Figurez-vous que pour créer ce tutoriel j'utilise un outil informatique nommé PAGE MAKER en version 5. Ce progiciel a presque trente années, il était commercialisé en disquettes magnétiques de 5<sup>1/4</sup> pouces, et Internet n'était encore qu'un vague concept. Il ... tourne toujours avec une fidélité étonnante ! Toutefois, étant développé pour des versions de WINDOWS très poussiéreuses dont l'identificateur était encore à un seul chiffre, il a tendance à faire des fichiers qui deviennent énormes, surtout qu'on le gave d'images habillées. Par exemple pour les 42 pages du TOME 1 il totalise plus de 988Mo. À ce stade, ajouter une nouvelle page devient un casse tête sans nom. Aussi, désolé de "couper le poire en deux", mais je n'ai pas le choix.